

Создание возможностей для компьютерного моделирования физических процессов и инженерного анализа

Часть I

Bruce Jenkins

©2009 Ora Research LLC



Bruce Jenkins – учредитель и ведущий специалист американской аналитической компании Ora Research LLC (www.oraresearch.com). В исследованиях, которые легли в основу данной публикации, принимала участие еще одна компания того же профиля – Spar Point Research LLC (www.sparllc.com), где г-н Jenkins является совладельцем, а также руководителем исследований (president of research). Частично эта работа финансировалась компанией Siemens PLM Software. Материал публикуется с любезного разрешения автора.

Компьютерное моделирование физических процессов и инженерный анализ (*digital Simulation and Analysis – S&A*) становятся всё более важными для промышленных предприятий, поскольку обеспечивают достижение поставленных целей, соответствие производственному плану и бюджету, а также требуемое качество изделий. Просто не существует других способов, кроме S&A, которые позволили бы поддерживать проектирование современных изделий требуемой сложности и обеспечивать при этом необходимую производительность и эффективность. В своей работе компании стремятся не только применять CAE-системы в возможно большем числе проектов, но и сделать их неотъемлемой частью всего цикла разработки изделия. Это относится к концептуальному дизайну на ранней стадии разработки, когда принятие правильного решения оказывает наиболее сильное влияние на снижение издержек в течение всего жизненного цикла изделия (*lifecycle*). Далее следует разработка технологии производства (*manufacturing engineering*), где моделирование помогает сократить предпроизводственные расходы, затраты на управление, а также оснащение производства.

Какие цели преследуют лидеры, продемонстрировавших лучшие практики, когда стремятся к более эффективному использованию методов S&A? Важнейшими среди них являются улучшение качества изделия, сокращение затрат при его разработке и производстве, сокращение продолжительности этапов производственного графика. Например, в автомобильной промышленности стоимость изготовления одного физического прототипа (*physical prototype*) может достигать до 500 тыс. долларов, а для разработки новой модели автомобиля их необходимо 60. Ценность применения методов моделирования и инженерного анализа для уменьшения числа опытных образцов очевидна. Столь же важным делом является повышение качества изделия. По данным организации *Automotive Industry Action Group*, время, затрачиваемое на отзыв автомобиля, обычно составляет

250 дней, каждый из которых обходится производителю в 1 млн. долларов. Учитывая возможности методов S&A по обнаружению просчетов в конструкции еще до начала поставки изделия, их ценность здесь сложно переоценить.

Далее рассматриваются восемь ключевых характеристик функционала CAE-систем, которые способствуют эффективному применению методов S&A в исследуемых отраслях на протяжении жизненного цикла изделия.

1 Масштабируемость и последовательность

✓ Востребованность в практической деятельности

Что порождает требования к масштабируемости (*scalability*) и последовательности (*consistency*) в случае применения методов S&A? Как отмечают производители, существует потребность в том, чтобы специалисты всех подразделений на всех этапах разработки изделия показывали большую производительность при применении инструментов, с которыми они работают. Кроме того, необходимо минимизировать объемы повышения квалификации (*continual training*) и переобучения (*retraining*) при работе с различными инструментами. Окупаемость улучшается, если один и тот же набор CAE-инструментов может применяться для решения более широкого диапазона задач с разным уровнем точности (*fidelity*) различными специалистами, работающими в организации.

В процессе нашего исследования мы обнаружили, что у всё большего числа производителей наблюдается решимость внедрить S&A на самых ранних этапах разработки изделия и сделать это внедрение как можно более глубоким и всепроникающим. Например, менеджер одной из ведущих компаний по производству транспортного оборудования, рассказывает, что они плотно работают над тем, чтобы “трансформировать процесс разработки изделий и сделать его в большей степени опережающим, базирующимся на моделировании, нацеленным на достижение результата с

первой попытки и сводящим к нулю число физических прототипов”.

Примерно такое же мнение высказал технический руководитель, работающий на ведущего производителя медицинского диагностического оборудования. По его словам, инструменты [S&A] доступны пользователям в его организации, однако они применяются не столь широко, как хотелось бы. Почему? Имеют место недостаточная квалификация персонала и ограничения, связанные со сроками разработки (*engineers' time*) и производственным графиком. Рука об руку с этим идет ограниченная возможность наставлять менее опытных пользователей. Рассуждая о путях решения проблемы, он сказал: “**Частью задач руководимой мною команды являются обязанности повышать информированность [работников организации о S&A], обучать сотрудников и также служить механизмом трансформации и прироста знаний в этой области**”.

Действительно, широкий разброс в уровне квалификации различных классов пользователей является общей проблемой. Менеджер, работающий на производителя хирургических инструментов, рассказывает о том, что они тоже стараются сделать моделирование более распространенным в рамках своей организации, а также о том, что для этого необходимо: “... Мы пытаемся перенести применение CAE-инструментов на более ранние этапы цикла разработки изделия.

Вследствие недостаточности уровня квалификации, эти инструменты не всегда доступны всем, кому они необходимы. Но в целом в организации многое делается для того, чтобы использовать CAE-инструменты в течение всего процесса разработки. Цель организации – находить хорошие конструктивные решения за счет более раннего применения этих средств”.

Если теперь обратиться к другому концу шкалы масштабирования, то можно констатировать, что требуемое увеличение точности моделирования процессов привело к тому, что размер и комплексность задач вывели их на такой уровень сложности, который был немыслим еще пять лет назад. Такие задачи не только бросают вызов самым современным в мире [многопроцессорным] компьютерам, но и зачастую требуют от вендоров программного обеспечения [S&A] переработки архитектуры своих приложений, чтобы они могли справиться с поставленными задачами [в режиме параллельных вычислений].

✓ Возможности функционала

Обеспечение масштабируемости и последовательности приложений позволит квалифицированным пользователям (экспертам) эффективно поддерживать и наставлять расширенную команду разработчиков изделия. Использование S&A на более ранней стадии разработки и распространение этих методов

Исходные данные и методология

В материале обобщаются данные, полученные компанией *Spar Point Research LLC* в результате исследования лучших практик (*best practice*) при внедрении компьютерного моделирования и инженерного анализа (*digital Simulation and Analysis – S&A*), а также при максимизации влияния S&A на бизнес нескольких отраслей с дискретным производством (*discrete manufacturing*). (Дискретным принято считать такой тип производства, в котором исходный материал при переработке в конечный продукт претерпевает более одного передела с прерыванием технологического процесса. – Прим. ред.)

Исследовались следующие отрасли: аэрокосмическая и оборонная промышленность, производство авиадвигателей, автомобильных моторов, бытовой электроники, медицинского и транспортного оборудования (*off-highway equipment*).

Данные для исследования почерпнуты из подробных интервью с более чем двумя десятками руководителей проектов, ведущих инженеров, аналитиков и других работников производственных предприятий Северной Америки, Европы и Азии. Все интервью проводились старшими аналитиками компании *Spar Point Research LLC* – или при личной встрече, или по телефону.

Охваченные предприятия являются пользователями различных CAE-систем от разных поставщиков. В их числе можно назвать следующие (список продуктов дан в алфавитном порядке и не является исчерпывающим): *ABAQUS (Dassault Systemes)*, *AMEsim (LMS International)*, *ANSYS*

и *ANSYS CFX (ANSYS, Inc.)*, *CFD++ (Metacomp Technologies)*, *COSMOSWorks* (теперь *SolidWorks Simulation*), *Elfini (CATIA Elfini Structural Analysis от Dassault Systemes)*, *EXCITE (AVL)*, *Femap (Siemens PLM Software)*, *FEMLAB* (теперь *COMSOL Multiphysics*), *Flowmaster (Flowmaster Group)*, *Fluent (ANSYS, Inc.)*, *Hypermesh (Altair Engineering)*, *I-deas CAE (Siemens PLM Software)*, *LS-DYNA (Livermore Software Technology Corporation)*, *MATLAB (MathWorks, Inc.)*, *Moldflow* (теперь *Autodesk Moldflow*), *MSC.Adams*, *MSC.Nastran* и *MSC.Patran (MSC Software)*, *NPSS (Numerical Propulsion System Simulation от NASA Glenn Research Center)*, *NX Nastran (Siemens PLM Software)*, *Simulink (MathWorks, Inc.)*, *STAR-CD (CD-adapco)*, *VALDYN*, *VECTIS* и *WAVE (Ricardo plc)*. (В скобках добавлены названия поставщиков CAE-систем и некоторые уточнения, сделанные нами при переводе. – Прим. ред.)

Исследуемые компании выбирались в соответствии с результатами их деятельности и репутацией, которую они заслужили в соответствующей отрасли промышленности. Участники опросов-интервью выбирались в соответствии с их должностями и уровнем осведомленности об области применения компьютерного моделирования и инженерного анализа в выбранных организациях, причем особое внимание уделялось тем мероприятиям, которые способствовали росту эффективности, продуктивности и повышению вклада CAE-систем в создание изделий.

2 Интеллектуальные средства генерации моделей

✓ Востребованность в практической деятельности

Производственные компании инвестируют миллионы долларов в разработку изделий и документирование проектов, однако во многих случаях применение имеющихся инструментов S&A не способствует сокращению этих инвестиций. В условиях, когда отсутствуют инструменты интеллектуальной генерации (*intelligent generation*) моделей, имеют место чрезмерные затраты времени высокооплачиваемых CAE-экспертов на воссоздание геометрии изделий, тогда как это время можно было бы потратить более продуктивно – собственно на моделирование физических процессов и интерпретацию его результатов.

Хуже того, исследуемые в ходе инженерного анализа модели, которые основаны на “моментальных снимках” непрерывно развивающейся проектной модели изделия, рискуют стать устаревшими еще до того, как результаты этого анализа будут доставлены заинтересованным лицам. Может быть, следует выполнять инженерный анализ в завершение разработки изделия? Руководители проектов, которые не могут планировать работу с учетом необходимости ждать результаты моделирования, вынуждены двигаться вперед, оперируя недостаточной информацией и рискуя столкнуться с необходимостью внесения дорогостоящих изменений на более поздних этапах. Или же им приходится принимать “безопасные” проектные решения, которые зачастую заглушают инновации и увеличивают себестоимость.

Почему необходимо делать акцент на опережающем инженерном анализе (*up-front analysis*)? Менеджер, работающий на ведущего производителя транспортного оборудования (*off-highway equipment*), объясняет это следующим образом: “Выполнение моделирования и инженерного анализа заранее, до завершения любого фрагмента проекта, определенно является вопросом, который имеет большую ценность. Я трачу всё свое время на том участке цикла разработки, где изменения обходятся в один доллар (*one-dollar-to-change*). Здесь нет множества вовлеченных лиц, за исключением нескольких инженеров”. В этот период времени производители не обладают полной информацией о работе изделия, однако вынуждены принимать решения, что может приводить к большим затратам на следующих этапах жизненного цикла.

Возможность по мере надобности автоматически получать для инженерного анализа модели, соответствующие текущему состоянию проекта, поможет усилить влияние S&A на разработку изделия – как на ранней стадии, когда это влияние более значительное, так и на протяжении всего цикла разработки.

✓ Возможности функционала

Какие барьеры поможет преодолеть производитель правильная технология [применения S&A]?

Первый барьер – это неполнота информации об изделии. Представитель американского автопроизводителя сказал следующее: “Мы хотели бы проводить анализ для неполных моделей (*incomplete model*),

на все этапы жизненного цикла изделия не только экономит время за счет уменьшения количества итеративных циклов [улучшения конструкции изделия]; такой подход способствует укреплению коллаборативных связей на всех уровнях, ломает барьеры в процессе взаимодействия, а также стимулирует рост доверия, повторное использование информации и, как результат, способствует улучшению качества изделия.

Следует отметить, что отрасль, разрабатывающая CAE-системы, первоначально формировалась для обслуживания относительно небольшой ниши, рассчитанной на инженерную элиту. Такие специалисты и сейчас занимаются решением самых сложных в мире задач. Этот факт выдвигает на передний план такое свойство CAE-систем, как производительность (*performance*): если CAE-инструменты соответствуют потребностям пользователей, применяющих их эпизодически, но при этом не удовлетворяют запросам специалистов высшей квалификации (“*high end*”), то это означает, что данная платформа не обладает свойством масштабируемости.

Продуктивность (*productivity*) является ключевым фактором; CAE-системы всё больше и больше применяются на всех уровнях – от неспециалистов [в области моделирования], использующих эти инструменты эпизодически, до квалифицированных пользователей, которым необходимы продвинутые инструменты для проведения инженерного анализа, критически важного для успеха всего проекта в целом. Функционал CAE-систем, позволяющий определять общеупотребительные последовательности операций (*workflow*) и предоставляющий инструменты, которые фиксируют лучшие практики (*best-practice tool*), дает возможность новым членам команды разработчиков быстрее вливаться в сложившийся коллектив, а пользователям, применяющим S&A эпизодически, – спокойно проводить расчеты на базе лучших корпоративных практик.

✓ Вопросы для лиц, принимающих решения

Чтобы оценить CAE-вендоров и предоставляемых ими решений, руководство предприятий должно понимать, насколько хорошо эти инструменты могут быть оптимизированы для различных групп пользователей в рамках их организации. Насколько легко можно ввести эти инструменты в работу и добиться продуктивности? Позволяют ли CAE-инструменты повысить эффективность разработки изделий и устранить узкие места в этом процессе? Позволяет ли один и тот же комплекс CAE-инструментов удовлетворить потребности пользователей, только осваивающих премудрости инженерного анализа, и квалифицированных специалистов одновременно? Предусмотрена ли для квалифицированных пользователей техническая возможность обучать новичков, контролировать их работу, а также фиксировать свой опыт, чтобы им могли воспользоваться неспециалисты? И, наконец, можно ли достаточно эффективно масштабировать CAE-инструменты в условиях постоянного роста размера и сложности задач?

чтобы можно было принимать решения на ранней стадии разработки”. Является ли это проблемой? “CAD-инструменты не позволяют вывести неполную модель, поэтому для проведения CAE на ранней стадии проектирования вам часто приходится пользоваться фрагментами ранее выполненных проектов (*surrogate from past work*)”. Хотя инженерам-аналитикам обычно удается найти “нечто достаточно близкое”, ситуация “могла бы быть и получше”.

Второй барьер – это жестко детерминированный (*inflexible*), неинтеллектуальный (*non-intelligent*) импорт CAD-моделей. Большинство CAE-инструментов поддерживает ввод определенных форматов CAD-данных. Возможности доступа к геометрии изделия для её создания, модификации и ремонта являются [одним из] основных критериев различий между системами от разных CAE-вендоров. Такой доступ – ключевое свойство, способствующее повышению продуктивности в мире различных CAD-систем (*multi-CAD world*). Это открывает предприятиям путь для применения рациональных подходов при построении последовательности операций для инженерного анализа, что позволяет значительно сократить общую продолжительность цикла разработки.

Эффективность такого подхода была наглядно продемонстрирована по результатам недавнего бенчмаркинга, проведенного специалистами американского производителя авиамоторов. В финальной презентации руководству компании было сказано следующее: “Из расчета на одну модель, мы сэкономили две недели на трансляции, а затем еще четыре недели на корректировке геометрии и соответствующем конечно-элементном анализе”. Для 26 моделей, используемых в проекте, экономия составляет шестизначную цифру в долларах на каждую итерацию [в процессе корректировки конструкции разрабатываемого изделия].

✓ Вопросы для лиц, принимающих решения

Лица, принимающие решения, должны оценить, что препятствует использованию S&A на более ранних стадиях разработки изделия. Насколько качественно их CAE-системы позволяют создавать и изменять геометрию? Далее. Какие более продвинутые возможности инструментов для инженерного анализа необходимы на всех этапах разработки – быстрая чистка и ремонт геометрии, “подавление” (*suppression*) и модификация конструктивных элементов, оценка/извлечение (*abstraction*) топологии, автоматизация и контроль? И, наконец, как будут обстоять дела с управлением изменениями и кастомизацией для повторного использования знаний и лучших практик у приложений с более высоким уровнем автоматизации, предназначенных для проверки правильности конструкций?

3 Производительность, достаточная для применения в промышленности

✓ **Востребованность в практической деятельности**
Даже если у производителя есть возможность приобрести все необходимые инструменты компьютерного

инженерного анализа, всё равно существуют ограничения, препятствующие более эффективному их применению. “При том разнообразии инструментов [S&A], которым мы располагаем, у нас практически нет ограничений на то, что мы можем делать в этой области”, – так нам ответил один немецкий автопроизводитель. – “Однако это не означает, что мы не хотели бы, чтобы у нас было программное обеспечение с более развитыми возможностями, чем сегодня – демонстрирующее большую скорость вычислений, допускающее обработку моделей большего размера и способное хорошо работать на недорогих компьютерах”. Кроме того, мы услышали о потребности в более тесной взаимосвязи с большей степенью автоматизации между S&A и другими процессами при разработке изделия.

✓ Возможности функционала

Лицам, принимающим решения, необходимо поинтересоваться, какая наиболее крупная задача решена в каждом из рассматриваемых классов задач. Как отмечает немецкий автопроизводитель, размер модели является одним из ключевых факторов. Модели для изучения шума, вибрации и непланности движения (*Noise, Vibration, Harshness – NVH*) для двигателя автомобиля или системы управления обычно содержат порядка 10 млн. степеней свободы (*Mega Degrees Of Freedom – MDOF*), а в некоторых случаях и 80÷90 MDOF. Не являются чем-то необычным для конечно-элементного анализа (*Finite Element Analysis – FEA*) модели, содержащие 5 млн. элементов или более 8 млн. узлов (~25.5 MDOF). Ну а в задачах вычислительной гидроаэродинамики (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) и для [компьютерных] краш-тестов такое количество DOF считается малым.

В то же время, совершенно недостаточно обладать средствами для решения крупной задачи, если отсутствуют возможности для подготовки корректных входных данных для солвера или последующего просмотра результатов с целью своевременного внесения корректив. Во многих случаях инженерам приходится тратить более 80% времени на построение модели для анализа. Но появляются новые инструменты, которые сулят значительные изменения в этой области (см. выше раздел “Интеллектуальные средства генерации моделей”).

К другим средствам обеспечения производительности, достаточной для применения в промышленности, относится включение процессов моделирования и получаемых результатов в корпоративную сеть управления данными об изделии (*corporate PDM backbone*). Это позволяет обеспечить возможность взаимодействия различных подразделений (площадок), а также стандартизации и автоматизации бизнес-процессов (см. часть II статьи).

✓ Вопросы для лиц, принимающих решения

Лицам, принимающим решения, следует учитывать необходимость включения набора инструментов

для всестороннего инженерного анализа в среду, в которой обеспечивается взаимодействие [участников географически] рассредоточенной команды разработчиков в процессе создания модели. Руководителям надо понимать, какие возможности предоставляют инструменты для инженерного анализа – должны обеспечиваться не только построение моделей различных типов, но также легкий и быстрый доступ к результатам; должны иметься и средства управления моделями.

Просто ли обеспечить взаимодействие многочисленных подразделений, рассредоточенных по всему миру? Какие имеются возможности для автоматизации настройки общих параметров (зачастую зависящих от применяемого солвера и постановки задачи) при решении задач инженерного анализа, и какие – для визуализации структуры моделей? Какие стандарты и лучшие практики поддерживаются?

4 Моделирование взаимосвязанных физических полей и многодисциплинарное моделирование

✓ Востребованность в практической деятельности

Зачастую результаты моделирования одного процесса являются входными данными при моделировании другого. Это стимулирует необходимость более тесной интеграции и взаимосвязанности решений для моделирования. В настоящее время многие внедренные у клиентов решения слабо связаны между собой, если вообще можно говорить о взаимосвязанности. Ручная организация труда, когда результаты инженерного анализа одной задачи (*discipline*) заново вводятся при решении другой, являются распространенным явлением – это может вызывать серьезные потери точности, падение эффективности расчетов и, в конечном счете, может сказаться на планах разработки изделия и на его качестве.

Повышение сложности изделия и требований к его эксплуатационным характеристикам на фоне роста напряженности графика разработки приводит к существенному увеличению важности моделирования взаимосвязанных физических полей (*multiphysics*) и многодисциплинарного (*multidisciplinary*) моделирования. Примерами сказанного могут служить аэрокосмическая и оборонная промышленности. Как поведет нас один из ведущих подрядчиков, там это является особенно важным “на системном уровне, где взаимодействие [между элементами системы] может не быть столь очевидным”.

Другой подрядчик, работающий с предприятиями аэрокосмической и оборонной отраслей, объясняет причину: “Если оценивать сложность нашего изделия, достаточно вспомнить [самолеты-истребители] ранних поколений, которые выпускались в течение почти 25 лет. В 1970-е годы, на стадии младенчества, изделие было гораздо менее сложным. Требуемый объем работ по моделированию был минимальным в сравнении с сегодняшним, когда взаимодействует множество сложных подсистем, а многочисленные датчики собирают обильный

урожаем данных”. Поэтому, “при проверке эксплуатационных характеристик необходимо полагаться на инструменты моделирования. Мы постоянно расширяем границы наших возможностей в области физики моделирования”.

✓ Возможности функционала

При мультифизическом моделировании изучается поведение взаимосвязанных физических полей – к примеру, для изделий со встроенной электроникой необходимо изучать гидроаэродинамику (например, охлаждающих потоков. – *Прим. ред.*) с привлечением метода конечных элементов и распределение тепловых полей одновременно. Само собой разумеется, что чем больше взаимосвязанных физических явлений рассматривается, тем большая потребность в объединенных решениях ощущается.

При мультидисциплинарном моделировании обычно исследуются не взаимосвязанные физические поля, а применяются методы нескольких дисциплин, что является не менее важным. Например, при моделировании закрылка самолета, чтобы обеспечить мягкое управление полетом на переходных [аэродинамических режимах] и выяснить распределение нагрузки в системе, используются методы кинематики и динамики твердого тела. Для расчета давления применяются методы вычислительной гидроаэродинамики (*CFD*), для оценки напряжений – прочностной анализ (*structural analysis*), а для оценки долговечности ключевых компонентов – анализ длительной прочности (*durability analysis*).

✓ Вопросы для лиц, принимающих решения

Помимо того, что надо убедиться, действительно ли CAE-поставщики могут предоставить инструменты моделирования, обладающие описанным выше функционалом, лица, принимающие решения, должны также проверить, располагают ли вендоры возможностями развития своих продуктов в следующих двух направлениях:

- расширение функционала, необходимое для наиболее продвинутых пользователей CAE-инструментов;
- обеспечение интеграции ключевых технологий, применяемых в солверах, с пакетом программ для формирования модели, построения сетки, инструментами для визуализации и анализа результатов моделирования.

Лица, принимающие решения, должны выяснить точную потребность в мультифизическом моделировании для их организации – в каких программных приложениях необходимость ощущается больше всего? Следует также выяснить возможности для мультидисциплинарного моделирования, причем, освоение этих возможностей необходимо проводить в контакте с вендорами, которые могут обеспечить поддержку использования общедоступных моделей и данных с таким расчетом, чтобы избежать непроизводительных затрат на трансляцию и на перепроектирование. ☹

(Продолжение следует)