

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ЛОПАТОК ОСЕВЫХ ТУРБОМАШИН

© 2006 И.Б. Дмитриева, В.А. Камынин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрена проблема построения трёхмерных лопаток турбомашин и способ формализованного описания структуры лопатки. Предложена методика автоматизированного построения трёхмерных моделей лопаток турбомашин в среде CAD/CAE/CAM систем.

Благодаря высокой эффективности преобразования энергии, относительно малым размерам и массе осевые турбомшины (компрессоры и турбины) широко используются в качестве основных узлов авиационных двигателей и энергетических установок различного назначения. Самыми массовыми и наиболее сложными деталями турбомашин являются лопатки (рис. 1).



Рис. 1. Турбинная (а) и компрессорная (б) лопатки

В настоящее время уже не вызывает сомнений необходимость использования пространственных моделей деталей для проектирования и производства изделий. Это в полной мере относится к рассматриваемым в данной статье объектам – лопаткам турбомашин.

Для моделирования широко используются инструментальные средства – CAD/CAE/CAM системы (Unigraphics, CATIA и др.). Построение моделей выполняется здесь в диалоговом режиме и поэтому чревато субъективными ошибками, трудоёмко, продолжительно. Это делает невозможным итерационное построение и использование моделей на промежуточных этапах проектирования, тогда как автоматизированное построение модели позволит

передавать данные об объекте в системы прочностного и газодинамического анализа в реальном времени проектирования, значительно сократит сроки формирования модели окончательного варианта конструкции. Таким образом, создание средств автоматизации формирования моделей лопаток и функциональных элементов (ФЭ) проточной части турбомашин является актуальной задачей автоматизации технической подготовки производства авиационных двигателей и энергетических установок различного назначения.

В данной статье описан новый способ формализованного представления облика объектов, основанный на выделении структурных элементов и их характеризующих контуров и обеспечивающий автоматизацию построения геометрических моделей объектов.

Для принятия обоснованных решений в процессе проектирования лопаток выделены следующие функциональные элементы проточных частей турбомашин: *лопаточный венец (ЛВ)* как совокупность профильных частей лопаток рабочего колеса или неподвижного аппарата; *устройство крепления (УК)* как взаимосвязанная совокупность хвостовиков лопаток и ответной части ротора или статора; *полочный бандаж (БЖ)* как совокупностью бандажных полок.

Поскольку процесс формирования геометрических моделей дополняет процесс проектирования выделенных объектов, то объектами моделирования в данной работе являются перечисленные ФЭ машин и их детали – лопатки. Впредь под моделями лопаток турбомашин (МЛТ) будут пониматься как модели самих лопаток, так и модели ФЭ.

В отраслевой научно - исследовательской лаборатории № 18 (ОНИЛ-18) СГАУ

разработаны *интегрированные* САПР (ИСАПР) лопаток. Их назначение – автоматизированное формирование, оптимизация, документирование и корректирование конструкций лопаток. Процесс проектирования лопаток в общем случае разбивается на следующие этапы: проектирование ЛВ, проектирование БЖ, формирование прочной части (ПЧ), проектирование УК, формирование конструкции лопатки (КЛ). На основе спроектированных ФЭ формируется конструкция элементов лопатки: пера, хвостовика, бандажной полки. Объединение этих элементов позволяет получить обоснованную конструкцию всей лопатки.

Структура ИСАПР лопаток соответствует перечисленным этапам и включает подсистемы: САПР ЛВ, САПР БЖ, САПР ПЧ, САПР УК, САПР КЛ.

Возникает задача создания связи между системами проектирования лопаток и CAD/CAE/CAM средой создания двигателей.

На рис. 2 представлена схема предлагаемой организации процесса автоматизированного проектирования и производства лопаток в гетерогенной среде: частично в ИСАПР лопаток, частично – в CAD/CAE/CAM системе.

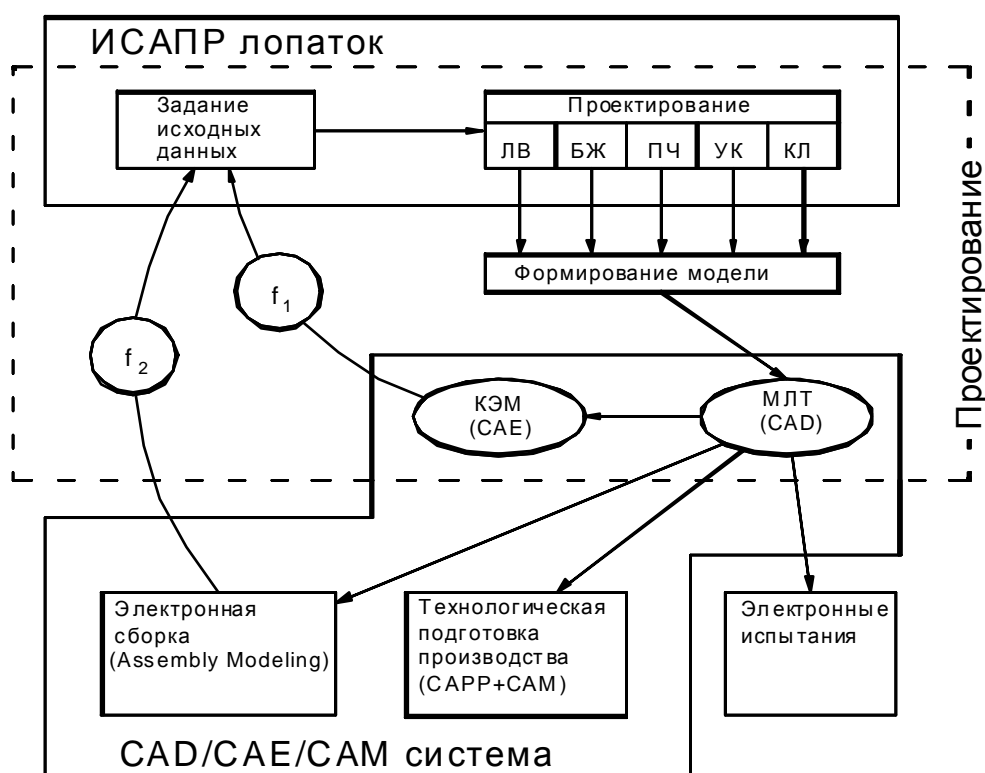


Рис.2. Схема автоматизированного проектирования лопаток в гетерогенной среде

Связь между этими системами осуществляется через формирование пространственных моделей (ПМ). После проектирования ЛВ, БЖ, ПЧ, УК происходит построение соответствующих моделей ФЭ. Формирование модели лопатки завершает работу САПР КЛ. Как отражено на схеме, ПМ объекта может быть использована в различных аспектах. Во-первых, её наличие упрощает построение конечно-элементной модели (КЭМ) для осуществления прочностного и газодинамического анализа методом конечных элементов в CAE системах (ANSYS, Star-SD и др.). В результате такого анализа может возникнуть необходи-

мость изменения структуры или параметров проектируемых ФЭ. Эта ситуация отражена на схеме стрелкой обратной связи через функцию принятия решения $f1$. Во-вторых, модель лопатки участвует в электронной сборке изделия, в результате чего также может возникнуть необходимость корректировки конструкции лопатки. Эта ситуация отражена на схеме стрелкой $f2$. В-третьих, модель лопатки в составе двигателя может подвергаться испытаниям на специальных электронных стендах. В-четвёртых, модель лопатки передаётся в системы технологической подготовки производства.

Неформализованным моментом в приведённой схеме и поэтому сдерживающим реализацию полностью автоматизированного процесса создания лопатки является построение геометрических моделей. Для автоматизации этого процесса был выполнен ряд задач:

- проведён анализ структуры лопаток и ФЭ проточной части турбомашин;
- на основе анализа создана концепция формального описания геометрии лопаток и ФЭ в виде так называемого кода структуры объекта (КСО) и правил его построения;
- разработана математическая модель процесса построения пространственных моделей лопаток и функциональных элементов;
- разработаны алгоритмы решения задач трансляции входного языка, эквивалентных преобразований и интерпретации КСО при построении модели;
- создана подсистема формирования пространственных моделей в составе ИСАПР компрессорных и турбинных лопаток.

Кроме этого потребовалось провести анализ инструментария построения твёрдых тел (солидов) для ряда существующих CAD/CAE/CAM систем. В результате выделены три типа твёрдотельных объектов (примитивов): базовые (канонические и базирующиеся на контурах), комплексные (базирующиеся на поверхностях), контекстуальные (базирующиеся на солидах).

В качестве операций синтеза использованы теоретико-множественные операции над примитивами: объединения, пересечения (рис. 3, а - до, б - после операции пересечения) и вычитания (рис. 3, в - до, г - после операции вычитания).

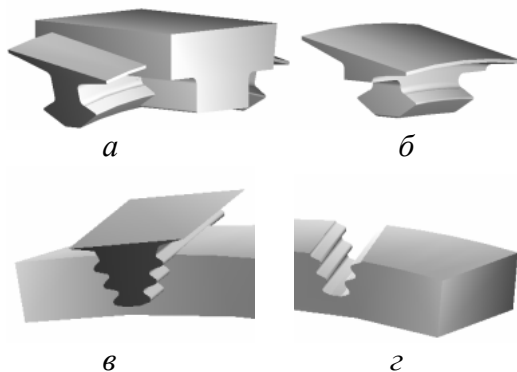


Рис. 3. К описанию операций над твёрдотельными примитивами

Процесс синтеза объектов из заданных объёмных элементов можно однозначно описать конструктивным графом (КГ). В терминальных вершинах КГ указывают примитивы, из которых строят объект, а в нетерминальных - операции синтеза. Рёбра графа задают порядок выполнения операций и участвующие в них операнды (рис. 4).

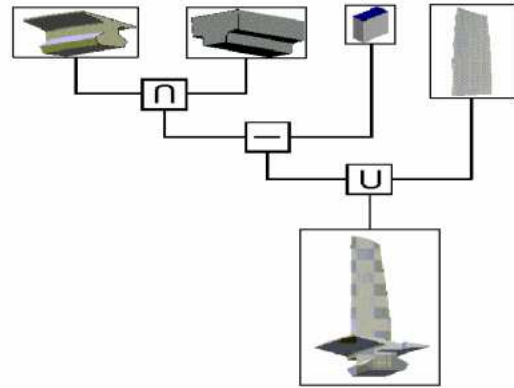


Рис. 4. Пример конструктивного графа

Конструкция лопатки анализируется с целью формирования её пространственного образа в виде совокупности объёмных элементов. Эта операция осуществляется на основе «мысленного» многоуровневого расчленения лопатки на более простые составные части до тех пор, пока не будут получены элементы, дальнейшая декомпозиция которых не требуется с точки зрения задачи построения твёрдотельных элементов (солидов). Такие элементы названы *структурными*.

Введено понятие *характеризующего* или *собственного* контура, заданным движением которого и образуется данный твёрдотельный объект. В случае невозможности построения структурного элемента с использованием единственного собственного контура необходимо использовать два характеризующих контура, расположенных в пересекающихся плоскостях. Каждый контур образует свой солид, названный *промежуточным*, а результат их пересечения (модель данного элемента) *окончательным* солидом (см. рис. 3, а и б). Введены отрицательные элементы, которые при вхождении в объект вычитаются из него. Если они являются принадлежностью полки, замковой части хвостовика либо бан-

дажной полки, то они отнесены к элементам второго уровня (см. рис. 3, в и г) и названы *выборками* или *облегчениями*. Для общности введены *дополнения* – элементы второго уровня, которые объединяются с какой-либо основной частью модели объекта.

У неохлаждаемых лопаток сплошное перо представляет собой единый элемент объёма, не имеющий структуры. Модель пера лопатки создаётся с использованием технологии построения поверхностей. Для описания поверхности пера обычно применяют математическую модель, состоящую из 4-х дважды дифференцируемых сплайн-функций: $Y_c = S_c(x, z)$ - поверхность спинки; $Y_k = S_k(x, z)$ - поверхность корытца; $Y_1 = S_1(x, z)$ - поверхность входной кромки; $Y_2 = S_2(x, z)$ - поверхность выходной кромки (рис.5).

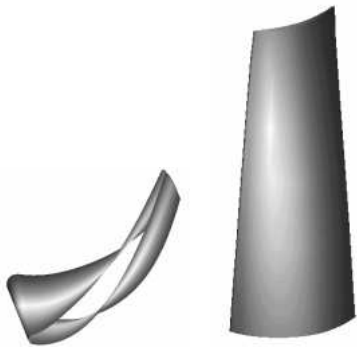


Рис. 5. Поверхность пера лопатки

Такое описание универсально и годится для построения геометрической модели поверхности пера любой лопатки. Сплошная модель получается преобразованием замкнутого объёма в твёрдое тело.

В результате проведения анализа установлены структурные элементы МЛТ: бандажная полка представляет собой единый элемент; хвостовик разделяется на замковую часть, ножку, полку; ответная часть диска состоит из фрагмента диска и паза для вставки замковой части хвостовика. Элементы могут иметь выборки и дополнения. Создан банк структурных элементов лопаток и ФЭ. Для описания элемента при включении в базовый набор определяется тип его группы: является ли он бандажной полкой, замковой частью и т.д. Также задаются номер в группе, способ вхождения в объект, наименование, количество промежуточных солидов, операции

над ними, их имена, ориентация рабочей плоскости характеризующих контуров, способ их движения, параметры, список размеров. Создаётся пиктограмма с его изображением. Эта информация заносится в банк, после чего элемент считается описанным и может участвовать в генерации модели.

Описание формы каждой конкретной лопатки или ФЭ заключается в указании типов его структурных элементов, записанных в регулярной форме, названной *кодом структуры объекта* (КСО). Так, лопатка на рис. 1, б, состоит из пера и хвостовика, имеющего замковую часть второго типа, ножку второго типа, полку третьего типа с выборкой первого типа, т.е. КСО = (E)(32)(H2)(P3 (- 1)).

При создании математической модели задача построения МЛТ в среде некоторой CAD/CAE/CAM системы рассматривается в виде иерархической трёхуровневой структуры.

Верхний уровень – построение модели объекта из структурных элементов.

Полное множество элементов МЛТ описанных типов $S^H = \{s_{nep}, s_1, \dots, s_p, \dots, s_N\}$, где s_{nep} - структурный элемент «перо», s_i - все остальные структурные элементы МЛТ описанных типов. Задача заключается в том, чтобы сформировать из элементов множества S^H подмножество S_M , такое, чтобы совокупность элементов подмножества образовала в целом модель лопатки или ФЭ. $S_M = \{s_{nep}, s^1, s^2, \dots, s^K\}$, где s_{nep} - элемент «перо», s^j - структурные элементы заданного объекта, K - количество структурных элементов заданного объекта, исключая перо.

Введены множества

$$E = \{s_{nep}\},$$

$$S = S^H \setminus E, \text{ т.е. } S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_N\}.$$

Множество S состоит из элементов, однородных с точки зрения их построения. Для решения поставленной задачи рассмотрено отношение на множестве S «принадлежать к одному типу». Введена сопряжённая с этим отношением некоторая система множеств \bar{S} на множестве S , которая является нетривиальным его разбиением. Поскольку разбиение \bar{S} сопряжено с отношением «быть одного типа» на множестве S , то

\bar{S} состоит из следующих классов: $\bar{S} = \{Z, N, P, B, FD, ZD, PD, O, D\}$. Здесь $Z, N, P, B, FD, ZD, PD, O, D$ - подмножества замковых частей, ножек, полок хвостовиков, бандажных полок, фрагментов ответной части диска, пазов замковой и периферийной части диска, облегчений (выборок), дополнительных соответственно.

Подмножество всех хвостовиков определяется как декартово произведение $Hv = Z^* \times H^* \times P^*$, где $Z^* = Z \times O \times D$, $H^* = H \times O \times D$, $P^* = P \times O \times D$ - множества замковых частей, ножек, полок хвостовиков соответственно. Подмножество всех бандажных полок определяется как $BP = B \times D \times O$, подмножество всех ответных частей диска - как $OD = FD \times PZ \cdot PP$, подмножество всех лопаток - как $L = Hv \times BP \times E$.

Средний уровень иерархии – построение структурных элементов МЛТ.

Каждый структурный элемент множества S является результатом пересечения двух промежуточных солидов $s_i = s_i^1 \cap s_i^2$, где s_i^1, s_i^2 - промежуточные солиды i -ого структурного элемента. В некоторых частных случаях s_i^1 или s_i^2 может быть универсальным множеством E в геометрическом смысле, но не оба сразу. Таким образом, S является совокупностью пересекающихся пар множеств.

$S = \{s_1^1 \cap s_1^2, s_2^1 \cap s_2^2, \dots, s_i^1 \cap s_i^2, \dots, s_N^1 \cap s_N^2\}$. Каждый элемент s_i^k описывается четвёркой $\langle SK, PP, K, D \rangle$.

SK - система координат, задаётся цепочкой преобразований относительно базовой SK . Операции преобразования: $Mov(x, y, z)$ - перемещение начала SK в заданную точку, где x, y, z - координаты начала новой SK относительно старой, $Rot(Ax, An)$ - поворот SK вокруг заданной оси на определённый угол, где Ax - ось поворота, An - угол поворота. Цепочка может быть пустой.

PP - рабочая плоскость текущей SK : XY, XZ или YZ .

K - определяющий контур.

$K = \{t_i\}$, $i = 1, NK$, причём $t_i = \langle x, y, r \rangle$, где x, y - координаты опорной точки контура, r - радиус в этой точке, NK - количество вершин контура

D - движение контура, задаётся типом (прямолинейное по вектору для построения призмы или по окружности для тела вращения) и параметрами.

Нижний уровень иерархии – построение плоских контуров.

Контур строится из элементов двух множеств O и D . O - множество отрезков, параметры которых - четвёрка чисел $\langle x_H, y_H, x_K, y_K \rangle$, где x_H, y_H - координаты начала отрезка, x_K, y_K - координаты конца отрезка. D - множество дуг. Геометрические параметры дуг - пятёрка чисел $\langle x_H, y_H, an, x_K, y_K \rangle$, где x_H, y_H - координаты начальной точки дуги, x_K, y_K - координаты её конечной точки, an - угол раствора дуги, причём знак (+ или -) определяет направление дуги.

Языковое обеспечение автоматизированного формирования МЛП состоит из языков описания объектов (ЯОО) и описания элементов (ЯОЭ). На ЯОЭ происходит описание элементов при занесении их в базу. Элемент задаётся словами десяти типов, соответствующих параметрам его описания. Информация об элементе вводится в базу отдельными полями, и процесс трансляции распадается на множество процедур, имеющих автоматные грамматики.

ЯОО - это входной проблемно-ориентированный язык, служащий для структурирования данных о лопатке и функциональных элементах и ввода их в систему. Задание формы объекта происходит с помощью пиктограмм. Просматривая пиктограммы с изображениями различных типов структурных элементов, пользователь выбирает типы, соответствующие описываемому объекту. Для описания ЯОО создана порождающая А - грамматика.

Создание моделей лопаток турбомашин в САПР ПМ выполняется по схеме, представленной на рис. 6.

Преобразования одного вида информации в другой происходят с помощью транслятора, функционального преобразователя (ФП) и интерпретатора.

Чтобы преобразовать вид входных данных, соответствующий человеческому восприятию, к внутрисистемному, служит разработанный транслятор. Он формирует КСО и заполняет системные таблицы 1

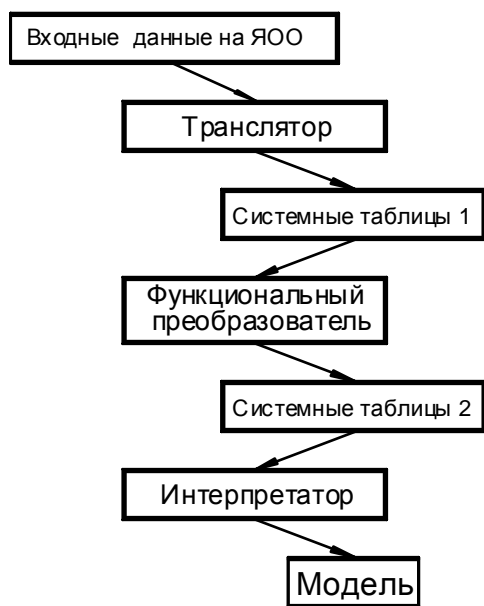


Рис. 6. Схема создания МЛТ в САПМ

(СТ1) на основе данных, которые поступают на вход подсистемы. Процесс трансляции совмещён с процессом описания структуры лопатки. СТ1 хранят КСО и размеры для построения структурных элементов. Транслятор состоит из лексического, синтаксического анализаторов (проверяется правильность слов и предложений) и семантического (заполнение системных таблиц).

Разработанный ФП представляет собой комплекс программ на языке Delphi (CAD-независимая часть). Он преобразует выходную информацию транслятора в конструктивный граф описания объекта. Результат работы ФП помещаются в системные таблицы 2 (см. рис. 6) в виде автоматически созданных программ. Эти программы написаны на специально разработанном языке описания процесса построения модели. Высказывания языка позволяют описать эволюции системы координат, назначение рабочей плоскости, построение контуров,

операции над контурами (выдавливание, вращение, протягивание), операции над твёрдотельными объектами (пересечение, вычитание, объединение, подрезка плоскостью или поверхностью).

Интерпретатор (CAD-зависимая часть) представляет собой комплекс программ для перевода описания процесса построения модели со специфического языка на язык конкретной CAD системы (CAD – зависимая часть). Выполнение полученной в результате трансляции программы в среде заданной CAD системы повлечёт построение трехмерной модели описанного на входном языке объекта.

Разработанная информационная технология позволяет осуществить новый подход к решению задачи создания комплекса программ для формирования геометрических моделей лопаток. Процесс построения модели представляется в данной работе как совокупность программ, выполнение которых в CAD среде воссоздаёт облик объекта. Эти программы формируются автоматически, что свидетельствует о том, что фактически создана CASE-технология для построения геометрических моделей лопаток и ФЭ проточных частей турбомашин.

Разработанная система включена в созданные коллективом ОНИЛ-18 СГАУ интегрированные САПР компрессорных и турбинных лопаток, внедрённые на промышленных предприятиях. Созданные с помощью системы модели использовались при конечно-элементном анализе хвостовиков лопаток на прочность, при конструкторской проработке лопаток, при разработке оснащения заготовительного производства.

COMPUTER-AIDED MODEL CONSTRUCTION OF TURBOMACHINE BLADES

© 2006 I.B. Dmitrieva, V.A. Kamynin

Samara State Aerospace University

We consider a problem of constructing three-dimensional turbomachine blades and a method of the formalized description of a blade structure. We suggest a technique for computer-aided construction of three-dimensional turbomachine blades in the CAD/CAE/CAM system environment.