

**А. В. Щёкин**, зав. НИЛ, e-mail: schekin@inbox.ru,  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
имени Н. П. Огарева, г. Саранск

## Конструкторско-технологическая параметризация в составе интегрированной САМ-системы

*Приведен подход к программной организации конструкторско-технологической параметризации в области САМ (Computer-Aided Manufacturing). Подход основан на принципе многоуровневой параметризации и включает в себя наборы переменных, организованных на пяти уровнях иерархии: параметры конструкторской модели, параметры плана обработки, параметры инструментальных переходов, параметры конструкторско-технологических элементов (КТЭ), параметры инструкций управляющей программы. Иерархическая структура переменных позволяет обеспечить сквозную параметризацию и ассоциативность управляющей программы и предоставить единый набор параметров для задач, решаемых технологами при моделировании обработки в САМ-системе. Подсистема параметризации программно реализована в составе коммерческого САМ-приложения "Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка", интегрированного в САД-платформу КОМПАС-3D. Приведены примеры использования параметризации для расчета режимов резания, создания пользовательской траектории трехкоординатного фрезерования и разработки постпроцессора.*

**Ключевые слова:** параметризация, САД/САМ-система, КОМПАС-3D, управляющая программа, 3D-модель, КТЭ, API (Application Program Interface)

### Введение

К разряду технологических САПР относятся системы технологической подготовки производства (САПР ТП) и автоматизированной генерации управляющих программ для станков с ЧПУ (САМ-системы). Использование в составе технологических САПР возможностей конструкторско-технологической параметризации дает пользователям этих систем дополнительные средства для автоматизации технологического проектирования. Технологическая параметризация похожа на геометрическую параметризацию, реализованную в большинстве систем конструкторского моделирования. Если посредством геометрической параметризации при изменении значений входных параметров перестраивается сама геометрическая модель, то технологическая параметризация приводит к автоматическому изменению числовых параметров технологического процесса.

Необходимость развития методов параметризации в технологических САПР связана тем, что существующие способы передачи инфор-

мации в САД/САМ-системах не обеспечивают достаточно глубокой интеграции данных, параметрические модели не позволяют исключить дублирование информации на разных этапах подготовки производства, параметры САПР используются хаотично, что создает несогласованность в использовании переменных и снижает надежность параметрических моделей.

Конструкторско-технологическая параметризация является числовой, так как она связывает числовые значения конструкторских и технологических параметров. Но ее использование невозможно без геометрической параметризации, которая при изменении значений управляемых параметров обеспечивает автоматическое перестроение геометрии модели и последующую актуализацию технологического процесса.

Разработке и исследованию методов геометрической параметризации посвящено много работ. Параметрический метод впервые встречается в трудах советского ученого Н. Ф. Четверухина [1, 2]. Его учеником В. С. Полозовым сформулированы базовые понятия теории па-

раметризации и разработаны теоретические основы моделирования в САПР с применением геометрических переменных [3]. Значительный вклад в развитие теории параметризации геометрических объектов внесли представители Нижегородской школы начертательной геометрии и компьютерной графики С. И. Ротков, И. И. Котов, Н. Н. Рыжов и их ученики [4–6]. Группой ученых из ЛЭТИ (Санкт-Петербург) под руководством Ю. Т. Лячека разработан аналитико-синтетический метод параметризации технических чертежей на основе адаптивных сеточных моделей [7–10]. Разработке и развитию вариационных методов параметризации посвящены работы Н. Н. Голованова, А. Г. Ершова, П. А. Копорушкина, В. В. Ермилова [11–15]; из западных исследователей наиболее известны две группы под руководством Джона Оуэна [16, 17] и Хоффманна [18, 19].

Одной геометрической параметризации недостаточно для технологической подготовки производства, поскольку она не учитывает технологические свойства изделия, необходимые для его изготовления. Логическим развитием геометрической параметризации является технологическая параметризация, реализованная в разной степени во многих САПР ТП. Вариант создания системы технологической параметризации на основе параметрических возможностей T-Flex CAD и САПР ТП "СИТЕП" [20] представлен в диссертации [21]. В этой работе запрограммированы расчетные модули для определения исходных параметров заготовки, режимов резания, межпереходных размеров и прочих параметров технологического процесса. Модули представляют собой наборы информационных связей в виде формул и иных зависимостей (в том числе SQL-запросов к базам данных) между параметрами конструкторского чертежа и параметрами технологической документации. Недостатком указанных модулей является игнорирование 3D-модели и ориентация на параметрический чертеж детали как источник конструкторской информации. В статье [22] приведен пример создания параметризованной модели комплексной детали для проектирования группового технологического процесса в САПР ТП "T-Flex. Технология", но при этом используется только геометрическая параметризация для получения размерных модификаций комплексной детали.

Таким образом, анализ литературы показывает, что технологическая параметризация традиционно рассматривается в контексте разработки технологических процессов в САПР

ТП, где информационные связи между переменными используются главным образом для заполнения шаблонов технологической документации. При моделировании обработки в САМ-системе перед технологами возникают аналогичные задачи (подбор заготовки, расчет режимов резания и т. д.), но главная цель САМ-системы — это генерация управляющих программ для станков с ЧПУ. При этом САМ-системы решают такие специфические задачи, как постпроцессирование и верификация траекторий. Создание системы сквозной параметризации для задач в области САМ дает дополнительные возможности для автоматизации подготовки управляющих программ.

### **1. Многоуровневая технологическая параметризация**

Термин "многоуровневая параметризация" впервые был использован в диссертации Е. С. Ермакова [6] в контексте конструирования изделий с иерархической структурой. Этому понятию Ермаков дал следующее определение: "под многоуровневой параметризацией будем понимать параметризацию объекта, имеющего иерархическую древовидную структуру, в рамках которой каждый элемент описывается определенным числом параметров, а геометрические и негеометрические условия, задаваемые при объединении элементов в узел или сборочную единицу, позволяют формировать набор параметров данного узла или сборочной единицы". Очевидным образом понятие "многоуровневая параметризация" применимо к любым объектам с иерархической структурой, в том числе и для технологических процессов механической обработки на станках с ЧПУ.

В контексте задач, решаемых технологами при моделировании обработки в САМ-системе, можно выделить пять уровней переменных (рис. 1):

- параметры обрабатываемой детали;
- параметры плана обработки;
- параметры инструментальных переходов (ИП);
- параметры конструкторско-технологических элементов (КТЭ);
- параметры инструкций управляющей программы (УП).

В состав параметров САМ-системы могут входить как внутренние переменные САМ-системы, так и внешние параметры обрабатываемой детали и режущих инструментов. Для реализации доступа к внешним перемен-

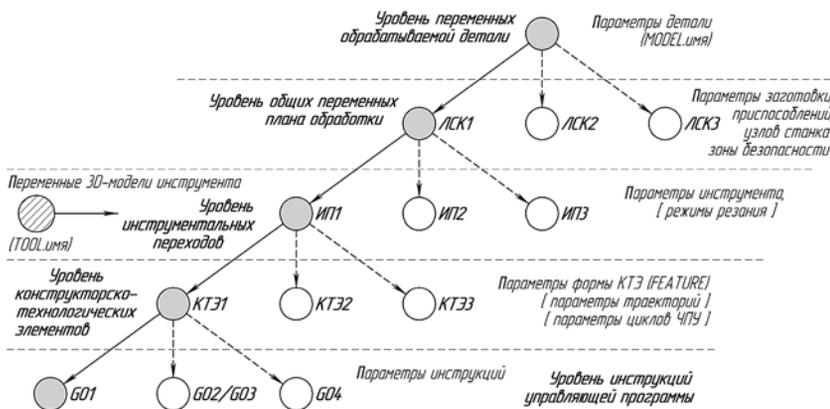


Рис. 1. Иерархия параметров САМ-системы

ным будем использовать следующие ссылки: *MODEL.имя переменной* — для доступа к параметрам детали; *TOOL.имя переменной* — для доступа к переменным 3D-модели режущего инструмента.

Переменные могут быть изменяемыми, которым присваивается математическое выражение, и неизменяемыми (доступными только для чтения). На рис. 1 изменяемые переменные приведены в квадратных скобках.

Такое разбиение переменных на уровни обусловлено не только иерархичностью технологического процесса, но и тем обстоятельством, что параметры имеют свои области применения: переменные нижних уровней могут зависеть от переменных вышестоящих уровней, но при этом они недоступны на верхних уровнях. Параметризация без ограничений доступа к переменным способна запутать пользователя и создать сложные и трудно выявляемые рекурсивные зависимости. Такие зависимости, в свою очередь, могут приводить к закликиванию при решении некоторых задач или к неправильному построению траекторий обработки. Иерархия параметров позволяет избежать хаотичного использования переменных и разграничить области их применения наиболее простым и понятным способом.

Параметры обрабатываемой детали  $P_i$  в общем случае включают в себя свойства материала  $p_m$ , параметрические переменные 3D-модели  $p_p$  и аннотации 3D-модели (размеры, шероховатости и прочие атрибуты)  $p_a$ :

$$P_i = \{p_m, p_p, p_a\}.$$

Каждый следующий уровень иерархии описывается кортежем

$$\langle P_i, M_{i-1}, R_i \rangle, M_i \in \{P_i, M_{i-1}\}, i \in [2; 5], M_1 = P_1,$$

где  $P_i$  — множество параметров уровня  $i$ ;  $M_{i-1}$  — множество параметров предыдущих уровней (являются постоянными для решения задач  $i$ -го уровня);  $R_i$  — множество связей (отношений) между параметрами на  $i$ -м уровне.

Рассмотрим каждый уровень иерархии более подробно.

▲ **Уровень переменных конструкторской модели.** В общем случае под конструкторской моделью можно рассматривать как 3D-модель обрабатываемой детали, так и ее чертеж или сборку. Как правило, САМ-

системы чаще всего работают с 3D-моделями. Как в САПР ТП, так и в САМ-системах параметры конструкторской модели могут быть получены различными способами. Например, в работе [23] описаны пять групп методов преобразования конструкторской информации к виду, пригодному для использования в САПР ТП: "непосредственное кодирование таблиц с чертежа; ...на основе унификации деталей; идентификация поверхностей и КТЭ на основе использования OLE или API функций; установление свойств поверхностей на основе диалога; использование универсальных методов группирования чертежных элементов в классы при обработке геометрических форматов".

В работе [24] сравниваются три технологии интеграции прикладного программного обеспечения с системой AutoCAD: на основе обмена данными в формате DXF, COM-технология и программный интерфейс.NET API. Эти технологии также могут использоваться для получения исходных параметров обрабатываемой детали. API является наиболее функциональным и производительным способом анализа конструкторской модели для CAD/CAM-систем, построенных на базе единой CAD- платформы.

▲ **Уровень переменных плана обработки.** Процесс обработки детали в целом может включать в себя несколько планов обработки для различных операций (станков), установов и систем координат. К параметрическим переменным, общим для всей последовательности инструментальных переходов, будем относить: параметры заготовки, приспособлений, узлов станка, зоны безопасности. К ним можно отнести также общие параметры таблицы инструментов, например число позиций.

▲ **Уровень переменных инструментального перехода.** В план обработки входит последовательность инструментальных переходов. К пере-

менным инструментального перехода относят параметры инструмента и режимы резания. В рассматриваемой САМ-системе параметры инструмента хранятся в его 3D-модели и извлекаются из модели через API-интерфейс. Переменные инструментального перехода являются закрытыми (недоступными) для других переходов. Они действуют только в пределах данного перехода, могут влиять на переменные нижних уровней и при этом зависят от общих переменных плана обработки и внешних переменных конструкторской модели. Один и тот же инструмент может работать на нескольких переходах, но параметры инструмента по ссылке TOOL.имя переменной доступны только в пределах текущего перехода.

▲ **Уровень переменных КТЭ.** Конструкторско-технологический элемент (КТЭ) является одним из базовых понятий в современных САМ-системах. В иностранной литературе понятие КТЭ соответствует термин *manufacturing features* [25]. КТЭ является связующим звеном при передаче геометрической информации между САД- и САМ-системами. В пределах одного инструментального перехода может быть обработано несколько КТЭ, и в общем случае параметры стратегии для их обработки могут различаться.

Параметры КТЭ можно разделить на две группы. Первая группа — это параметры формы и расположения КТЭ. Вторая группа — параметры траектории (способы удаления материала, глубины резания, припуски на чистовую обработку, режимы резания и т. д.). Иными словами, КТЭ включает в себя геометрию (*feature*) и траекторию обработки применительно к данной геометрии. Многие системы ЧПУ поддерживают постоянные циклы, которые упрощают программирование однотипных элементов детали. Анализ постоянных циклов различных систем ЧПУ показывает, что параметры этих циклов также можно разделить на геометрические и технологические параметры.

▲ **Уровень переменных управляющей программы.** Управляющая программа для станка с ЧПУ в САМ-системах генерируется, как правило, за два этапа: сначала создается последовательность кодов для описания траектории в промежуточном формате, затем промежуточный код транслируется в формат системы ЧПУ с помощью постпроцессора. Промежуточный формат содержит набор инструкций для описания траектории и команд управления станком. Эти инструкции в свою очередь могут содержать наборы параметров. Например, инструк-

ция для смены инструмента (функция T) может содержать номер инструментальной позиции и номер корректора, инструкция для линейной интерполяции (G01) — координаты начальной и конечной точек, инструкции для круговой интерполяции (G02/03) — дополнительно координаты центра дуги и направление обхода.

Разделение параметров на пять уровней является универсальным, поскольку отражает иерархическую структуру и модульность процесса обработки на станках с ЧПУ. При этом состав переменных, их обозначения, способы построения редакторов математических выражений могут различаться в зависимости от конкретной программной реализации.

## 2. Программная реализация

Описанный выше подход к организации подсистемы конструкторско-технологической параметризации программно реализован в составе коммерческого САМ-приложения "Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка" [26] для платформы КОМПАС-3D. Приложение предназначено для автоматизации программирования 2,5- и 3-координатного фрезерования, поддерживает стратегии послойной обработки карманов на Z-уровнях, плоскостей, фрезерной доработки, фрезерования по контуру, 3-координатной обработки поверхностей сферическими фрезами и обработки отверстий. Более подробная информация о модулях САМ-системы представлена на сайте системы КОМПАС по ссылкам [26, 27] и в статьях [28, 29]. Средствами разработки САМ-системы являются Visual Studio C++, программный интерфейс API КОМПАС-3D и функции геометрического ядра C3D [30].

САМ-приложения полностью интегрированы в рабочее пространство КОМПАС-3D (рис. 2, см. вторую сторону обложки) и используют в качестве источника геометрической информации конструкторскую модель, созданную непосредственно в КОМПАС-3D или импортированную из другой САД-системы. Автоматически созданные траектории обработки ассоциативны с конструктивными элементами модели. Ассоциативность означает связь траектории с опорными элементами 3D-модели и автоматическое перестроение траектории при изменении положений или размеров опорных объектов [31]. В качестве опорных объектов могут использоваться грани и ребра модели или дополнительные построения (кривые, эскизы).

Конструкторско-технологическая параметризация в составе САМ-системы представлена отдельной подсистемой. Архитектура подсистемы параметризации обусловлена требованиями повторного использования кода и возможностью наращивания ее функционала в будущем. САМ-система для платформы КОМПАС-3D в целом развивается по модульному принципу, поэтому подсистема параметризации должна уметь обслуживать любые САМ-модули в составе САМ-системы. Исходя из этих требований разработана иерархия классов (рис. 3), которая включает в себя абстрактный класс Parameters и пять производных классов, соответствующих пяти уровням иерархии параметрических переменных.

Входом в подсистему параметризации является метод Calculate (член класса Parameters), который принимает на вход строку с математическим выражением и вычисляет его значение. Переменные в формулах можно связывать алгебраическими и тригонометрическими выражениями, в состав формул могут входить скобки и операторы сравнения. Одновременно с синтаксическим разбором метод Calculate выполняет лексический анализ и проверку переменных на циклическую зависимость.

Значения переменных извлекаются с помощью метода GetParameter, который в базовом

классе представляет собой чистую виртуальную функцию и переопределяется в производных классах. Ниже показан листинг реализации GetParameter для класса параметров КТЭ (через указатель owner обеспечивается доступ к параметрам верхних уровней). Функция GetParameter принимает на вход имя параметра и возвращает указатель на переменную типа double. Переменная pCycle содержит указатель на объект КТЭ, являющийся внутренним объектом САМ-модуля. Работа через указатели исключает дублирование подсистемой параметризации внутренних параметров САМ-модуля и обеспечивает получение актуальных значений параметров в любой момент времени. Нулевое значение указателя означает, что параметр не обнаружен по входному имени.

```
double* FeatureParams::GetParameter(char* s /*имя параметра*/)
{
    double* p = GetCycleParameter(s, pCycle);
    if(p == NULL && pFeature) p = pFeature->GetParameter(s);
    if(p == NULL && pTrajectory) p = pTrajectory->GetParameter(s);
    if(p == NULL && owner) p = owner->GetParameter(s);
    return p;
}
```

Класс ModelParams содержит параметры обрабатываемой детали. Экземпляр этого класса создается один раз в момент подключения САМ-приложения к системе КОМПАС-3D.

В начальный момент синхронизации плана обработки с внутренними данными 3D-модели вызывается функция GetModelParameters, которая считывает параметры конструкторской модели через программный интерфейс API.

Классы PlanParams (параметры плана), OperationParams (параметры инструментального перехода), FeatureParams (параметры КТЭ) и CodeParams (параметры инструкции УП) содержат указатели на внутренние объекты САМ-модуля (соответственно, pPlan\*, pOperation\*, pCycle\* и pCadre\*). Используя эти указатели, САМ-приложение возвращает адреса своих внутренних переменных. Таким образом, каждый САМ-модуль может возвращать собственный набор параметров. Состав переменных САМ-приложения "Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка" представлен в таблице.

Класс FeatureParams дополнительно содержит параметры формы

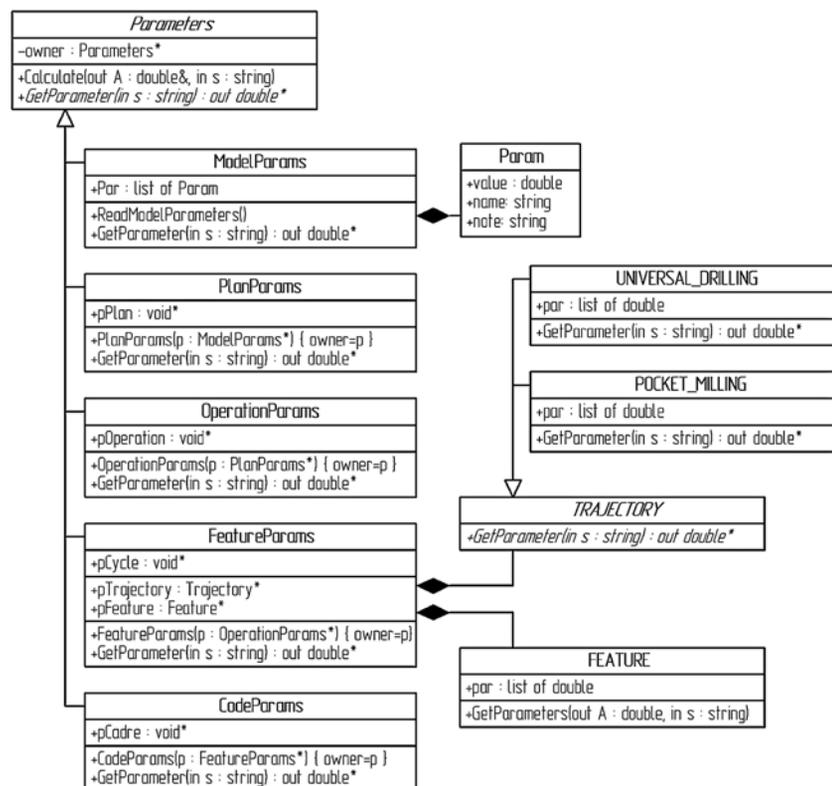


Рис. 3. Диаграмма классов подсистемы параметризации

**Параметры САМ-приложения  
"Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка"**

Переменные плана обработки (уровень 2)	<i>_STX1, _STY1, _STZ1</i> — первая точка габарита заготовки, <i>_STX2, _STY2, _STZ2</i> — вторая точка габарита заготовки, <i>_ZTOP</i> — плоскость отвода для смены инструмента, <i>_ZSAF</i> — положение плоскости безопасности по оси Z.
Переменные инструментального перехода (уровень 3)	<i>_TPOS</i> — номер позиции инструмента, <i>_DIAM</i> — диаметр инструмента с учетом износа, <i>_RCOR</i> — радиус коррекции инструмента ( $0,5 \cdot \text{DIAM}$ ), <i>_SPIN</i> — обороты при черновой обработке, <i>_FEED</i> — подача при черновой обработке, <i>_VREZ</i> — подвод по оси Z, <i>_SDIR</i> — направление вращения шпинделя.
Переменные КТЭ (уровень 4)	Параметры формы <i>FEATURE</i> фигурных циклов (рис. 4): <i>_FT, _FX, _FY, _FZ, _FD, _FL, _FW, _FH, _FA, _FB, _FR</i> . Параметры траектории <i>UNIVERSAL_DRILLING</i> <i>_DEPZ</i> — глубина сверления на первом проходе, <i>_CHIP</i> — способ удаления стружки, <i>_TOP</i> — пауза после вывода сверла между проходами, <i>_PBOT</i> — пауза на дне отверстия, <i>_GAPZ</i> — длина отвода между проходами, <i>_KOFZ</i> — коэффициент уменьшения глубины прохода, <i>_MDEP</i> — минимальная глубина сверления, <i>_FWRK</i> — подача при черновой обработке. Параметры фрезерной траектории <i>POCKET_MILLING</i> : <i>_VOLM</i> — объем обработки (черновая, чистовая), <i>_DEPZ</i> — максимальное расстояние между Z-уровнями, <i>_KOFR</i> — коэффициент перекрытия радиуса фрезы, <i>_CDIR</i> — направление обхода (попутное или встречное), <i>_FWRK</i> — подача при черновой обработке, <i>_BEGN</i> — начало траектории (от центра или от периферии), <i>_FINZ</i> — глубина чистовой обработки (глубина Z-уровня), <i>_USID</i> — припуск на чистовую обработку боковых сторон, <i>_UBOT</i> — припуск на чистовую обработку дна, <i>_FFIN</i> — подача при чистовой обработке, <i>_SFIN</i> — обороты при чистовой обработке, <i>_RADP</i> — радиус врезания в горизонтальной плоскости.
Переменные УП (уровень 5)	Общие: <i>X1, _Y1, _Z1, _X2, _Y2, _Z2, _T, _S, _F, _M345</i> . Параметры G02/G03: <i>_X0, _Y0, _Z0, _R, _CW</i> .

и параметры траектории. Смысл параметров формы поясняет рис. 4. Определено девять форм: одна форма для отверстий (идентификатор *HOLE*); четыре формы для обработки карманов (*POCKET\_RECT, POCKET\_CIRC, POCKET\_SLOT* и *POCKET\_CIRCSLOT*); четыре формы для обработки цапф (*FACE\_RECT, FACE\_CIRC, FACE\_SLOT, FACE\_CIRCSLOT*). Параметр *\_FT* содержит тип формы (его значение совпадает с идентификатором формы), параметры *\_FX, \_FY, \_FZ* задают координаты начальной точки формы (на рис. 4 начальные точки обозначены нулями), параметр *\_FH* задает глубину кармана или высоту цапфы. Параметры формы автоматически распознаются по геометрии 3D-модели и доступны только для чтения.

В САМ-приложении реализованы две обобщенные траектории для постоянных циклов систем ЧПУ: универсальная траектория для сверления *UNIVERSAL\_DRILLING* и траектория *POCKET\_MILLING* для фрезерования карманов по эквидистантной схеме.

На самом нижнем уровне иерархии находятся параметры инструкций УП. Каждая инструкция содержит номер позиции инструмента *\_T*, текущие значения режимов резания *\_S* и *\_F*, координаты начальной и конечной точки. Инструкции для круговых интерполяций (G02, G03) дополнительно содержат центр дуги, радиус *\_R* и направление обхода *\_CW*.

### 3. Примеры использования параметризации в САМ

На основе трех примеров (расчет режимов резания, создание пользовательской траектории и разработка подсистемы конструкторско-технологической параметризации в составе САМ-модуля для платформы КОМПАС-3D.

**Расчет режимов резания.** Режущие инструменты и приспособления

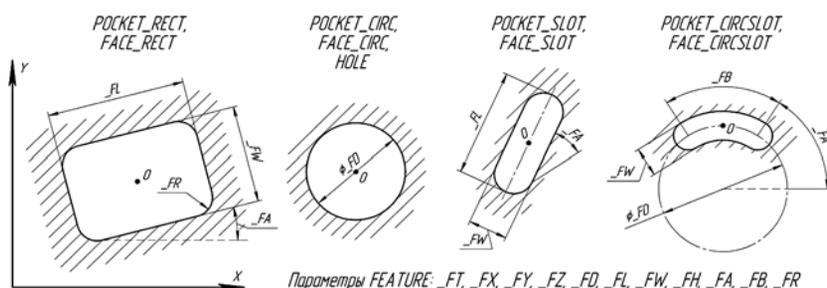


Рис. 4. Параметры формы фигурных циклов

в САМ-системе представляют собой параметризованные 3D-модели, которые управляются наборами входных параметров. При этом роль базы данных стандартных инструментов и приспособлений играет таблица переменных, встроенная непосредственно в 3D-модель. Управляемые параметры инструмента считываются из 3D-модели посредством API КОМПАС и доступны технологу для редактирования из САМ-приложения. Рассмотрим программирование расчета режимов резания на примере концевой фрезы тайваньской фирмы HGT серии EA.

Создадим параметризованную 3D-модель фрезы в системе КОМПАС (рис. 5. см. вторую сторону обложки). Стандартные размеры инструмента оформим в виде таблицы переменных в соответствии с данными из каталога HGT. Частота вращения шпинделя и скорость подачи по каталогу зависят от диаметра фрезы и твердости обрабатываемого материала *HRC*. Эти данные сгруппированы для трех значений твердости:  $\sim HRC30$ ,  $\sim HRC50$  и  $\sim HRC60$ .

В качестве исходных параметров для расчета режимов резания назначаем: твердость *HRC* и два дополнительных коэффициента  $KV_{cut}$  и  $KF$ , чтобы пользователь мог самостоятельно влиять на частоту вращения шпинделя и подачу. В качестве выходных параметров объявляем переменные *SPIN* (частота,  $\text{мин}^{-1}$ ), *FEED* (подача,  $\text{мм/мин}$ ) и скорость резания *VCUT* ( $\text{м/мин}$ ). Входные и выходные параметры связываем между собой математическими формулами.

Входной параметр *HRC* определим через одноименную переменную *HRC* обрабатываемой детали. Но поскольку в редакторе формул системы КОМПАС-3D мы не можем явно использовать переменные САМ-системы, то в САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка" реализована такая возможность: если в комментарии переменной встречается строка в фигурных скобках, то САМ-модуль распознает такую строку как математическое выражение и вычисляет его значение. Поэтому в комментарии к *HRC* пишем: "Твердость детали {MODEL.HRC}". Формулы в фигурных скобках вычисляются на уровне плана обработки до начала расчета параметров инструментальных переходов, поэтому в этих формулах можно использовать только переменные уровня плана обработки и обрабатываемой детали.

Чтобы применить алгоритм расчета, необходимо в САМ-модуле для инструментального перехода присвоить режимам резания выраже-

ния *TOOL.FEED* и *TOOL.SPIN* (на панели параметров, рис. 5). В формулах эти выражения присутствуют по умолчанию. Технологу остается только включить их использование. Для частоты вращения шпинделя рекомендуется использовать более универсальную формулу через скорость резания *TOOL.VCUT* как параметр, независимый от диаметра инструмента.

После выбора конструктором другого материала (с другим значением твердости *HRC*) режимы резания будут автоматически пересчитываться и попадать в управляющую программу. От технолога при этом требуется только заново сгенерировать управляющую программу и передать ее оператору станка с ЧПУ.

**Программирование траектории.** Штатных стратегий обработки, которые имеет в наличии САМ-система, может оказаться недостаточно для программирования траекторий. В таких случаях можно применить фрезерование по контуру и цикл копирования траектории. На рис. 6 (см. третью сторону обложки) показан пример чистовой обработки поверхности скругления концевой фрезой. Фреза должна многократно перемещаться вертикальными движениями вдоль поверхности с таким шагом, чтобы обеспечить заданный параметр чистоты обработки поверхности. Опорным объектом является эскиз в плоскости *YZ*, в котором построена проекция поверхности. При выборе эскиза строится однократная траектория, повторяющая кривую эскиза.

Чтобы создать многопроходную траекторию, вызываем цикл повтора контура. Диалог цикла выступает в качестве редактора переменных, в котором параметрам цикла можно присваивать математические выражения. Шаг по оси *X* определяем с учетом чистоты обработки (переменная *MODEL.C*). Для вычисления числа повторений по оси *X* длину обработки делим на шаг и округляем результат в большую сторону, при этом длину обработки выражаем через переменную детали *MODEL.A*, ассоциативно связанную с линейным размером на конструкторской модели. В результате получаем траекторию, которая автоматически перестраивается при изменении линейного размера и параметра чистоты обработки поверхности. Если технолог назначит другую фрезу, то шаг траектории автоматически изменится в соответствии с новым диаметром фрезы.

**Настройка постпроцессора.** Многообразие систем ЧПУ и их модификаций настолько велико, что требует открытого способа настройки постпроцессоров на стороне пользователей.

Применение специальных макросов и формул, связывающих параметрические переменные, позволяет сделать этот процесс простым и наглядным. Ниже показан фрагмент постпроцессора для системы ЧПУ FANUC.

```
ALPHABET(X, Y, Z, U, V, W, R, I, J, K, Q, T, H, S, F, M, G);
FORMAT(print = 1, number = 1,%m = %5.3m, %n = %5.3n, %f = %5.3f);
CODE('Head'); PRINT('%');
    PRINT('O00001');
CODE('Safe'); PRINT('G90 G40 G17');
CODE('T'); PRINT('T%02f M06', _T);
    PRINT('G54 G90 X0 Y0');
    PRINT('G43 H%2f Z%n', _T, _ZTOP);
    PRINT('S% m F% m M%1f', _SPIN, _FEED, _SDIR);
CODE('S'); PRINT('S% m', _S);
CODE('F'); PRINT('F% m', _F);
CODE('G01'); PRINT('G%1m X% m Y% m Z% m F% m', 1, _X2, _Y2, _Z2, _F);
CODE('G02'); PRINT('G%1m X% m Y% m Z% m R% n F% m', 2, _X2, _Y2, _Z2, _R, _F);
CODE('G03'); PRINT('G%1m X% m Y% m Z% m R% n F% m', 3, _X2, _Y2, _Z2, _R, _F);
CODE('G04'); PRINT('G4 P%3.1n', _P);
CODE('Offset'); PRINT('G54 X% m Y% m Z% m', _dX, _dY, _dZ);
CODE('Rotate'); PRINT('G73 H% f', _A);
CODE('CallSubProg'); PRINT('M98 P%4f', 1000 + _P);
```

С помощью макроса PRINT и переменных настраивается вывод различных инструкций промежуточного формата в коды системы ЧПУ FANUC. Макрос CODE задает инструкцию УП, в отношении которой действуют последующие макросы PRINT. Название инструкции передается в макрос CODE как его аргумент. Например, строка 'Head' означает заголовок УП, 'Safe' — начальные коды безопасности, 'T' — смену инструмента и т. д. Макрос PRINT содержит переменное число аргументов. С помощью спецификаторов числовых форматов задается способ вывода десятичных чисел: %m — модальный вывод значения кадра, %n — немодальный вывод, %f — вывод числа безотносительно к модальности. Макрос FORMAT задает настройки вывода для всех последующих макросов PRINT. Для разработки постпроцессоров следует пользоваться таблицей, в которой перечислены переменные САМ-модуля фрезерной обработки и указана их принадлежность уровням иерархии.

### Заключение

В статье рассмотрены принципы организации подсистемы сквозной конструкторско-технологической параметризации для задач, решаемых инженерами-технологами при моделировании обработки в САМ-системе, и ее

программная реализация в составе интегрированного САМ-приложения для платформы КОМПАС-3D.

Стержнем подсистемы является иерархия параметрических переменных, сгруппированных на пяти уровнях подчиненности: параметры детали, параметры плана обработки, параметры инструментальных переходов, параметры КТЭ и параметры инструкций управляющей программы. Такая иерархия проста и понятна технологом, поскольку она отражает реальную структуру и модульность технологического процесса обработки на станках с ЧПУ. Интеграция конструкторских и технологических моделей на базе API обеспечивает сквозную ассоциативность по цепочке САМ — САМ — CNC, когда изменения, внесенные конструктором в деталь, автоматически отображаются в кодах управляющей программы.

Приведены примеры использования параметризации для решения трех задач: расчета режимов резания, создания пользовательской траектории и настройки постпроцессора. По мере своего развития подсистема может быть применена и для других задач в области САМ, например, для автоматизации подбора инструментов и приспособлений.

### Список литературы

1. Четверухин Н. Ф. Условные изображения и параметрический метод их построения // Вопросы современной начертательной геометрии: сб. статей под ред. Н. Ф. Четверухина. М.-Л.: ОГИЗ, 1947. С. 188—223.
2. Четверухин Н. Ф., Яцкевич Л. А. Параметризация и ее применение в геометрии // Математика в школе. 1963. № 5. С. 15—23.
3. Полозов В. С., Будеков О. А., Ротков С. И. и др. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи. М.: Машиностроение, 1983. 280 с.
4. Ротков С. И. Разработка средств геометрического моделирования и компьютерной графики пространственных объектов для CALS-технологий: дисс. докт. техн. наук, Н. Новгород, 05.01.01, ННГАСУ, 1999. 300 с.
5. Рыжов Н. Н. Параметрическая геометрия. М.: МАДИ, 1988. 56 с.
6. Ермаков Е. С. Принципы многоуровневой параметризации при формировании объектов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.12. Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т Н. Новгород, 2007. 23 с.
7. Лячек Ю. Т. Геометрическое моделирование. Параметризация и модификация 3D-моделей и чертежей в САПР. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. 160 с.
8. Бассам А. М. Исследование и разработка алгоритмического и программного обеспечения параметризации конструкторских чертежей на основе адаптивной сетевой модели: дис. канд. тех. наук: 05.13.12. Санкт-Петербург, 2013. 135 с.
9. Лячек Ю. Т., Алькади Л. Методы создания параметрических моделей геометрических объектов в современных САПР. Кибернетика и программирование. 2016. № 2. С. 42—51.

10. Алкади Л. Д. Г., Лячек Ю. Т., Мусаид А. М. О., Мустафа Ахмед Б. М. Параметрическая сеточная модель конструкторского чертежа: Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2016. Т. 2. Секции 4–7. С. 77–80.
11. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование: учебник для учреждений высш. проф. образования. М.: Издательский центр "Академия", 2011. 272 с.
12. Ершов А. Г. Алгоритмы и программные системы для геометрических задач параметрического проектирования: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.11. Новосибирск, 2007. 19 с.
13. Копорущин П. А. Алгоритмы расчета параметрических моделей геометрических объектов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2015. № 3. С. 95–97.
14. Копорущин П. А. Применение ДМ-декомпозиции при расчете параметрических моделей объектов // Современные проблемы теории машин. 2016. № 4–1. С. 24–26.
15. Ермилов В. В. Вариационное параметрическое геометрическое моделирование в САПР на основе онтологий: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.12. Ижевск, 2008. 20 с.
16. Owen J. Algebraic solution for geometry from dimensional constraints // Proc 1st ACM Symposium on Solid Modeling and CAD/CAM Applications, ACM Press. 1991. P. 397–407.
17. Jackson B., Owen J. C. A characterisation of the generic rigidity of 2-dimensional point-line frameworks. Preprint, arXiv: 1407.4675, 2016.
18. Hoffmann C. M., Joan-Arinyo R. A brief on constraint solving. CAD&A, 2: 655–663, 2005.
19. Fudos I., Hoffmann C. M., Joan-Arinyo R. Tree-decomposable and underconstrained geometric constraint problems. Preprint, arXiv: 1608.05205, 2016.
20. Васильев С., Ушкевич В., Кузьмин В., Мазурин А. СИТЕП: инвариантная система технологического проектирования // САПР и графика. 2000. № 7. С. 43–47.
21. Калякулин С. Ю. Система автоматизированной конструкторско-технологической параметризации процессов изготовления деталей типа тел вращения: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06, 2016. 185 с.
22. Овчинников А. Ю., Князева Н. Ю. Разработка методики построения комплексной детали при применении группового технологического процесса с использованием САПР "Т-FLEX" // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26. № 3. С. 312–324.
23. Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е. Методы преобразования конструкторской информации машиностроительных деталей // Вестник МГТУ Станкин. 2012. № 2. С. 92–95.
24. Шишигин Д. С. К выбору технологии интеграции прикладного программного обеспечения с САПР // Труды СПИИРАН. 2016. № 4 (47). С. 211–224.
25. Shah J. J., Mäntylä M. Parametric and feature-based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications. Wiley, New York, 1995. 619 p.
26. Официальный сайт АСКОН. САМ-приложение "Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка". URL: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu-fo>
27. Официальный сайт АСКОН. САМ-приложение "Модуль ЧПУ. Токарная обработка". URL: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu>
28. Shchekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V. Simulation of the Machining of a Bush in the KOMPAS-3D System // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, N. 11. P. 987–990.
29. Щекин А. В., Сульдин С. П., Митин Э. В. Особенности САМ-приложения "Модуль ЧПУ. Токарная обработка" // ВСТИН. 2017. № 8. С. 16–18.
30. Камнев А. Интерфейс прикладного программирования геометрического ядра СЗД, его применение и главное отличие от API системы КОМПАС-3D // САПР и графика. 2016. № 5. С. 36–38.
31. Щекин А. В., Сульдин С. П. Ассоциативность траекторий в САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 8. С. 570–575.

A. V. Shchekin, Head of Research Laboratory, e-mail: [schekin@inbox.ru](mailto:schekin@inbox.ru),  
N. P. Ogarev Mordovia State University (Saransk), Saransk, 430005, Russian Federation

## Design and Technological Parameterization in CAM

*The article describes the approach to the organization of a subsystem of design and technological parametrization applied to tasks in CAM (Computer-Aided Manufacturing). The approach is based on the principle of multilevel parametrization and includes sets of parametric variables organized at five levels of the hierarchy: external variables of the design model, general variables of the processing plan, processing variables, feature variables and control program variables. The hierarchical structure of parametric variables allows end-to-end parameterization and associativity of the control program, provides a uniform set of parameters for all tasks that users solve in a CAM system. A rigid hierarchy of variables allows you to divide the scope of use of parameters in a simple and reliable way. The subsystem of parametrization is implemented as a part of the commercial CAM-application for milling processing integrated into the KOMPAS-3D CAD-platform. Examples of calculating of cutting parameters, creating user trajectory for 3D-milling and programming postprocessor using parametrization are given.*

**Keywords:** parametrization, CAD/CAM, KOMPAS-3D, NC-program, 3D-model, manufacturing feature, API (Application Program Interface)

DOI: 10.17587/it.25.387-396

## References

1. **Chetveruhin N. F.** Conditional images and parametric method of its construction, *Questions of modern descriptive geometry. Collected papers edited by N. F. Chetveruhin*, Moscow-Leningrad, OGIZ, 1947, pp. 188–223 (in Russian).
2. **Chetveruhin N. F., Jacevich L. A.** *Mathematics in school*, 1963, no. 5, pp. 15–23 (in Russian).
3. **Polozov V. S., Budekov O. A., Rotkov S. I.** Automated design. Geometric and graphical tasks, Moscow, Mashinostroenie, 1983, 280 p. (in Russian).
4. **Rotkov S. I.** Development of geometric modeling tools and computer graphics of spatial objects for CALS-technologies. Doct. Diss., Nizhny Novgorod, 1999, 300 p. (in Russian).
5. **Ryzhov N. N.** Parametric Geometry, Moscow, MADI, 1988, 56 p. (in Russian).
6. **Ermakov E. S.** Principles of multilevel parametrization in the formation of objects. Abstract of thesis cand. of tech. sci., Nizhny Novgorod, 2007, 23 p. (in Russian).
7. **Ljachev Ju. T.** Geometric modeling. Parametrization and modification of 3D models and CAD drawings, SPb., Publishing house of SPbGJeTU "LJeTI", 2015, 160 p. (in Russian).
8. **Bassam A. M.** Research and development of algorithmic and software for parameterization of design drawings based on the adaptive network model. Thesis cand. of tech. sci., Sankt-Peterburg, 2013, 135 p. (in Russian).
9. **Ljachev Ju. T., Al'kadi L.** *Kibernetika i programirovanie*, 2016, no. 2, pp. 42–51 (in Russian).
10. **Alkadi L. D. G., Ljachev Ju. T., Musaid A. M. O., Mustafa Ahmed B. M.** *International Conference of Soft Computing and Measurement*, 2016, vol. 2, no. 4–7, pp. 77–80 (in Russian).
11. **Golovanov N. N.** Geometric modeling, Moscow, Izdatel'skij centr "Akademija", 2011, 272 p. (in Russian).
12. **Ershov A. G.** Algorithms and software systems for geometric problems of parametric design. Abstract of thesis cand. of fiz.-mat. sci., Novosibirsk, 2007, 19 p. (in Russian).
13. **Koporushkin P. A.** *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*, 2015, no. 3, pp. 95–97 (in Russian).
14. **Koporushkin P. A.** *Sovremennye problemy teorii mashin*, 2016, no. 4–1, pp. 24–26 (in Russian).
15. **Ermilov V. V.** Variational parametric geometric modeling in CAD on the basis of ontologies. Abstract of thesis cand. of tech. sci., Izhevsk, 2008, 20 p. (in Russian).
16. **Owen J.** Algebraic solution for geometry from dimensional constraints, *Proc 1st ACM Symposium on Solid Modeling and CAD/CAM Applications*, ACM Press (1991), pp. 397–407.
17. **Jackson B., Owen J. C.** A characterisation of the generic rigidity of 2-dimensional point-line frameworks, Preprint, arXiv: 1407.4675, 2016.
18. **Hoffmann C. M., Joan-Arinyo R.** A brief on constraint solving, *CAD&A*, 2: 655–663, 2005.
19. **Fudos I., Hoffmann C. M., Joan-Arinyo R.** Tree-decomposable and underconstrained geometric constraint problems, Preprint, arXiv: 1608.05205, 2016.
20. **Vasil'ev S., Ushkevich V., Kuz'min V., Mazurin A.** *SAPR i grafika*, 2000, no. 7, pp. 43–47 (in Russian).
21. **Kaljakulin S. Ju.** The system of automated design and technological parametrization of manufacturing processes for parts such as bodies of revolution. Thesis cand. of tech. sci., Moscow, 2016, 185 p. (in Russian).
22. **Ovchinnikov A. Ju., Knyazeva N. Yu.** *Vestn. Mordovsk. Gos. Univ.*, 2016, vol. 26, no. 3, pp. 312–324 (in Russian).
23. **Kuz'min V. V., Maksimovskij D. E.** *Vestnik MGTU Stankin*, 2012, no. 2, pp. 92–95 (in Russian).
24. **Shishigin D. S.** *Trudy SPIIRAN*, 2016, no. 4 (47), pp. 211–224 (in Russian).
25. **Shah J. J., Mäntylä M.** Parametric and feature-based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications, Wiley, New York, 1995, 619 p.
26. **Official** web site of ASCON. CAM-application "CNC module. Milling", available at: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu-fo> (in Russian).
27. **Official** web site of ASCON. CAM-application "CNC module. Turning", available at: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu> (in Russian).
28. **Shchekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V.** *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 11, pp. 987–990.
29. **Shchekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V.** *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 123–125.
30. **Kamnev A.** *SAPR i grafika*, 2016, no. 5, pp. 36–38 (in Russian).
31. **Shchekin A. V., Sul'din S. P.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 570–575 (in Russian).