

Уже многие годы в автоматизированном машиностроительном проектировании (Mechanical CAD) доминируют технологии моделирования, основанные на фиксации всех действий в иерархическом дереве построений (часто такое моделирование называют параметрическим, что не совсем верно). Двадцать лет назад на рынок вышел основоположник этого направления – Pro/ENGINEER, затем появились и стали успешно развиваться такие пакеты, как SolidWorks, SolidEdge, Inventor и др. Несмотря на всю их популярность, в последнее время оживился интерес к альтернативным подходам. Всё чаще мы слышим о “чистой геометрии”, “прямом редактировании” и пр.

Предлагаемый вниманию читателей подробный обзор позволит глубже разобраться в базовых технологиях, применяемых в MCAD-системах, уточнить понятия и терминологию.

Азбука технологий моделирования в MCAD-системах

Часть I. Всё о дереве построений

Paul Hamilton (pHamilton@phusionengineering.com)

© 2007 Ash Bridge Media LLC

Paul Hamilton – президент и CEO американской компании PHusion Engineering Solutions LLC (www.phusionengineering.com), которая специализируется на повышении инновационного потенциала и продуктивности компаний-клиентов, помогая им в выборе, внедрении и интеграции CAD-, PDM- и PLM-инструментов и технологий, соответствующих направлению развития их бизнеса.

Около года назад активизировалась дискуссия о различиях между средствами CAD-моделирования, опирающимися на историю построений, и теми, где дерева построений нет. С точки зрения конструктора, такие разговоры временами кажутся неуместными: главное, быстрее завершить проект и перейти к выполнению следующего! Однако, если отвлечься от пристрастий пользователей, между этими двумя технологиями имеют место существенные различия, которые могут оказать значительное влияние на процессы разработки изделий. Выбор, сделанный в пользу моделирования с историей построений (или, наоборот, без оной), может существенно повлиять на многие этапы процесса разработки изделия, начиная с инновационных идей на начальном этапе и концептуального проектирования, вплоть до возможности повторного использования данных и интероперабельности. Этот выбор может сказаться даже на том, будет ли подготовленный проект существовать лишь в краткосрочной перспективе или же станет частью долгосрочной стратегии, охватывающей все этапы жизненного цикла изделия.

Существует множество терминов, для того чтобы охарактеризовать различные CAD-средства: моделирование на базе конструктивных элементов (*feature-based*), параметрическое (*parametric*), явное (*explicit*), булево (*Boolean*), гибридное (*hybrid*), прямое (*direct*), динамическое (*dynamic*)... Я часто замечал, что термины используются самым различным образом, что в устной речи, что в письменной. Некоторые термины, например, PLM, испытывают явные перегрузки. Поэтому давайте пропустим анализ различных толкований и сосредоточимся на

четырёх базовых понятиях, которые применяются для описания 3D-геометрии:

- 1 Octree;
- 2 Facet Modeling;
- 3 Constructive Solid Geometry (CSG);
- 4 Boundary Representation (B-Rep).

Все машиностроительные 3D CAD-системы сегодня базируются на таких технологиях. Обратимся к сетевой энциклопедии Wikipedia (en.wikipedia.org), которая даёт достаточно полные и точные их описания (к сожалению, в сокровищнице ru.wikipedia.org соответствующие статьи пока отсутствуют. – Прим. ред.).

1 **Octree** – *октадерево* (древовидная структура, создающаяся путем рекурсивного деления пространства на 8 одинаковых частей вплоть до достижения минимального размера – то есть, листа дерева). Такой метод предполагает, что крупное и сложное тело создается путем “скрепления” более мелких и простых 3D-тел. Информация хранится только для непустых частей, что экономит память. Хотя в 3D MCAD этот метод в настоящее время не используется, многие приложения для инженерного анализа и симуляции применяют Octree (или нечто подобное) для пространственного разбиения. Аналогичные методы служат для построения сеток (*mesh*) в приложениях для конечно-элементного анализа (*Finite Element Method – FEA*).

2 **Facet Modeling** (фасетное моделирование) обычно используется в 3D-графике, когда высокая точность не требуется – в 3D-играх, развлекательных приложениях, географических

системах, а также в системах формирования и обработки изображений. По этой причине собственно в *MCAD*-системах фасетное представление применения больше не находит. Исключение составляет визуализация, поскольку это функция графического процессора (видеокарты).

3 Constructive Solid Geometry (конструктивная блочная геометрия) описывает графические построения путем комбинирования геометрических *3D*-примитивов – сферы, куба, конуса, а также тел, описываемых квадратными и кубическими уравнениями. Когда-то эта технология была общепринятой в *MCAD*, однако сейчас сфера её распространения сокращается. Последними системами, в которых используется *CSG*, являются *I-deas* компании *SDRC* (технологии *SDRC*, перешедшие во владение компании *UGS*, нынешней *Siemens PLM Software*, теперь в той или иной степени интегрированы в систему *NX*. – *Прим. ред.*) и *CATIA*.

Проблемы “чистой” *CSG*-технологии заключаются в снижении точности при замене реальной геометрии примитивами, а также в ограниченности набора этих примитивов. Модели формируются путем применения к примитивам трех булевых операций: объединение (*union*), пересечение (*intersection*) и вычитание (*difference*).

Одна из составляющих *CSG*-технологии исправно служит и по сей день – “структура” или “дерево” примитивов, а соответствующие булевы операторы являются основой современных *CAD*-систем, базирующихся на истории построений.

4 Boundary Representation (граничное представление) в настоящее время является наиболее точным способом представления *3D*-геометрии и применяется во всех современных *MCAD*-системах. Первое коммерческое воплощение технология получила в геометрическом ядре под названием *Romulus*. В семидесятых–восьмидесятых годах на этом ядре базировалось несколько систем *3D*-моделирования – *Anvil*, *Graphtec*, *ME30* и *Unigraphics*. Многие из тех, кто помогал разрабатывать *Romulus*, позже создали ядро *ACIS*, которое широко используется во многих сегодняшних *3D*-системах. Кроме того, *Romulus* был и предшественником *Parasolid* – геометрического ядра, которое конкурирует с *ACIS*.

Моделирование *B-Rep* изначально предлагало повышенную точность, однако разработка и модификация моделей были достаточно сложным делом. Проектировщики зачастую искали выход в создании собственных базовых примитивов, а булевы операции с моделью выполняли даже для внесения простых изменений. Такой способ известен под названием *явное*

моделирование (explicit modeling). Процедура была довольно неприятной и трудоемкой, но в результате получалась очень устойчивая и точная модель.

Кроме четырех основных технологий *3D*-моделирования заслуживает упоминания еще одна. В первоначальной версии пакета *Pro/ENGINEER* компании *PTC* создание *CAD*-модели основывалось на комбинации *CSG* и *B-Rep*. Такая технология получила название **гибридной (Hybrid)**. К сожалению, этот термин применяется и для описания других аспектов *3D*-моделирования, что вносит определенную путаницу. В оригинальном виде технология *Hybrid* представляла собой комбинацию древовидной структуры *CSG*-технологии с примитивами *B-Rep*. Это дало возможность сочетать точность технологии *B-Rep* с гибкостью *CSG*, что стало гигантским шагом в развитии *MCAD*-систем.

Моделирование, основанное на истории построений

Чтобы быть точным, моделирование, опирающееся на историю построений (*History-Based Modeling*), следует называть гибридным (*Hybrid Modeling*). В настоящее время это наиболее общепринятая технология, применяемая в *MCAD*-системах. Часто и неправильно её называют *параметрическим моделированием (parametric modeling)*. Проблема здесь заключается в том, что параметрическое моделирование возможно как в *CAD*-системах, основанных на дереве построений, так и в тех, которые обходятся без него.

Перечислим основные признаки, характеризующие *Hybrid Modeling*:

- ✓ Термины структура (*structure*), порядок (*order*) и история (дерево) построений используются для описания дерева *CSG*. В большинстве систем имеется графический интерфейс для отображения этого дерева, который допускает несложные манипуляции с ним.

- ✓ Шаги или операции по созданию модели фиксируются в структуре дерева *CSG*.

- ✓ Понятия дерева построений или структуры подразумевают, что между элементами дерева (данными) имеют место взаимоотношения типа “родитель–потомок”, то есть, в структуру входят родительские (порождающие) и “дочерние” (порожденные) элементы. Такие взаимоотношения не имеют ничего общего с параметрикой – это неотъемлемое свойство технологии *CSG*.

- ✓ Последовательность операций в процессе моделирования опирается как на *2D*-эскиз, так и на объемные конструктивные элементы (КЭ), которые могут добавляться или удаляться из твердотельной модели.

- ✓ Размеры и геометрические взаимосвязи задаются, сохраняются и отслеживаются в дереве построений. Позже их можно модифицировать с целью изменения результирующей модели.

✓ Взаимодействие с моделью осуществляется на структурном уровне, а не на геометрическом.

✓ То, что вы видите, не всегда есть то, что вы получаете (*What You See Is not always What You Get* – противопоставление известному принципу построения пользовательского интерфейса *What You See Is What You Get*, или *WYSIWYG*. – *Прим. ред.*).

Моделирование без истории построений

Моделирование, не использующее историю построений, опирается на *B-Rep*. Эта технология являлась наиболее общепотребительной на ранних стадиях развития *MCAD*-систем. Граничное представление позволяет получить модели высокой точности без скрытых эффектов *CSG*-дерева.

Основные признаки, характеризующие моделирование без истории построений:

- ✓ Часто его называют явным, прямым или динамическим моделированием.
- ✓ Шаги создания модели не фиксируются.
- ✓ Внесение изменений не зависит от того, как создавалась модель.
- ✓ Изменение геометрии производится путем изменения граничных условий (*boundary conditions*) с применением булевых, локальных, а также частично определенных булевых операций.
- ✓ Взаимодействие с моделью идет на геометрическом уровне.
- ✓ Размеры и геометрические взаимосвязи могут задаваться и изменяться параметрически.
- ✓ То, что вы видите, есть то, что вы получаете (*WYSIWYG*).

Несмотря на существенные различия, и гибридное моделирование, и моделирование без истории построений основываются на булевой алгебре. В обоих случаях используется технология *B-Rep*, оба этих вида моделирования могут быть параметрическими. Ключевое их отличие заключается в фиксации шагов при создании элементов модели.

Сегодняшние системы моделирования, не опирающиеся на историю построений, представляют собой “накачаные” версии ранних продуктов, основанных на *B-Rep*. Благодаря применению развивающихся технологий, таких, как частично определенные булевы и локальные операции, моделирование *B-Rep* достигло впечатляющего уровня гибкости. Теперь в таких *CAD*-системах “границы” (*boundaries*) можно буксировать (*tug*) и тянуть на себя (*pull on*), чтобы изменить геометрию – то, что когда-то считалось невероятным. В системах, основанных на моделировании без дерева построений теперь можно напрямую воздействовать на граничное представление модели, как будто это кусок глины. Поэтому и возник термин “прямое моделирование” (*direct modeling*). Кроме

того, современная технология *B-Rep* позволяет вводить взаимосвязь граничных условий и грани модели; при этом поддерживаются тангенциальность (*tangency*), оффсет (*offsets*) и совпадение (*coincidence*).

Сегодня на рынке присутствуют две известные *CAD*-системы без дерева построений – *OneSpace Modeling* от компании *CoCreate Software, Inc.* (www.cocreate.com) и *KeyCreator* от компании *Kubotek USA, Inc.* (www.cadkey.com). К этому же классу относится выпущенная в начале 2007 года система *SpaceClaim* (www.spaceclaim.com).

Наиболее развитым функционалом обладает система *OneSpace*, которая для *3D*-моделей на уровне деталей и сборок предлагает возможности задания размеров, допусков и параметрического определения величин; параметры при этом могут описываться с помощью уравнений. В *SpaceClaim* имеется интересный метод задания геометрических взаимосвязей “на лету”.

Есть несколько систем на основе дерева построений (то есть, поддерживающих гибридное моделирование в его исконном значении), которые одновременно предлагают инструменты прямого моделирования. В их число входит и *NX* от *Siemens PLM Software* (бывшая *UGS*). Некоторые поставщики и пользователи называют такие *CAD*-системы “гибридными”, поскольку в них сочетаются возможности систем моделирования с историей построения и без нее. Прямое моделирование – в контексте систем с деревом построений – относится к способности осуществлять динамические манипуляции с примитивами (конструктивными элементами) модели. Обычно изменения в примитивы вносятся или через *2D*-эскиз, или путем корректирования размеров. При расширении функционала системы с деревом построений путем присоединения команд прямого моделирования у конструктора появляется еще один способ изменения примитивов. Следует иметь в виду, что в качестве примитива может рассматриваться и ординарный цилиндр, и сложная деталь как целое.

Пожалуйста, помните, что самое существенное различие между двумя технологиями состоит в наличии или отсутствии взаимоотношений типа “родитель–потомок” между элементами. Другими словами, использует ли *CAD*-моделлер структурированное дерево построений или нет. Несмотря на кажущуюся простоту, этот факт имеет громадное влияние на процессы, процедуры и получающуюся в результате среду проектирования.

Взаимоотношения типа “родитель–потомок” между элементами, образующими структуру данных, будут более подробно рассмотрены во второй части статьи. ☞

(Продолжение следует)