Особенности реализации и специфика применения функций многокоординатной обработки в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол»

Г.М. Мартинов, А.И. Обухов, Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева (ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»)

Рассмотрены решения, реализованные в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол», обеспечивающие написание эффективного кинематически-независимого кода управляющих программ, нацеленных на многокоординатную обработку. Описаны особенности настройки распространенных пятикоординатных кинематических схем. Приведена специфика алгоритма выбора пути в ходе реализации запрограммированного в системе ЧПУ движения[1].

Ключевые слова: система ЧПУ, многокоординатная обработка, интерполяция, кинематика, управление подачей.

Под многокоординатной обработкой в общем смысле понимается технологическая задача, решение которой требует задания в управляющей программе системы ЧПУ нескольких дополнительных координат, помимо декартовых [1]. Чаще всего это относится к тем случаям, когда инструменту необходимо задавать не только положение, но и ориентацию. Параметрами ориентации задается направление вектора инструмента в пространстве и угол поворота инструмента вокруг собственной оси. Изменение ориентации инструмента необходимо для обширного класса технологических задач. Среди них можно выделить обработку наклонных поверхностей, сверление и фрезерование наклонных отверстий, фрезерование поверхностей свободной формы. Обработка свободно-ориентированных поверхностей считается наиболее ответственной и сложной задачей для многокоординатного станка с ЧПУ [2]. Действительно, при обработке детали свободной формы для обеспечения оптимальных условий резания, высокой точности и качества поверхности, а иногда и самой возможности подвода к контуру без коллизий требуется в реальном времени изменять наклон инструмента относительно детали одновременно с перемещением его режущей кромки. Наклон инструмента может осуществляться значительно отличающимися друг от друга способами на станках с разным конструктивным исполнением. Наиболее распространенные варианты пятикоординатных машин базируются на классических схемах с поворотными осями (поворотная голова, глобусный стол) или на схемах с параллельной кинематикой (гексаподы и др.) [3]. Успешное применение системы ЧПУ для многокоординатной обработки зависит от реализации ряда функций, связанных как с поддержкой специфических способов ввода данных о геометрии контура [4], так и с управлением движением при формообразовании в реальном времени [5]. Применение зарубежных систем ЧПУ затруднено в связи с ограничениями на распространение, связанными с технологиями и оборудованием двойного назначения. Проблема интеграции необходимых функций в отечественную систему ЧПУ усугубляется закрытостью алгоритмов многокоординатной обработки.

Базовые функции многокоординатной обработки

В настоящий момент система ЧПУ «АксиОМА Контрол» на уровне управляющей программы предлагает ряд функций поддержки многокоординатной обработки для наиболее распространенных кинематических схем (набор реализованных кинематических схем может быть расширен) [6]. Синтаксис команд в целях унификации текста управляющих программ реализован практически совместимым с системами Siemens Sinumerik.

Функция трансформации ориентации инструмента TRAORI решает задачу компенсации смещения конца инструмента при изменении его ориентации относительно детали. Компенсация производится в реальном времени. Система ЧПУ перемещает оси станка таким образом, чтобы положение конца инструмента в каждой точке контура соответствовало запрограммированным в кадре координатам X, Y, Z и выбранной в программе функции интерполяции. В некотором смысле можно интерпретировать трансформацию ориентации как расширение функции компенсации длины инструмента на случай переменной ориентации.

Команды программирования ориентации в обобщенных координатах. Многокоординатные станки могут строиться на основе разных кинематических схем. Оси на одном станке расположены не так, как на другом и могут иметь иной геометрический смысл. Из этого следует, что управляющая програм-

[1] Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (№ 2.1237.2017/ПЧ).

ма, в которой ориентация задается путем прямого программирования позиций осей станка, является кинематически-зависимой, то есть может корректно выполняться только на станке одного типа и одной серии. Для другого станка программу необходимо генерировать заново, вводя в CAM-систему актуальные кинематические параметры. Более того, для станков с параллельной кинематикой, как правило, вообще нельзя выделить отдельные оси ориентации и напрямую задать им положение, так как все оси одновременно участвуют в реализации движений ориентации и пространственного перемещения инструмента. Следовательно, программировать ориентацию лучше с помощью кинематически-независимых параметров. Система ЧПУ поддерживает несколько вариантов обобщенных параметров ориентации: углы Эйлера системы поворотов ZY'Z", углы системы «крен-тангаж-рысканье» (ZY'X''), компоненты вектора ориентации инструмента (плюс угол собственного вращения) и углы наклона/опережения относительно касательной и нормали в конечной точке кадра.

Режимы управления движением ориентации инструмента. Задание ориентации инструмента с помощью кинематически-независимых параметров (вектора или углов) лишь указывает, какое направление инструмент должен получить в конце кадра, но не определяет, как будет достигнуто это направление, то есть каким будет движение инструмента или какой будет воображаемая поверхность, описываемая вектором ориентации в ходе движения. В простейшем базовом режиме (осевая интерполяция) задаваемые углы или компоненты вектора ориентации автоматически пересчитываются в позиции осей, которые должны быть достигнуты к концу кадра. Затем система ЧПУ производит синхронное движение осей ориентации точно так же, как было бы в случае прямого задания позиций осям. В режиме плоской векторной интерполяции вектор инструмента при смене ориентации движется в пределах плоскости — конец вектора перемещается по геодезической линии или так называемому большому кругу. Режим плоской интерполяции вектора реализует кинематически-независимое движение ориентации. Каким бы ни был станок, вектор инструмента всегда будет вращаться по одному и тому же пути, заданному программой. Помимо предсказуемой траектории, это позволяет достичь высокого уровня переносимости управляющей программы, то есть обеспечивает возможность ее выполнения (с минимальными правками вспомогательных и технологических команд) на станках различной конструкции.

Настройка кинематических схем

В системе «АксиОМА Контрол» кинематическая конфигурация станка вводится наладчиком аналогично машинным параметрам. Базовая кинематическая схема позволяет привязать программируемые оси к физическим осям станка, но не поддерживает осевые трансформации любых видов. Этот вариант подходит для любого станка, если не предполагается использовать осевые трансформации при многокоординатной обработке и если прямого задания движения осям станка достаточно для решаемых технологических задач.

В настоящий момент для многокоординатных станков поддерживаются наиболее распространенные схемы с круговыми осями ориентации, направленными взаимно ортогонально. Эти схемы соответствуют станкам с декартовыми осями X, Y, Z, вокруг которых осуществляют вращение круговые оси ориентации. Примеры: голова с двумя осями ориентации, распределенная кинематика (голова + поворотный стол), глобусный стол. Наличие круговых осей позволяет реализовывать трансформации координат в трех-, четырех-, пяти и шестикоординатном режимах. При наличии двух или трех поворотных осей схемы позволяют реализовать программирование ориентации инстру-

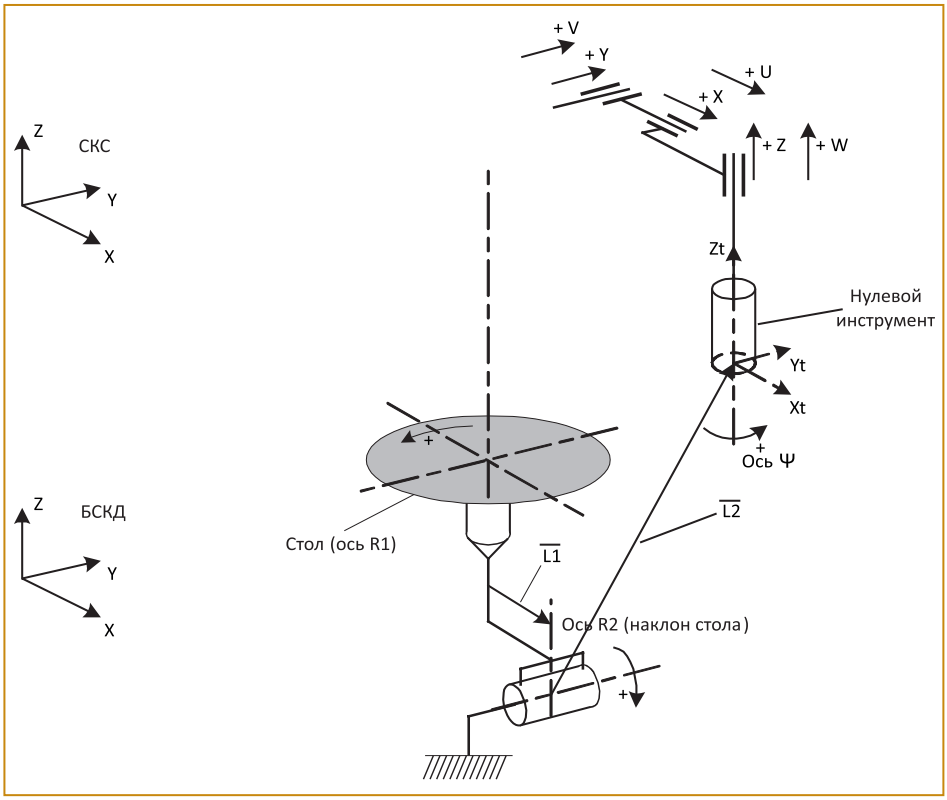

Рис. 1. Кинематическая схема с глобусным столом, где СКС - система координат станка, БСКД - базовая система координат детали

мента в обобщенных координатах. На рис. 1 изображен пример из руководства по конфигурированию для схемы типа «глобусный стол». Обозначения: R1 — ось вращения стола; R2 — ось наклона стола; Ψ — ось собственного вращения инструмента; L1 — вектор оси R2 относительно оси R1; L2 — вектор конца нулевого инструмента (нуля базовой системы координат детали) относительно оси R2; X, Y, Z, U, V, W — линейные оси станка.

Настройка кинематической схемы заключается в назначении номеров физических осей, компонентов векторов между осями и начальной точки для базовой системы координат детали. Векторы L1 и L2 определяют взаимное положение частей системы при базовом положении кинематической схемы, то есть когда инструмент имеет нулевую ориентацию (углы Эйлера {0,0,0}), а положение конца нулевого инструмента совпадает с нулем БСКД.

Параметр «Компенсация осей UVW при трансформации» позволяет включить учет смещения дополнительных линейных осей в режиме кинематической трансформации. В случае активации этого параметра движения по осям (U, V, W) при включенной трансформации не приводят к изменению позиции конца инструмента относительно системы координат детали, так как при этом происходит компенсация смещений обратным движением осей (X, Y, Z).

Для каждой схемы данного раздела можно задать программируемые адреса трех осей ориентации: R1 и R2, определяющих направление вектора инструмента относительно детали, и оси собственного вращения инструмента Ψ. Для работы системы ЧПУ указание любой из трех осей не является обязательным, но неполный набор осей ориентации обуславливает ограничения на способы программирования движений и влияет на особенности поведения системы ЧПУ в целом. Для обеспечения возможности программирования ориентации инструмента в обобщенных координатах (с помощью компонент вектора или углов Эйлера) необходимо задание программируемых адресов для обеих осей R1 и R2 (то есть требуется полноценный пятикоординатный станок). Если адрес для одной из этих осей не задан, выполнение кадра с заданием вектора или угла будет прервано. Если адрес для оси Ψ не задан, то запрограммированный угол собственного вращения игнорируется, а его значение никак не влияет на выбор пути движения. Если же ось Ψ имеет заданный адрес, то система ЧПУ работает в шестикоординатном режиме, то есть все три угла ориентации твердого тела для инструмента будут учитываться системой при выборе пути движения.

Функция трансформации поддерживается, если хотя бы для одной из осей (R1, R2) задан программируемый адрес. При этом позиция неактивной круговой оси принимается равной нулю. Таким образом, для четырехкоординатной системы трансформация ориентации может применяться. В частности, это справедливо для станков с изменяемым наклоном инструмента относительно фиксированного стола или с наклонным столом и инструментом фиксированной ориентации. Все сказанное также справедливо для трехкоординатных систем с одной осью вращения, лишенных одной декартовой оси.

Особенности реализация движения для многокоординатного станка

Многокоординатное перемещение, заданное в кадре управляющей программы, может быть отображено на пространство осей станка разными способами, обусловленными реализацией системы управления и параметрами ее настройки [8].

Кинематические конфигурации. При программировании ориентации инструмента с помощью обобщенных координат (углов Эйлера или компонент вектора инструмента) нужно понимать, что для заданной ориентации инструмента существует два варианта пары позиций осей R1 и R2. Отличительной особенностью каждого варианта (кинематической конфигурации) является положение второй круговой оси станка, связанной с наклоном инструмента относительно стола:

— конфигурация № 1: R2 ⩾ 0 (|R2 | ⩽ 90 для некоторых вариантов схем);

— конфигурация № 2: R2 < 0 (|R2 | > 90).

Нулем оси R2 в данном случае условно считаем позицию оси при базовой ориентации (ось Z ин-

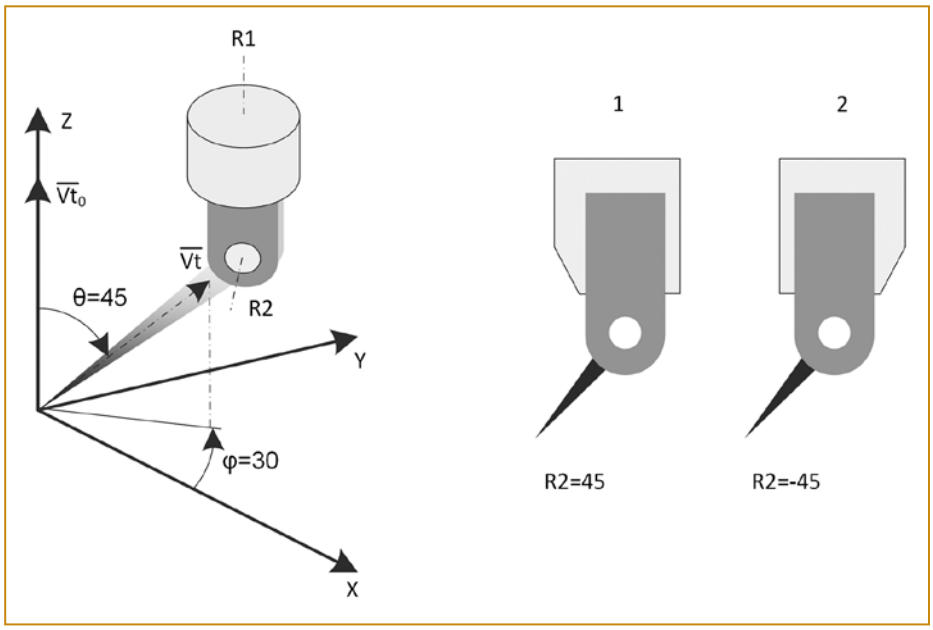

Рис. 2. О неоднозначности позиций осей для заданных углов Эйлера

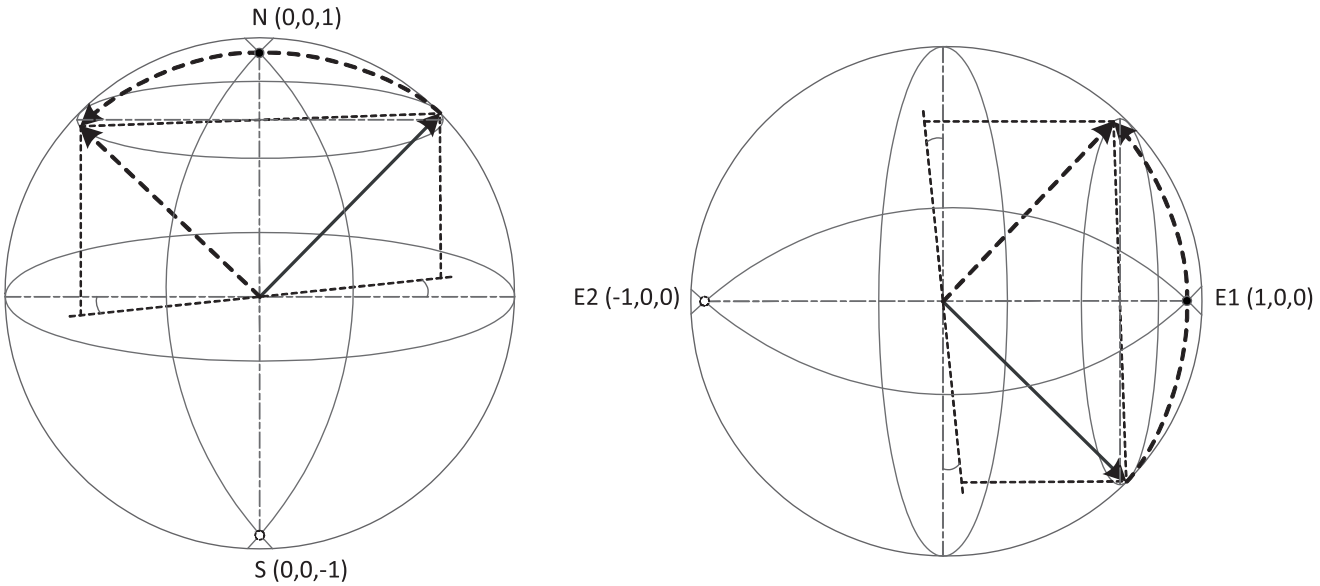

Рис. 3. Переход вектора через полярное и экваториальное положения

Таблица. Варианты параметра выбора пути для движения ориентации

№	Значение	Описание
1	Ориентация только по кратчайшему пути	В любом режиме движения ориентации поворот оси R1 выполняется по кратчайшему пути. Если проход по кратчайшему пути невозможен из-за нарушения пределов оси, выполнение кадра прерывается.
2	Ориентация по любому возможному пути (только для режима осевой интерполяции)	В режиме осевой интерполяции поворот оси R1 допускается по длинному пути, если кратчайший путь недопустим из-за нарушения пределов или по совокупности поворотов всех осей ориентации длинный путь оси R1 получается более выгодным. В режиме плоской интерполяции вектора при отсутствии возможности кратчайшего перемещения выполнение кадра прерывается.
3	Ориентация по любому возможному пути (для всех режимов)	Аналогично варианту #2, но режим плоской интерполяции вектора при необходимости заменяется на осевой для обрабатываемого кадра.

струмента вдоль оси Z СКС). При этом может быть неограниченно много кратных вариантов обеих конфигураций, отличающихся друг от друга на полный оборот одной из осей (число таких конфигураций зависит от диапазона позиций осей).

На рис. 2 условно изображена голова с двумя осями ориентации (тип ZY). Если считать начальную позицию осей нулевой (R1=0, R2=0 при нулевой ориентации инструмента), то нетрудно мысленно представить, что заданная ориентация (φ=30, θ=45) может быть достигнута путем перемещения осей двумя различными кратчайшими путями:

1) R1=30, R2=45;

2) R1=-150, R2=-45.

С учетом произвольного числа полных оборотов N и K возможные пары позиций осей для заданной ориентации можно записать в следующем общем виде:

3) R1=30±360*N, R2=45±360*K;

4) R1=-150±360*N, R2=-45±360*K.

Выбор пары значений в том или ином случае зависит от положения системы в начале кадра, режимов управления движением и ограничений на позиции осей в машинных параметрах.

Выбор пути для движения ориентации. Алгоритм выбора системой ЧПУ пути для движения ориентации состоит из следующих шагов.

1. Определяются позиции осей для двух возможных кинематических конфигураций.

2. Для каждой из конфигураций определяется кратчайший путь поворота осей. В зависимости от параметра «Выбор пути для движения ориентации» решается вопрос о реализуемости обеих конфигураций.

3. Если ни одна конфигурация не реализуема, выполнение кадра прерывается, и канал системы останавливается с ошибкой.

4. Если возможен проход через особую точку с переключением конфигурации (то есть путем поворота одной оси R2), выбирается именно такой путь и процедура подготовки завершается.

5. Если обе конфигурации реализуемы, выбирается та, для которой сумма квадратов углов поворотов (от начальной до конечной позиции кадра) всех активных осей ориентации наименьшая.

Вывод о реализуемости той или иной кинематической конфигурации зависит от режима интерполяции и значения параметра «Выбор пути для движения ориентации» кинематической схемы (таблица).

Рассматриваемый параметр влияет на поведение системы в тех случаях, когда поворот по оси R1 не может быть произведен по кратчайшему пути из-за возможного нарушения пределов осей. На практике разумнее всего выбирать вариант № 2, так как для режима осевой интерполяции длинный путь поворота, как правило, допустим. В то же время, в случае выбора варианта № 3 принудительная замена векторного режима интерполяции на осевой может привести

к непредсказуемым последствиям (повреждению поверхности детали, поломке инструмента и оснастки).

Особые (сингулярные) точки. В кадре управляющей программы может быть задано движение, для которого векторы начальной и конечной ориентации инструмента лежат в одной плоскости с той или иной осью системы координат станка. В этом случае при совершении движения ориентации возможен (а в режиме интерполяции вектора необходим) переход через особые точки на координатной сфере, называемые полярным и экваториальным положением. На рис. 3 изображены движения вектора ориентации через такие положения.

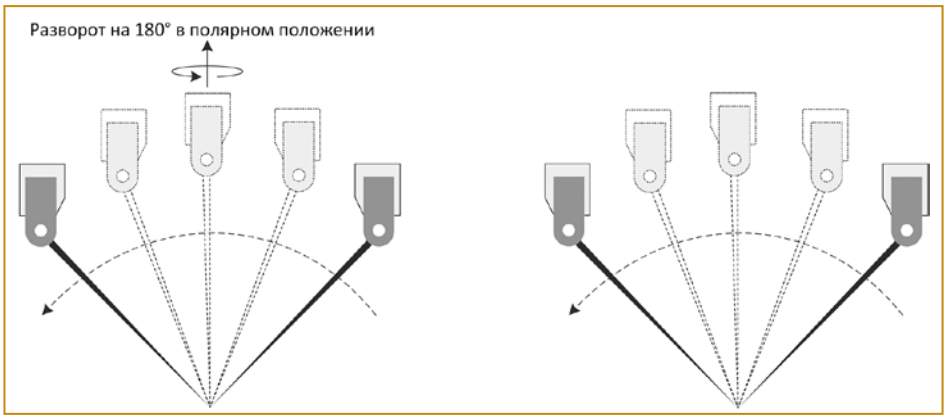

Рис. 4. Способы прохода полюса

Для каждой из кинематических схем имеется свой набор точек, которые являются особыми. В большинстве случаев особые точки лежат на оси R1 (первой в цепочке оси вращения кинематической схемы). Эти точки также называются сингулярными. Движение с ненулевой скоростью в режиме интерполяции вектора через особые точки формально приводит к мгновенному повороту оси R1. На практике система ЧПУ в таких случаях снижает скорость до нуля при подходе к сингулярной точке, затем разворачивает ось R1 с допустимым ускорением, после чего реализует вторую фазу движения оси R2, не выходя за пределы заданного ускорения оси [9].

Второй способ прохода особой точки — это движение с переключением кинематической конфигурации. В этом случае поворот вектора ориентации реализуется путем движения одной оси R2 при неподвижной оси R1. В приведенном примере второе движение будет реализовано путем поворота оси R2 на ±90°.

На рис. 4 показаны оба способа: с поворотом оси R1 в особой точке (слева) и с переключением кинематической конфигурации (справа). Вариант с переключением конфигурации при проходе особой точки имеет приоритет и при возможности выбирается системой даже в режиме осевой интерполяции, так как является самым выгодным с точки зрения величины суммарного поворота осей.

Пример фрезерования наклонной плоскости под углом 30° (рис. 5) показан на Листинге.

Заключение

Сопоставление возможностей системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» по многокоординатной обработке с другими современными системами ЧПУ было проведено на основе общедоступных описаний и исследования полученных результатов обработки тестовых деталей (в силу закрытости алгоритмов). Анализ набора функций и алгоритмов многокоординатной обработки показал, что решения, разработанные в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол», не уступают функциональным возможностям распространенных зарубежных аналогов [10]. Предложенное решение имеет более простую реализацию, что позволило избежать присущей другим системам управления избыточности и сложности понимания работы механизма кинематических трансформаций при многокоординатной обработке.

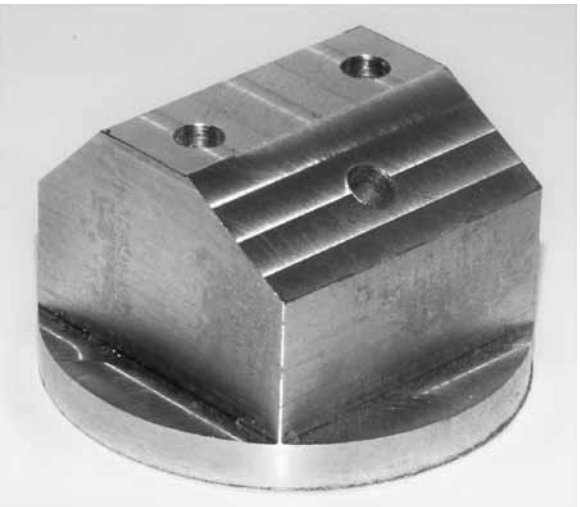

Рис. 5. Тестовая деталь

Листинг

```
N10 T7 M06                          // Установка инструмента T7
N20 S4500 M3
N30 G154                            // Поворот системы координат детали
N40 G90 G43
N50 TRAORI                          // Включение трансформации
N60 G0 Z100
N70 G0 B0
N80 G0 X30.744 Y28.738 B30          // Разворот оси B
N90 PLANEMILL();                    // Вызов подпрограммы фрезерования
                                       плоскости
N100 G83 Q3=500 Q5=-30 Q7=5         // Определение цикла сверления
N110 X30 Y0 Z0                      // Вызов цикла в заданной точке
N120 G0 Z30                         // Отвод
N130 G0 B0                          // Возврат оси B в исходное положение
N140 X0 Y0
N150 M5
M30
```

Средства системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» обеспечивают использование кинематически-независимого кода управляющих программ для многокоординатной обработки. Развитая параметризация кинематических схем реализует большой спектр требований станкостроителя по режимам управления, прогнозируемые стратегии обхода контура и переориентации инструмента с учетом налагаемых ограничений на пределы перемещений и динамические ограничения осей.

Список литературы

1. *Grigoriev S.N., Martinov G.M.* Research and Development of a Cross-platform CNC Kernel for Multi-axis Machine Tool // Procedia CIRP V. 14. 2014. pp. 517-522.
2. *Григорьев С.Н., Мартинов Г.М.* Проблемы, тенденции и перспективы развития систем числового программного управления технологических систем и комплексов // Автоматизация в промышленности. 2013. № 5. С. 4-7.
3. *Григорьев С.Н., Кутин А.А., Долгов В.А.* Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. №4(31). С. 10-16.
4. Мартинов Г.М., Обухов А. И., Пушков Р.Л. Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №6. С. 42-50.
5. *Martinova L.I., Pushkov R.L., Kozak N.V., Trofimov E.S.* Solution to the problems of axle synchronization and exact positioning in a numerical control system // Automation and Remote Control. 2014. V. 75, Issue 1, pp. 129-138.
6. *Мартинов Г.М., Мартинова Л.И.* Формирование базовой вычислительной платформы ЧПУ для построения специализированных систем управления // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. №1(24). с. 92-97.
7. *Никишечкин А.П., Пушков Р.Л., Никич А.Н.* Теоретические аспекты разработки программного комплекса для автоматизированной установки операционной системы реального времени AxiOMA RTOS // Вестник МГТУ "Станкин". 2016. №3. с.78-81.
8. *Martinova L.I., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Pushkov R.L., Obukhov A.I.* The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application // Automation and Remote Control. 2015. V. 76. Issue 1. pp. 179-186.
9. *Любимов А.Б., Мартинова Л.И., Обухов А.И.* Построение алгоритма опережающего просмотра кадров для линейных и нелинейных законов управления подачей в системах ЧПУ//Автоматизация в промышленности. 2016. № 5. с. 10-13.
10. *Кудинов А.С.* Способы интерполяции на СЧПУ Sinumerik 840D solution line // Автоматизация в промышленности. 2013. №5. с. 15-19.

***Мартинов Георгий Мартинович** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой компьютерных систем управления, **Обухов Александр Игоревич** – канд. техн. наук, старший преподаватель, **Пушков Роман Львович** – старший преподаватель, **Евстафиева Светлана Владимировна** – старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».*

Контактный телефон +7 (499) 972-94-40.

E-mail: svetlana.evstafieva@gmail.com

PTC анонсирует расширение возможностей Creo

Компания PTC анонсирует появление в системе автоматизированного проектирования Creo™ функционального модуля для работы в Интернете вещей (IoT). Таким образом, PTC становится единственным поставщиком САПР, предоставляющим технологии для разработки изделий, которые будут работать в Интернете вещей. Вкупе с представленным в конце марта модулем дополненной реальности для Creo новый модуль позволяет производственным предприятиям создавать полноценные цифровые двойники выпускаемых изделий.

Модуль получил название Creo Product Insight и будет запущен летом 2017 г. Creo Product Insight собирает эксплуатационные данные с физического изделия в режиме реального времени, а затем передает их в CAD-систему Creo. Таким образом создается цифровой двойник (аналог) каждого физического изделия.

IoT также полезен для выявления причин сбоев либо аварийного прекращения работы изделий, которым потребуется доработка либо специальная настройка. Данные, полученные от датчиков, благодаря новому модулю можно будет воспроизвести в Creo, чтобы посмотреть, что привело к сбою. Кроме того, реальные данные о работе изделий позволяют избежать допущений и догадок при разработке, опираясь исключительно на собранную в ходе эксплуатации изделия информацию.

При этом цифровая модель Creo позволяет лучше ориентироваться в больших объемах собранных данных, применяя их к соответствующей сборке в модели, тем самым избегая «размытой» информации.

Напомним, что в марте был представлен новый модуль, благодаря которому пользователи Creo 4.0 могут воспользоваться преимуществами интеграции с программным обеспечением ThingWorx® Studio. Он позволяет быстро и легко создавать несколько AR-проекций внутри Creo и делиться ими с другими, используя уникальный идентификатор, который называется ThingMark. Используя бесплатное приложение ThingWorx View, коллеги могут просматривать ThingMark, чтобы совместно работать над дизайном.

Благодаря возможностям AR не только инженеры могут увидеть свои модели в реальном мире, но и все заинтересованные стороны, участвующие в работе, могут также взаимодействовать с проектами, чтобы лучше оценить размер, масштаб и эстетику. AR-проекция – это упрощенное представление модели, разработанной в Creo. Ее использование позволяет пользователям защищать данные САПР, а также упрощает публикацию, загрузку и просмотр. Кроме того, свойства AR-проекции облегчают пользователям сбор ценной информации от заинтересованных сторон в отделе или организации.

AR-проекции можно использовать непосредственно при обслуживании либо презентации изделия с помощью любого Android-, Windows- или iOS-устройства, оснащенного видеокамерой. Интеграция AR в настоящее время доступна для новых и существующих пользователей Creo 4.0.

Http://www.ptc.com