

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ НА ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**

Е.В. Басова

*Национальный технический университет «Харьковский  
политехнический институт» (Украина), г. Харьков*

*Ключевые слова:* точность, nurbs–кривая, nurbs –поверхность, обрабатывающий центр, концевая фреза, траектория инструмента

*Аннотация:* Получен математический аппарат для интерполяции траектории перемещения концевой фрезы по сложнопрофильной поверхности. Предложено использовать spline-кривые 5<sup>го</sup> порядка и nurbs-кривые для обеспечения создания высокоточных 3D моделей сложных деталей на этапах 3D проектирования, имитационного моделирования и САМ программирования.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Надежность механизмов и машин зависит от точности обработки заготовок, то есть от степени совпадения размеров, формы и взаиморасположения поверхностей в соответствии с чертежом детали, что неразрывно связано с качеством изделий в целом. Точность формы сложнопрофильных поверхностей – один из наиболее ответственных и труднодостижимых параметров. Даже незначительное снижение точности приводит к трудностям при сборке и монтаже машин, к повышению уровня шума при их работе, а также к принципиальным изменениям характера износа и существенному снижению надёжности и долговечности изделий в целом. Повышение точности обработки сложнопрофильных поверхностей деталей может достигаться высокой точностью и жесткостью металлообрабатывающего оборудования, приводы такого оборудования должны обеспечивать высокое быстродействие. А также сохранность информации при конвертации математической модели готового продукта в САМ-систему, что является возможным только в том слу-

чае, если точность исходной САД-модели проектируемого изделия раз в 10 выше, чем допуск чистовой обработки.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ современных работ позволил установить, что точность и качество обработки сложнопрофильных поверхностей в большой мере зависит от адекватности разработанных математических моделей, правильности траекторий движения режущего инструмента и качества управления процессом обработки [1-4]. Поэтому, для обеспечения механообработки по числовой программе сложной пространственной формы, требующей для своего полного формообразования до пяти одновременно управляемых координат, рекомендуется применение многокоординатных станков с ЧПУ, в том числе и высокоскоростных обрабатывающих центров (ОЦ). Применение таких станков позволяет минимизировать количество установок и переналадок и, как следствие, повысить точность обработки [5].

В результате развития технологии машиностроения появились новые высококачественные и высокопроизводительные методы механообработки, такие как высокоскоростное фрезерование. Что в свою очередь привело к расширению видов интерполяции при формировании траекторий обработки, с целью достижения высокой точности готового продукта.

Изучение новых видов интерполяции дало основание утверждать, что наиболее перспективным является использование интерполирования на поверхности, которое представляет собой планирование траектории перемещения инструмента. Отличие такого метода от остальных заключается в том, что местоположение и ориентация инструмента не определены в кодах управляющей программы, в этих кодах определяется часть (узел) поверхности, которая и несёт информацию о местоположении и ориентации инструмента [6].

В практике зарубежных станкостроителей метод интерполирования на поверхности широко используется при 3-осевой механообработке концевыми сферическими фрезами и при 5-осевой механообработке сложнопрофильных поверхностей концевыми торцевыми фрезами. Однако использование интерполяции на поверхности требует уделить внимания планированию траектории пере-

мещения инструмента во избежание столкновения с деталью, подрезов и дефектов обработки сложной геометрии. Исключение подрезов при планировании обработки осуществляется за счет построения верхней огибающей [7].

Из обзора существующих работ следует, что описанию поверхности для качественной обработки детали уделяется огромное внимание. В частности, одна из ведущих компаний по разработке программного обеспечения для автоматизации проектирования, производства, инженерного анализа и управления проектами для всех областей промышленности компания Unigraphics Solutions (Siemens) при 5<sup>и</sup>-координатной обработке на вертикальных обрабатывающих центрах предлагает использовать NURBS интерполяцию на поверхности [8]. Работ, направленных на обеспечение точного описания траектории перемещения инструмента при 5<sup>и</sup>-координатной обработке на горизонтальных обрабатывающих центрах найти не удалось. Все исследования по этому вопросу носят рекламный характер. Это можно, с одной стороны, объяснить сложностью в математическом описании процесса и вычислительными трудностями, а с другой стороны, большим коммерческим интересом производителей современного многокоординатного оборудования и разработчиков программного обеспечения к проводимым научным исследованиям, и как следствие, конфиденциальности полученной информации.

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью данной работы является создание математического обеспечения для повышения точности обработки сложнопрофильных поверхностей на горизонтальных обрабатывающих центрах.

Требуется разработать математическое представление точного описания траектории перемещения инструмента по обрабатываемой сложнопрофильной поверхности.

## **ОБЕСЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ СЛОЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОЦ**

Обычно NURBS-кривая или поверхность не проходит через точки (управляющие вершины), именно для этого необходимо

осуществить интерполяцию следа перемещения инструмента по расчетным контрольным точкам обрабатываемой поверхности.

Изначально запишем математическое представление NURBS-кривой ( $C(\lambda)$ ) [9]:

$$C(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{B(\lambda)} = \frac{\sum_{i=0}^n w_i \cdot P_i \cdot N_{i,k}(\lambda)}{\sum_{i=0}^n w_i \cdot N_{i,k}(\lambda)}; \quad 0 \leq \lambda \leq 1, \quad (1)$$

где  $n$  – количество контрольных точек,  $k$  – степень кривой,  $w_i$  – однородные координаты  $i$ -ой точки (веса),  $N_{i,k}(\lambda)$  – базисная функция степени  $k$ ,  $P_i$  – вектор  $(x_i, y_i, z_i)$ , объединяющий координаты  $i$ -ой задающей точки в трёхмерном пространстве,  $A$  и  $B$  – начальная и конечная точки кривой,  $\lambda$  – непрерывный параметр кривой.

Для определения соотношения между кривой следа инструмента и задающими ее контрольными точками необходимо выполнить вычисление производных NURBS-кривой ( $C(\lambda)$ ):

$$C^{(K)}(\lambda) = \frac{\partial^K C(\lambda)}{\partial \lambda^K} = \frac{A^{(K)}(\lambda) - \sum_{i=1}^K \binom{K}{i} B^{(i)}(\lambda) \cdot C^{(K-i)}(\lambda)}{B(\lambda)}. \quad (2)$$

Решая задачу получения точной формы сложнопрофильного изделия, интерполяции перемещения режущего инструмента является недостаточным, помимо этого, необходимо еще рассматривать и сложнопрофильную поверхность в трехмерном пространстве:

$$P(u, v) = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix} = \frac{A(u, v)}{B(u, v)} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) \cdot N_{i,k}(v) \cdot w_{i,j} \cdot P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) \cdot N_{i,k}(v) \cdot w_{i,j}}; \quad 0 \leq u, v \leq 1, \quad (3)$$

где  $P_{i,j}$  – векторы задающих точек с компонентами  $x, y$  и  $z$ ,  $w_{i,j}$  – однородные координаты задающих точек,  $u, v$  – параметры поверхности, позволяющие эффективно вычислять точки отстоящие друг от друга на небольшие расстояния.

Для определения поведения поверхности в пространстве и нормали инструмента к ней в каждой точке этой поверхности (последнее важно для вычисления положения фрезы при обработке поверхности на станке с ЧПУ) запишем обобщенное определение ( $K$ -ой,  $L$ -ой) степени производной [10] NURBS-поверхности

$$P^{(K,L)}(u,v) = \frac{\partial^{K+L} P(u,v)}{\partial u^K \partial v^L} = \frac{A^{(K,L)}(u,v) - \sum_{i=1}^K \binom{K}{i} B^{(i,0)}(u,v) \cdot P^{(K-i,L)}(u,v)}{B(u,v)}, \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^L \binom{L}{j} B^{(0,j)}(u,v) \cdot P^{(K,L-j)}(u,v) - \sum_{i=1}^K \binom{K}{i} \sum_{j=1}^L \binom{L}{j} B^{(i,j)}(u,v) \cdot P^{(K-i,L-j)}(u,v)}{B(u,v)}$$

где  $A^{(K,L)}(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \frac{\partial^{(K,L)}(N_{i,k}(u) \cdot N_{i,k}(v))}{\partial u^K \partial v^L} \cdot w_{i,j} \cdot P_{i,j}$ ,

$$B^{(i,j)}(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \frac{\partial^{(i,j)}(N_{i,k}(u) \cdot N_{i,k}(v))}{\partial u^i \partial v^j} \cdot w_{i,j} \cdot P_{i,j}.$$

Приведенные формулы NURBS-кривой, NURBS-поверхности и их производные позволяют максимально точно описать траекторию перемещения инструмента по обрабатываемой сложнопрофильной поверхности.

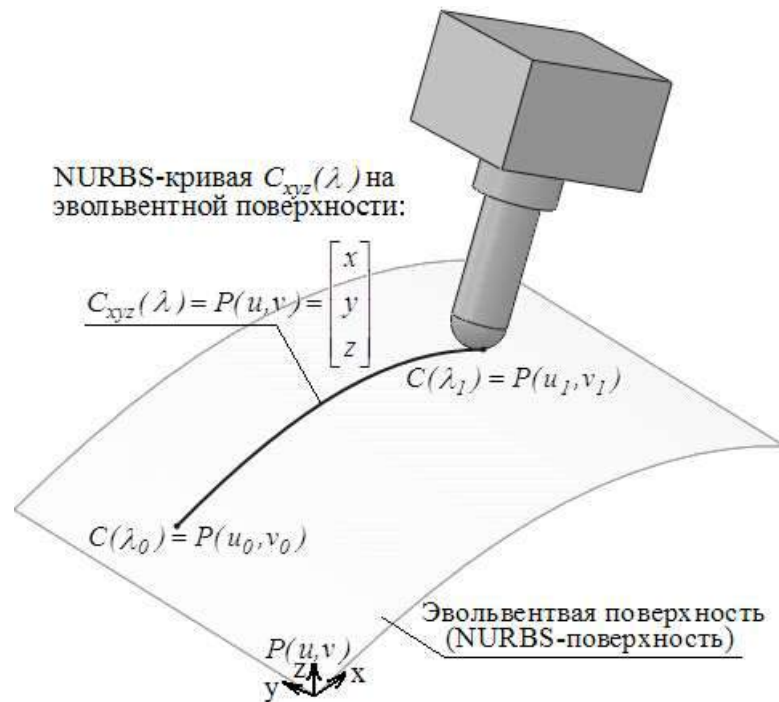
Для того чтобы обеспечить механическую обработку сложнопрофильной поверхности по наиболее оптимальной траектории, необходимо описать поведение инструмента на поверхности. На рис. 1 представлена произвольная кривая (след траектории перемещения режущего инструмента)  $C_{xyz}(\lambda)$ , которая принадлежит сложнопрофильной поверхности (NURBS-поверхности)  $P(u, v)$ . В соответствии с тем, что непрерывный параметр кривой находится в пределе  $0 \leq \lambda \leq 1$ , представим кривую в параметрической виде с учётом параметров передачи кривой  $u, v$ :

- NURBS-кривая в области координат  $(u, v)$ :  $C(\lambda) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$ ;
- Начальная точка NURBS-кривой в области координат  $(u, v)$ :  $C(\lambda_0) = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$ ;
- Конечная точка NURBS-кривой в области координат  $(u, v)$ :  $C(\lambda_1) = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix}$ .

В соответствии с уравнением (1) кривая  $C(\lambda)$  в области координат  $(u, v)$  может быть определена с непрерывным параметром кривой  $\lambda$ .

Следовательно, можем описать траекторию перемещения фрезы по NURBS-кривой через  $u, v$  параметры поверхности

$$C_{uv} = C(\lambda) = \begin{bmatrix} u(\lambda) \\ v(\lambda) \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i_{uv}=0}^{n_{uv}} w_{i_{uv}} \cdot P_{i_{uv}} \cdot N_{i_{uv}, k_{uv}}(\lambda)}{\sum_{i_{uv}=0}^{n_{uv}} w_{i_{uv}} \cdot N_{i_{uv}, k_{uv}}(\lambda)}; \quad 0 \leq \lambda \leq 1, \quad (5)$$



**Рис. 1. Представление NURBS-кривой на NURBS-поверхности**

где  $\begin{bmatrix} u(\lambda) \\ v(\lambda) \end{bmatrix}$  – кривая  $C(\lambda)$  размещенная в области координат  $(u, v)$ ,  $P_{i_{uv}}$  – контрольные точки кривой  $C(\lambda)$  в области координат  $(u, v)$ .

Расположение произвольной кривой следа траектории перемещения фрезы на эвольвентной поверхности (в  $xyz$  пространстве) с учётом параметров  $u, v$  в области  $u-v$  определим следующим образом [11]

$$C_{xyz} = C_{xyz}(\lambda) = P(u(\lambda), v(\lambda)) = \begin{bmatrix} x(u(\lambda), v(\lambda)) \\ y(u(\lambda), v(\lambda)) \\ z(u(\lambda), v(\lambda)) \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) \cdot N_{i,k}(v) \cdot w_{i,j} \cdot P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) \cdot N_{i,k}(v) \cdot w_{i,j}}, \quad (6)$$

где  $u(\lambda)$ ,  $v(\lambda)$  – соответствующие параметры кривой следа траектории режущего инструмента, определенные в области параметров поверхности  $u-v$ .

Таким образом, приведённые формульные выражения позволяют получить математический аппарат для интерполяции траектории перемещения фрезы по сложнопрофильной поверхности.

Во время многоосевой обработки определение перемещения режущего инструмента и заготовки базируется на соответствующих наклонах в контактных точках нормали к поверхности в точке резания ( $\alpha$ ) и касательной плоскости в той же точке ( $\beta$ ). Каждая группа наклонов ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) соответствует определённой локальной системе координат в каждой контактной точке на поверхности в определённый момент времени  $t$ . В соответствии с уравнением (6) для каждого параметра кривой  $\lambda$  в определённый момент времени  $t$  можно определить углы ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Однако важно учитывать, что ни след режущего инструмента на поверхности, ни контактные точки нормали к поверхности в точке резания и касательная плоскость в той же точке не дают полного представления о траектории перемещения режущего инструмента в условиях 5<sup>и</sup>-координатной обработки. Чтобы обеспечить качественную обработку сложнопрофильной поверхности на токарно-фрезерном горизонтальном ОЦ (соблюдая все группы наклонов) осевая точка концевой сферической фрезы ( $O_1$ ), которая находится в патроне и непосредственно корректирует перемещение настроечной точки режущего инструмента ( $O_2$ ), должна быть расположена с учетом ориентации в пространстве дополнительных рабочих органов: управляемого шпинделя с дискретными угловыми перемещениями (ось С) минимальный шаг деления у современных ОЦ достигает  $0,001^\circ$ ) и поворотной фрезерной головки для обработки наклонных плоскостей (ось В).

Важно отметить, что рассматриваемая архитектура решает обратную задачу кинематики в интерполяторе устройства управляющего станком, а не в постпроцессоре.

Месторасположение и ориентация инструмента в пространстве может быть определена путем перехода от системы координат инструмента в локальную систему координат (ЛСК), а затем в систему координат станка (СКС). Преобразование систем координат представим в следующем виде

$$\xi_{M,fp} = \begin{bmatrix} \xi_{M-x} \\ \xi_{M-y} \\ \xi_{M-z} \\ 1 \end{bmatrix} = \text{Матрица}[CKC \leftarrow LCK] \text{Матрица}[LCK \leftarrow \text{фреза}](\alpha, \beta) \xi_{fp}, \quad (7)$$

где  $\xi_{fp}$  – представление фрезы в системе координат режущего инструмента. За начало координат  $\xi_{fp}$  принимаем настроечную точку инструмента.

Метод NURBS интерполирования траектории режущего инструмента на поверхности позволяет за счёт определения местоположения точки ( $O_1$ ), ориентации шпиндельной головки и управляемого поворотного стола точно контролировать след инструмента по контактными точкам на обрабатываемой поверхности.

Необходимо отметить, что при локальном изменении траектории перемещения режущего инструмента, вследствие изменения 3D-модели изделия, перспективным является применение кривых высокого порядка. В результате анализа рациональной степени spline-кривых установили, что наиболее адекватной является 5 степень. Так как описание траектории инструмента кривыми 3-го порядка не позволяет получить высокой точности, а 6-ой порядок характеризуется большим количеством ошибок, при сшивке сегментов сплайна (подробными исследованиями в этом вопросе занимался Е.Н. Бут).

Из всего представленного материала следует, что для качественного определения траектории движения инструмента и как результата качества обработки поверхности наилучшим образом подходит NURBS интерполирование на поверхности. Для обеспечения качественного расчета траектории обработки поверхностей сложной формы, на 5<sup>н</sup>-координатных горизонтальных ОЦ данный метод оперирует следующими показателями: геометрия поверхности, набор контактных точек (в интервале u–v), наклон нормали в контактной точке к поверхности и положение касательной плоскости в этой точке ( $\alpha, \beta$ ), также большое значение имеет скорость подачи режущего инструмента.

## ВЫВОДЫ

Предложен подход к обеспечению точности описания траектории перемещения фрезы посредством интерполяции на поверхности NURBS-сплайнов, что позволит исключить неблагоприятные



старт-стоп эффекты в местах смены траектории перемещения инструмента. В отличие от известных методов интерполяции траектории инструмента разработанное решение заключается в том, что местоположение и ориентация инструмента не определены в кодах управляющей программы, в этих кодах определяется узел поверхности, который и несет информацию о местонахождении и ориентацию инструмента. Обоснованы области перспективного применения NURBS-сплайнов и сплайнов 5-го порядка. Проанализированы факторы, влияющие на точность обработки сложнопрофильной поверхности на ОЦ. Предложены теоретические зависимости для определения траектории перемещения концевой фрезы относительно поверхности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добротворский С.С. Кинематика формообразования эвольвентной и трохoidalной поверхностей при высокоскоростном концевом фрезеровании / С.С. Добротворский, Е.В. Басова // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2011. – №2. – С. 132-137.

2. Зиличихис С.Д. Влияние погрешности настройки станка и приспособления на точность обработки при высокоскоростном фрезеровании / С.Д. Зиличихис, В.А. Леонтьев, Н.В. Сахнюк // Вестник двигателестроения. – 2004. – №3. – С. 25-27.

3. Свирщёв В.И. Кинематика формообразования поверхности и геометрические параметры зоны контакта инструмента с деталью при круглом торцевом шлифовании / В.И. Свирщёв // Вестник ПГТУ. – 2010. – Т.12, №5. – С. 150-158

4. Крохин А.Н. Прогнозирование и технологическое обеспечение требуемой шероховатости поверхности деталей при чистовом круглом торцевом шлифовании автореф. дис... канд. техн. Наук: 05.02.08 / Андрей Николаевич Крохин.; Перм. гос. техн. ун-т. – П., 2009. – 20 с.

5. Иващенко Е.В. (Басова Е.В.) Исследование влияния зажимных усилий на качество обрабатываемой детали типа «Фланец» / Е.В.Иващенко (Басова Е.В.), М.В. Литвин, С.С. Добротворский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов/ Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. Ин-т». – 2010. – С.113-116.

6. Басова Е.В. Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дис.... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с. – Библиогр. : с. 214–226.

7. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел: моногр. / Г.И. Шевелева. – М.: Мосстанкин, 1999. – 494 с.

8. Chiou J.C. Five-Axis High Speed Machining of Sculptured Surfaces by Surface-Based NURBS Path Interpolation / J. C. J. Chiou, Y.-S. Lee // Computer-Aided Design and Application. – 2007. - №5(4). - pp 639-648.

9. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. - СПб.: Питер, 2004. - 560 с.

10. Piegl L.; Tiller, W.: The NURBS Book, 2nd Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1997.

11. Chiou C.J. Machining potential field approach to tool path generation for multi-axis sculptured surface machining / J. C. J. Chiou, Y.-S. Lee // Computer-Aided Design. – 2002. – 34(5). – PP. 357-371.