

УДК 65.012.122

С.А. БОЛСУНОВСКИЙ<sup>1</sup>, В.Д. ВЕРМЕЛЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Россия,

<sup>2</sup>Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Россия

## АППРОКСИМАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ОБРАБОТКИ В-СПЛАЙНАМИ ДЛЯ СТОЙКИ С ЧПУ SINUMERIK 840D

Рассматривается гладкая аппроксимация траекторий движения инструмента при высокоскоростном фрезеровании, применительно к системе управления станков с ЧПУ Sinumerik 840.

**Траектория обработки, высокоскоростная обработка, минутная подача, аппроксимация В-сплайном, гладкая траектория обработки, Sinumerik 840**

### Введение

Распространенным представлением траекторий фрезерования до настоящего времени является последовательность отрезков прямых и дуг окружностей (для плоских траекторий), отрезков прямых и сегментов винтовых линий (для пространственных). Незаметный при малых скоростях движения инструмента (минутных подачах) недостаток траекторий – наличие изломов или разрывов кривизны в точках сопряжения составляющих сегментов, становится одним из существенных факторов, ограничивающих повышение производительности обработки с высокими подачами. Это обуславливается возникновением ударных нагрузок в «жесткой» механической системе станка, снижение которых до допустимых величин требует снижения минутных подач. Повышение точности обработки неизбежно ведет к увеличению числа сегментов траектории, и движение инструмента фактически превращается в последовательность участков разгон-торможение. Для преодоления данной проблемы в современных системах управления реализуется возможность движения инструмента по траекториям, описываемым сплайном с гладкостью не хуже  $C^1$ . В частности, в системе Sinumerik 840 реализовано наиболее обобщенное описание траектории кривыми типа NURBS [1].

Некоторые аспекты его построения рассматриваются в настоящей работе.

**Постановка задачи.** Используя функции системы управления Sinumerik 840 построить описание траектории движения инструмента путем аппроксимации NURBS-кривыми с заданной точностью относительно обрабатываемой поверхности. Основной целью настоящей работы является анализ формируемых описаний по изменению кривизны, а также техническим характеристикам – длине траектории и времени обработки, при реализуемых улучшению приближения к поверхности, а также сокращению торможений в точках сопряжения сегментов.

### 1. Аппроксимация траектории сплайном Безье. Переход к В-сплайну

Разработанный применительно к решению задач обработки на станках с ЧПУ сплайн Безье [1] отличается чрезвычайно высокой наглядностью и позволяет строить эффективные аппроксимации с использованием метода наименьших квадратов при минимальных вычислительных затратах по сравнению с другими видами сплайнов [2]. Варьируемыми параметрами для него являются модули касательных векторов в точках сопряжения сегментов. Траектория определяется таблицей точек и их относительным распределением. Точность аппроксимации и гладкость непосредственно определяются количеством сегментов в аппроксимирующем сплайне. Общее выражение для сплайна Безье представляет собой частный случай выражения для В-сплайна:

$$\bar{C}(u) = \sum_{i=0}^n N_{i3}(u) \bar{P}_i,$$

где  $N_{i3}(u)$  – базисные функции В-сплайна 3-й степени, определяемые на узловом векторе;  $\bar{P}_i$  – точки опорного многоугольника В-сплайна.

При переходе к нему, учитывая обеспечиваемую сплайном Безье  $C^1$ -непрерывность в точках сопряжения, можно уменьшить кратность точек для В-сплайна. Отсюда можно получить алгоритм построения В-сплайн кривой траектории движения инструмента при фрезерной обработке. При ее построении средствами САМ-системы анализируются заданная точность обработки, а также минимальные реализуемые радиусы кривизны траектории при использовании заданного инструмента.

## 2. Задание траектории с применением встроенных функций системы управления Sinumerik 840

При обработке управляющей программы в системе управления Sinumerik 840 автоматически включается функция LookAhead, устанавливающая участки недопустимого для данной подачи изменения траектории, приводящего к повышенным нагрузкам на станок. При этом подачи автоматически уменьшаются, в результате чего, сокращается результирующая подача по траектории и увеличивается, по сравнению с расчетным, время обработки.

В программном обеспечении системы управления содержится ряд функций (определяются G-кодировкой), которые решают ряд задач:

- 1) дуговое сглаживание углов;
- 2) компенсирование инерционных подрезов за счет перерегулирования при движении с новыми подачами;
- 3) ограничение рывков при заданных в программе значительных изменений подачи на отрезках малой длины.

При проведении сглаживания в реальной траектории сохраняются изломы (на участках подвода и

отвода инструмента, при смене уровней и строк).

Разработанный аппарат включения соответствующих G-функций может быть применен и на неаппроксимированных траекториях – в виде кусочно-ломаных или ломаных с включенными сегментами в виде дуг поверхностей или винтовых линий.

Наряду с локальной обработкой исходной траектории, в состав программного обеспечения Sinumerik 840 включена глобальная функция сглаживания траектории (COMPRESS), задаваемой таблицей точек. Функция работает параллельно с процессом фрезерования. Время исполнения велико и выполнение может отставать от реального режима обработки, тормозя ее.

Отсюда, практической задачей является перенос соответствующих операций из системы управления станка с ЧПУ в САМ-систему или ее постпроцессор.

С другой стороны преимущество выполнения операции в САМ-системе является возможность параллельного анализа обрабатываемой поверхности и следовательно достижение более высокого уровня оптимизации траектории обработки.

## 3. Оценка эффективности NURBS-аппроксимации

Для проведения анализа осуществлялось численное моделирование обработки эталонной детали для следующих представлений контрольных траекторий (рис. 1): ломаная с функциями сглаживания Sinumerik, сплайн Безье, NURBS с гладкостью  $C^1$ . Кроме этого, по траектории строилась таблица точек и соответствующая ей траектория движения инструмента в функции COMPRESS системы Sinumerik 840.

На рис. 2 построена диаграмма времени обработки траектории для рассмотренных способов математического описания. Видно, что выполнение аппроксимации в САМ-системе обеспечило сокращение времени прохода по данной траектории по

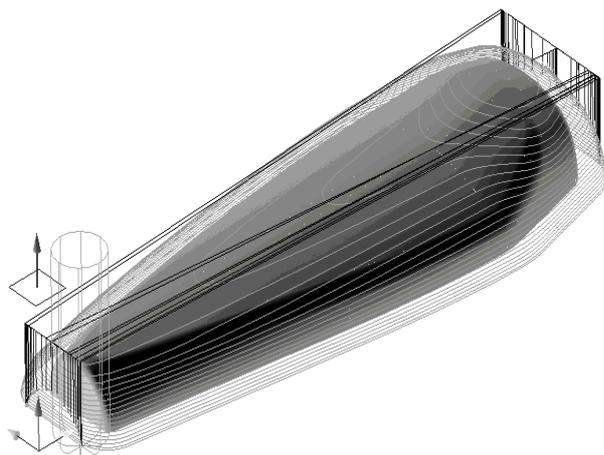


Рис. 1. Траектория обработки

сравнению с ломаной со сглаживанием углов, на ~ 6%. Снижение времени в функции COMPRESS более существенно, ~ 7,5%. В значительной степени это связано с менее жестким учетом формы обрабатываемой поверхности. При этом снижение времени обработки по сравнению с неаппроксимированной ломаной составляет ~ 15%. Для пространственных траекторий ожидается примерно такой эффект, для траекторий обработки поверхностей с малой кривизной и до ~ 50% для существенно криволинейных поверхностей.

В приведенном примере большей части траектории обработки соответствует малая кривизна, кроме этого рассматривалась обработка в компланарных плоскостях (типа Z-level), что дополнительно уменьшило протяженность криволинейных сегментов. Предполагалось, что материал детали – сталь и минутная подача ~ 6 м/мин. Для сильно криволинейных деталей, а также при использовании более высоких подач эффективность гладкой аппроксимации повышается.

### Заключение

Решена задача формирования гладкой траектории на основе сплайнов Bezier и B-сплайнов. Прове-

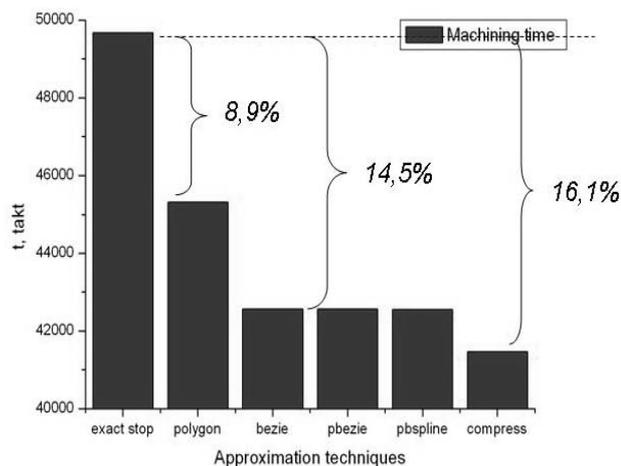


Рис. 2. Время обработки

дено численное моделирование, которое показало, что примененный подход позволяет использовать высокие подачи инструмента на всех участках траектории.

В развитие метода предполагается аппроксимация траектории B-сплайном с учетом ограничений, накладываемых динамическими характеристиками обрабатывающих центров.

### Литература

1. Piegl L., Tiller W. *The NURBS Book*. – Springer-Verlag, 1997. – 878 p.
2. Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н. Сплайны в вычислительной математике. – М.: Наука, 1986. – 228 с.
3. Sinumerik 810/840D. User manual 03/04 edition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.machinery.com.ua/machines/metal-cut/lathe>.
4. Sinumerik 810/840D. Programming guide 03/04 edition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.machinery.com.ua/machines/metal-cut/lathe>.

Поступила в редакцию 1.06.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.