

## Технологии эффективной работы с конечно-элементной сеткой в MSC Apex

В современной инженерной практике очень важным является использование “правильных”, то есть эффективных, удобных и достоверных инструментов инженерного моделирования и анализа. Ключевыми критериями выбора таких инструментов являются эффективность и простота их освоения и повседневного использования. Несколько лет назад, анализируя ситуацию на рынке программного обеспечения для инженерного анализа, а также запросы пользователей, компания MSC Software, с 2017 года являющаяся частью международной корпорации Hexagon, предприняла попытку создания совершенно новой программной платформы, которая предлагала бы инженеру-расчетчику удобную, высокоэффективную и производительную среду моделирования и анализа проектируемых конструкций. В результате появилась CAE-платформа, которая получила название MSC Apex.

MSC Apex – это специализированная среда для инженера-расчетчика (рис. 1). В MSC Apex он получает доступ к целому комплексу

очень эффективных инструментов для подготовки и отладки расчетной модели, а также запуска ее на расчет и обработки результатов анализа. Большая часть этих инструментов так или иначе связана с созданием конечно-элементной (КЭ) модели. О некоторых из этих инструментов и технике моделирования в среде MSC Apex пойдет речь в этой статье.

### Восстановление геометрических объектов из КЭ-сетки

В процессе моделирования и анализа с применением метода конечных элементов (МКЭ) проектные организации и конкретные инженеры часто сталкиваются со сложностью повторного использования уже существующих, созданных ранее КЭ-моделей. Особенно это характерно для крупных организаций и их проектных подразделений, тем более если опыт применения расчетных систем там исчисляется десятками лет и накоплен обширный интеллектуальный багаж, в том числе в виде множества расчетных

КЭ-моделей спроектированных изделий.

В ходе повседневного моделирования расчетчики нередко имеют дело с ситуацией, когда конечно-элементная модель не ассоциирована с геометрической моделью. В зарубежной технической литературе для обозначения такой модели часто используется термин “orphan mesh”. Не редки также ситуации, когда геометрическая модель вообще отсутствует и возникает необходимость реверсного инжиниринга для восстановления геометрической модели на основе информации из КЭ-модели. При этом недостаточно просто построить геометрические объекты по КЭ-сетке, необходимо корректно перенести весь спектр свойств, нагрузок и граничных условий на воссозданную геометрию. Пожалуй, главным преимуществом такого восстановления геометрии является возможность работать с инструментами, предназначенными для создания и редактирования геометрических данных, а также возможность быстро перестраивать КЭ-сетку с новыми скорректированными характеристиками.

В актуальной версии MSC Apex добавлена возможность восстановления геометрии на основе КЭ-сеток, состоящих как из оболочечных, так и из объемных конечных элементов.

В некоторых традиционных системах инженерного моделирования и анализа уже существует инструмент, позволяющий построить набор треугольных поверхностей на основе КЭ-сетки из треугольных элементов (тесселированные поверхности, формат стереолитографии STL и подобные технологии).

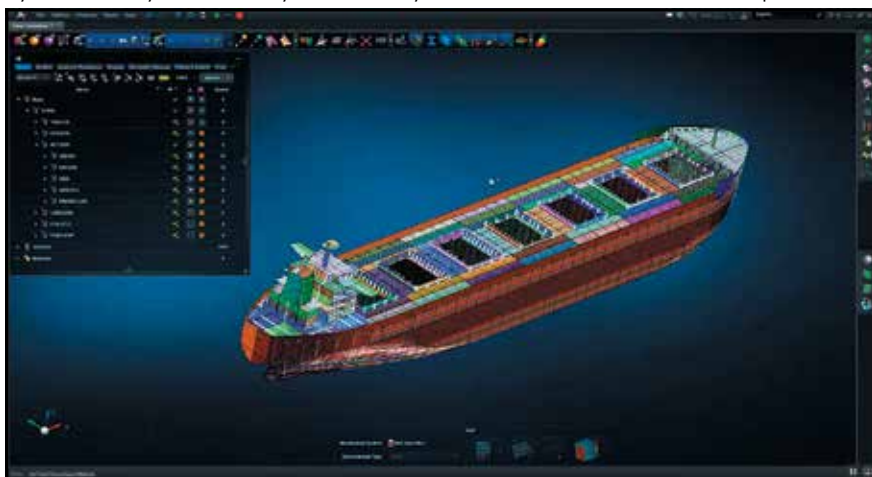


Рис. 1

Однако существует проблема в автоматическом сглаживании таких поверхностей из-за того, что исходной информацией служат узлы КЭ-сетки. КЭ-сетка – это дискретное представление некоторой континуальной конструкции. Если не предпринять дополнительных усилий, полученная таким образом тесселированная поверхность наследует дискретность КЭ-сетки. Чтобы решить эту проблему, необходимы инструменты и алгоритмы, которые автоматически распознают геометрические особенности будущей модели на макроуровне и на нужных участках сгладят поверхности.

Такой инструмент имеется в арсенале MSC Apex. Geometry from Mesh отвечает за восстановление геометрии на основе КЭ-сетки. В него добавлена опция автоматического сглаживания граней объемных тел, полученных на базе фасетной сетки и распознанных как аналитические грани (рис. 2). При включенной опции Auto Smooth Identified Analytical Faces вновь создаваемая сетка строится по сглаженной траектории, несмотря на то что геометрия – это набор фасетов. Таким образом удастся избежать “наследования” дискретности от грубой исходной сетки.

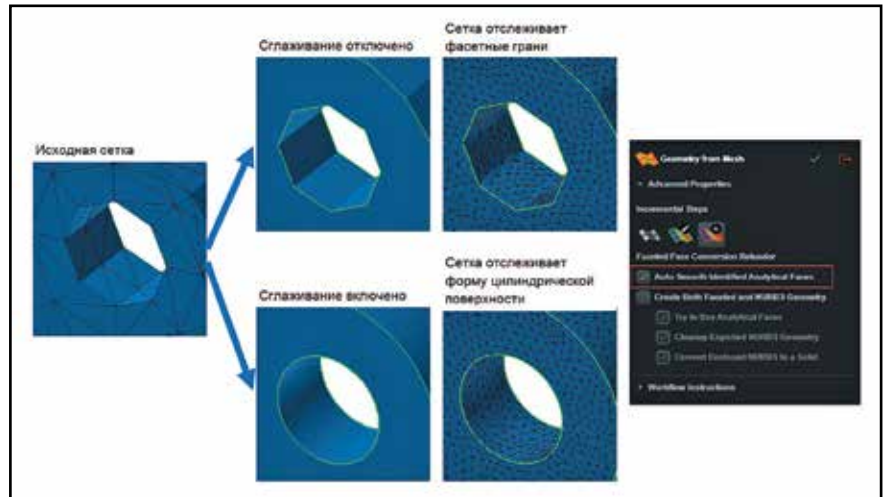


Рис. 2

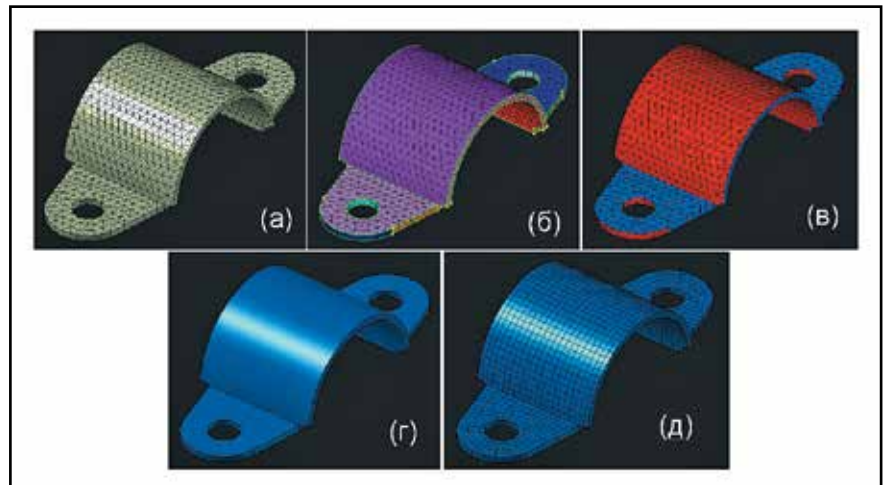


Рис. 3

## Восстановление гладкой параметризованной геометрии из КЭ-сетки

При восстановлении геометрии традиционными методами дискретность явно или неявно сохраняется вследствие привязки к фасетной структуре. Более того, при экспорте полученной таким образом геометрии файл геометрической модели будет содержать геометрические данные, а также их источник – фасетную сетку. Это накладывает некоторые ограничения на использование такой восстановленной геометрии вне MSC Apex.

Чтобы избежать ограничений и получить полную свободу редактирования восстановленной геометрии, необходимо получить гладкую, независимую от фасетной сетки геометрию. Такой способ предлагает MSC Apex версии Jaguar. Для этого достаточно в инструменте Geometry



Рис. 4

from Mesh включить опцию Create Both Faceted and NURBS Geometry (рис. 3). При этом MSC Apex распознает участки КЭ-модели и классифицирует их по типам создаваемых геометрических объектов – плоские, цилиндрические, конические поверхности, объемные тела, выделяя каждый тип своим цветом. На распознанных участках с помощью NURBS-сплайнов будет построена полностью независимая параметрическая геометрическая модель, в отношении которой можно использовать традиционные методы и инструменты, применяемые на любой другой геометрии.

Возможность получения качественной сглаженной геометрической модели на основе исходной КЭ-сетки особенно востребована в процессе топологической оптимизации. В этом отношении новый модуль MSC Apex Generative Design, сочетающий в себе средства топологической оптимизации и восстановления геометрии из сетки, имеет большие перспективы. Например в тех случаях, когда КЭ-сетку как результат топологической оптимизации необходимо преобразовать в гладкую параметризованную геометрическую модель бионической формы (рис. 4). Эта геометрическая

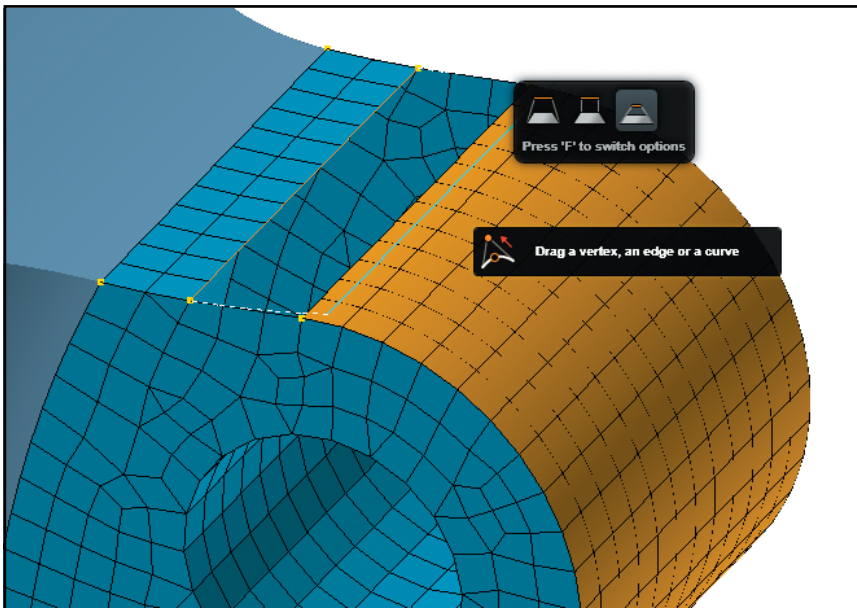


Рис. 5

модель может как служить исходной информацией для последующих этапов оптимизации, так и являться готовой моделью для 3D-печати.

## Прямое геометрическое моделирование и инструменты редактирования геометрии

MSC Apex имеет ряд высокоэффективных средств для редактирования геометрии. В системе реализована технология прямого геометрического моделирования с автоматическим перестроением КЭ-сетки. Таким образом, КЭ-сетка будет автоматически перестроена сразу после любых изменений в геометрической модели. Включив режим отображения качества конечных элементов по одному из множества стандартных тестов для 2D- и 3D-элементов, инженер может наблюдать, как его действия с геометрической моделью влияют на качество КЭ-модели.

Среди инструментов прямого геометрического моделирования необходимо отметить инструмент перемещения вершин и кромок поверхностей Vertex/Edge Drag. Для изменения конфигурации геометрических объектов достаточно указать курсором на вершину или кромку и потащить выбранный элемент в нужном направлении. Автоматически, в зависимости от контекста и

положения перемещения объекта, подсвечиваются вспомогательные маркеры – совпадения, параллельности, перпендикулярности, соосности и другие, что позволяет точно позиционировать его по отношению к другим объектам в модели (рис. 5).

Пожалуй, наиболее часто применяемый для редактирования объемной геометрии инструмент – Push/Pull. Он дает возможность одним движением мыши получить объемное тело на базе плоского профиля или поверхности. Однако этим функционал инструмента не ограничивается. В зависимости от контекста и от выбранного объекта для редактирования он может создать скругление, фаску или выровнять объемное тело до какой-либо плоскости или поверхности (рис. 6).

## Генерация гексаэдральной сетки и инструмент виртуального разделения геометрии

На массивных 3D-деталях, как правило, строится сетка из объемных конечных элементов. Типовыми формами 3D-элементов являются гексаэдр (hexa), призма (penta) и тетраэдр (tetra). Для заполнения определенного объема конечными элементами, при прочих равных условиях, выгодно использовать гексаэдры, так как в этом случае минимально число узлов, элементов и степеней

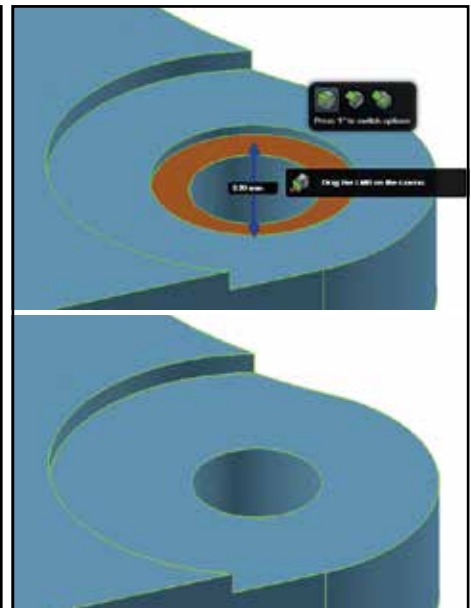


Рис. 6

свободы. И, соответственно, потребуются меньшие затраты машинных ресурсов и времени расчета. Кроме того, гексаэдры, даже неидеальные по форме, дают более точные результаты расчета по сравнению с тетраэдральными элементами. Призматические элементы обычно применяются в переходных зонах гексаэдральных и тетраэдральных сеток, а также для построения сетки в области оси вращения деталей. Однако в генерации тетраэдральной КЭ-сетки есть преимущество – простота реализации автоматической генерации на объемных геометрических моделях любой сложности. Поэтому если геометрическая модель достаточно сложная и нет жестких требований по размерности задачи и лимитов по ресурсам и времени счета, то обычно выбор падает на тетраэдральные элементы. При использовании гексаэдральных элементов автоматическая генерация связанной сетки на объемных деталях сложной формы сопряжена со значительными трудностями.

Несмотря на сложности, традиционно на предприятиях, где необходимо использовать гексаэдральную сетку, объемные тела подразделяются на более простые, параметрически описанные, и на них генерируется гексаэдральная сетка, которая затем с огромными затратами времени и труда специалистов сшивается в единую КЭ-сетку. Это, конечно, очень затратный подход,



требующий большого количества рутинной работы.

MSC Apex предлагает очень эффективное решение для построения связанных КЭ-сеток из гексаэдров. Эту возможность предоставляет инструмент Split Tool. Реализованный в нем уникальный подход позволяет отказаться от необходимости в делении объемного тела на несколько отдельных тел. Опция Split Behavior инструмента Split Tool в режиме Partition предоставляет возможность сохранить геометрию целой и условно подразделить ее на виртуальные участки с границами, по которым генератор сетки MSC Apex гарантирует совпадающую сетку в режиме "узел-в-узел". Это снимает с пользователя необходимость заботиться о стыковке сетки по границам разделенного на части объемного тела. MSC Apex полностью берет на себя эту задачу.

Для удобства интерактивной работы по разделению объемного тела на участки (cells или partitions) с помощью плоскостей или поверхностей в MSC Apex разработан инструмент визуализации Display/Using 2.5D Color. Он отображает красным цветом зоны объемного тела, на которых пока невозможна генерация гексаэдральной сетки. Зеленым отображаются участки, полностью отвечающие требованиям генератора hexa-сетки, на которых уже можно создать качественную объемную КЭ-сетку. Желтый цвет на участках объемного тела указывает на избыточное количество граничных условий по созданию и увязке сетки на участках объема. Как правило, такая ситуация возникает в случае дополнительных действий пользователя. Желтый цвет является сигналом о необходимости упрощения условий в локальной зоне модели.

В MSC Apex реализована уникальная интеллектуальная система помощи, подсказывающая пользователю, где и по какой причине встроенный генератор КЭ-сетки не может ее создать. Для ее активации достаточно на интересующей области модели в контекстном меню выбрать опцию Diagnose Meshability. Система проанализирует модель и отобразит, что и где является причиной невозможности создания сетки

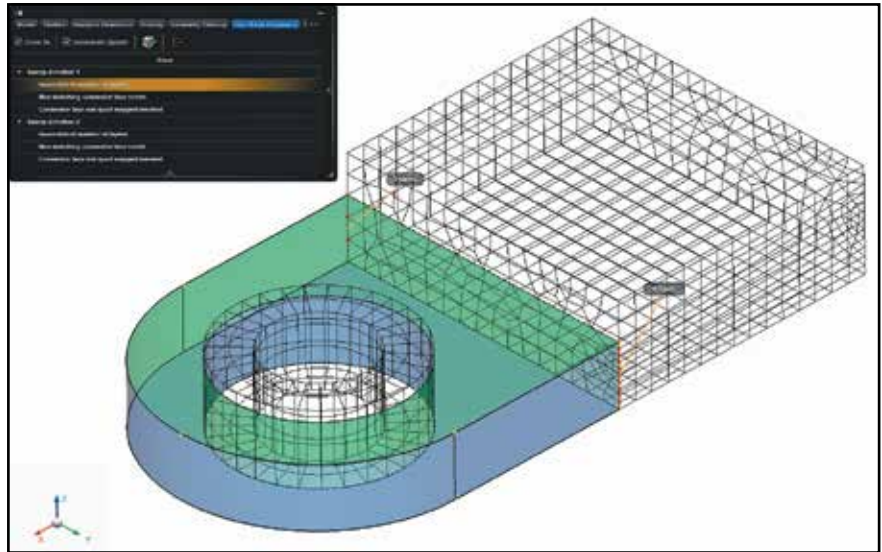


Рис. 7



Рис. 8

(рис. 7). Это является существенным подспорьем пользователю при отладке модели, особенно в ситуации, когда ему сложно самостоятельно распознать причину ошибки.

Разделение объемных тел поверхностью, эквидистантной грани, позволяет выполнять метод Split Using Offset Face в инструменте Split Tool. Он дает возможность при разметке объемных тел на блоки простой формы быстро создавать границу участков, эквидистантно отстоящую от указанной грани на заданное расстояние (рис. 8). Этот метод существенно упрощает подготовку сложных объемных тел в процессе генерации связанной hexa-сетки.

### **Пользовательские правила создания сетки в локальных зонах – Feature Mesh Settings**

При генерации КЭ-сетки на сложных геометрических моделях часто возникают ситуации, когда необходимо учитывать конкретные

параметры геометрических особенностей объектов проектирования в каждой локальной зоне, например их характерные размеры. Геометрическими особенностями в данном контексте могут выступать 2D- и 3D-отверстия, фаски, скругления, цилиндрические и прямоугольные поверхности и тому подобное. Крайне эффективным подходом является обеспечение возможности для генератора конечно-элементной сетки находить такие геометрические особенности в автоматическом режиме и строить сетку конечных элементов соответственно требованиям пользователя со специфическими параметрами и с учетом характерных размеров этих геометрических особенностей.

Такой функционал реализован в MSC Apex. Представим ситуацию, когда модель включает в себя несколько сотен 2D-деталей, на каждой из которых имеются отверстия с диаметром 5, 8, 10 мм. Пользователь хочет получить качественную сетку на всей модели, однако в

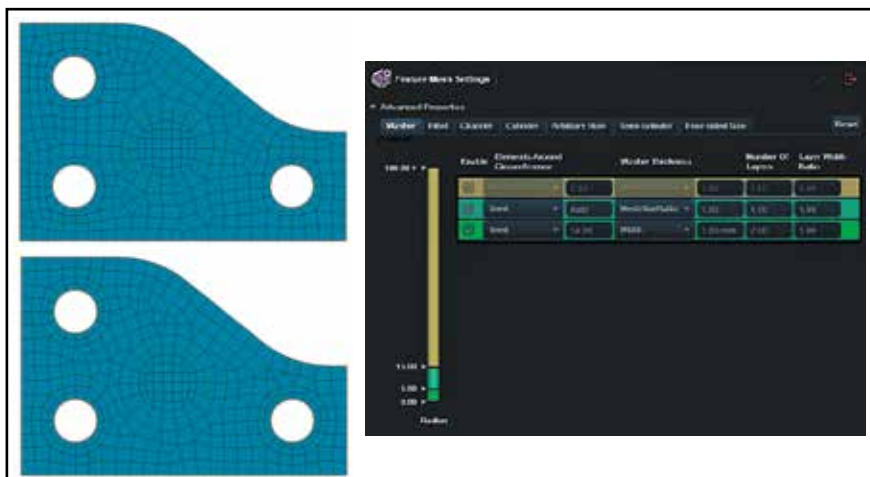


Рис. 9



Рис. 10



Рис. 11

зоне концентраторов напряжений (отверстий) необходимо создать более качественную локальную сетку с определенным количеством элементов правильной формы по периметру отверстия и в радиальном направлении – в зависимости от диаметра конкретного отверстия (так называемые “washers” – шайбы). Перед генерацией сетки пользователь настраивает Feature Mesh Settings, по сути создавая правила генерации КЭ-сетки в зависимости от типа и характерных размеров геометрических особенностей. После этого он запускает генерацию сетки с включенной опцией Feature

Mesh. Это заставит генератор сетки при нахождении соответствующих геометрических особенностей применять описанные пользователем правила и генерировать гораздо более качественную КЭ-сетку в автоматическом режиме (рис. 9). Такой подход позволяет существенно экономить время и усилия по подготовке и отладке сложной КЭ-модели.

## Замещение деталей

Технология замещения деталей Part Replace позволяет автоматически замещать существующие детали в модели новыми версиями деталей,

при этом сохраняя максимальное число их атрибутов, включая автоматически адаптируемую под новую геометрию сетку, материалы, нагрузки, граничные условия, а также взаимодействия с другими телами в модели (interactions) через коннекторы и шарниры (рис. 10).

Закладка Part Replacement в дереве модели отражает статус замещения и активные возможности фильтрации атрибутов, которые будут замещены на старой детали новыми. При замещении старого объемного тела новым может быть получена новая сетка с сохранением настроек плотности сетки, предварительной разметки, свойств материала, нагрузок, закреплений, коннекторов, шарниров, точечных масс. При необходимости замещаемые детали могут быть сохранены в модели.

## Макросы, скрипты на языке Python и пользовательские инструменты

Одним из важнейших характеристик любой коммерческой системы инженерного моделирования и анализа является возможность подключения пользовательских алгоритмов и подпрограмм, подразумевающая поддержку какого-либо языка программирования. MSC Apex имеет такие возможности, и для этих целей используется современный объектно-ориентированный скриптовый язык высокого уровня Python.

При работе в среде MSC Apex можно записывать макросы как последовательность команд на языке Python. Затем их можно модифицировать в виде скриптов с включением дополнительных модулей и подпрограмм, циклов и проверки условий. В MSC Apex открыт обширный набор внутренних функций для программирования MSC Apex API (Application Programming Interface, программный интерфейс приложения), который хорошо документирован. Могут быть созданы скрипты различного уровня сложности, автоматизирующие многие рутинные операции. Степень автоматизации варьируется в зависимости от степени проработки скрипта.

Пользователь может создать любое количество своих собственных инструментов, разработать графический пользовательский интерфейс (рис. 11) и назначить для инструмента кнопку быстрого доступа на пользовательской панели инструментов.

## Заключение

Формат статьи не позволяет в полной мере описать все инструменты и возможности по созданию качественных конечно-элементных сеток в MSC Apex. В материале рассмотрена лишь небольшая часть средств и методов, позволяющих инженеру готовить расчетные модели в комфортной и продуктивной среде.

MSC Apex – не просто еще одна CAE-система, это **ПЛАТФОРМА** для интеграции уже зарекомендовавших себя классических технологий, а также для новых и перспективных инструментов и технологий MSC Software, которые поэтапно добавляются в экосистему MSC Apex и взаимодействуют по единым формализованным правилам в единой современной графической среде.

**MSC Software, часть корпорации Hexagon Manufacturing Intelligence**, входит в первую десятку компаний-разработчиков программного обеспечения и является мировым лидером в области виртуального моделирования, инженерных расчетов и услуг, значительно расширяющих возможности стандартных промышленных методов и подходов.

Московский офис корпорации MSC Software более четверти века работает на территории России, СНГ, Грузии и стран Балтии.

В предлагаемые компанией услуги входит:

- ▶ продажа программных комплексов корпорации MSC Software и ее дочерних компаний
- ▶ техническая поддержка
- ▶ обучение специалистов
- ▶ сервис

Многие подходы, инструменты и, как следствие, возможности для пользователя на данный момент являются уникальными.

Благодаря целому комплексу высокоэффективных универсальных и интуитивно понятных инструментов, автоматизирующих многие рутинные операции, связанные в первую очередь с подготовкой геометрической модели к построению качественной КЭ-сетки и подготовкой расчетной модели, а также благодаря новейшим перспективным разработкам и ноу-хау, реализованным в MSC Apex, достигается существенное повышение эффективности труда инженера по сравнению с рабо-

той в традиционных CAE-системах. Прирост производительности труда доходит до нескольких сотен процентов, а для некоторых операций возрастает более, чем на порядок. Затраты на освоение и эксплуатацию системы уменьшаются. За счет этого растет эффективность процессов моделирования и анализа на предприятии в целом, что, безусловно, положительно сказывается на сроках проектирования изделий и ведет к снижению финансовых затрат на проектирование.

**А. В. Гуменюк, к.т.н.,  
старший технический эксперт,  
компания MSC Software RUS**

## НОВОСТИ

### Новая роботизированная ячейка ABB

Новая роботизированная ячейка ABB для трехмерного контроля качества (3DQI), способна обнаружить дефекты тоньше человеческого волоса, незаметные невооруженным глазом. Ячейка значительно ускоряет производство, проводя быстрое и точное тестирование и делая метрологию проще и быстрее. Ячейка трехмерного контроля качества устраняет необходимость в длительном ручном тестировании, существенно снижая вероятность ошибки. Помимо повышения производительности роботизированная ячейка снижает затраты, сводя к минимуму риск дефектов, которые могут привести к отзыву конечного продукта.

Ключевые преимущества ячейки 3DQI – комбинированная скорость, точность до 100 микрон и гиб-

кость за счет модульной конструкции, благодаря которой клиенты могут создавать решения в точном соответствии с их задачами.

Ячейка 3DQI предназначена для автономных испытательных станций, а ее модульность позволяет настраивать или расширять станцию в зависимости от потребностей бизнеса. Используя один трехмерный оптический датчик белого света для сканирования миллионов 3D-точек за кадр, можно создать подробную цифровую модель тестируемой детали и сравнить ее с исходным чертежом САПР. Это происходит в 10 раз быстрее, чем в случае применения традиционных координатно-измерительных машин.

Датчик может быть использован с любым роботом грузоподъемностью более 20 кг, и совместим с рядом роботов и поворотных сто-



лов, поэтому ограничений по размерам проверяемых деталей не существует.

Контрольный модуль 3DQI – новейшая разработка ABB, дополняющая FlexArc и FlexLoader в растущем портфеле интеллектуальных гибких решений компании.

Решение также обеспечивает комплексный анализ данных, обрабатываемых в режиме реального времени. Отчеты

в цифровой форме позволяют отслеживать данные, что требуется в некоторых отраслях, а также позволяют заказчикам адаптировать свои процессы, чтобы предотвратить сбои и повысить качество и производительность. Все оборудование включено в программный пакет RobotStudio Sidio Planner Power Pack от ABB для простого и интуитивно понятного программирования.