

УДК 629.735.33.002: 621.9.06-529: 004.421

В. Ф. СОРОКИН, В. В. КОМБАРОВ, И. А. ТЕРНЮК*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

СТАБИЛИЗАЦИЯ КОНТУРНОЙ СКОРОСТИ В СПЛАЙНОВОМ ИНТЕРПОЛЯТОРЕ СИСТЕМЫ ЧПУ ПО КРИТЕРИЮ ВЫСОКОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрена задача обеспечения интерполятором системы ЧПУ высокой стабильности контурной скорости движения инструмента при обработке сложнофасонных поверхностей. Решение задачи сводится к высокоточному вычислению в режиме реального времени расстояния, проходимого инструментом по криволинейной траектории за один такт управления. Разработана классификация методов стабилизации контурной скорости. Показано, что непрямой безитерационный метод вычисления тактовой длины траектории является самым экономичным по объему вычислений. Проблема сокращения объема вычислений решена использованием вспомогательной функции, связывающей длину траектории с параметром её математической модели. Время вычисления значения вспомогательной функции не зависит от её размера. Разработан алгоритм безитерационного метода стабилизации контурной скорости. Результаты эксперимента подтвердили высокое быстродействие данного метода.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, система ЧПУ, сплайновая интерполяция, скорость, стабилизация.

Введение

Одной из проблем, стоящих перед разработчиками технологических процессов высокоскоростной обработки деталей на станках с ЧПУ, является обеспечение плавности изменения кинематических параметров движения рабочих органов оборудования (скорости, ускорения, рывка) [0 - 3].

Решение этой проблемы зависит не только от планирования гладких траекторий обработки и плавных графиков изменения контурной скорости движения инструмента, но и от точности реализации этих планов в системе числового программного управления оборудованием.

Важно в интерполяторе системы ЧПУ в режиме реального времени точно вычислять длину участка траектории обработки, проходимую инструментом за время одного такта управления (0,001 сек). Некорректная и неточная оценка тактовой длины траектории приводит к нежелательным резким колебаниям контурной скорости и, как следствие, к скачкам в графиках осевых скоростей, ускорений и рывков [4].

Такие скачки нивелируют плавность теоретических траекторий и графиков скоростей, а при увеличении рабочих подач обработки отрицательно влияют на динамику работы оборудования и существенно повышают погрешность позиционирования его рабочих органов.

Процесс максимально-точного вычисления тактовой длины траектории обработки в интерполяторе системы ЧПУ называется *стабилизацией контурной скорости*.

Как показывает практика, для современного оборудования с ЧПУ необходимо обеспечивать стабильность контурной скорости на каждом такте управления на уровне 0,001%.

В работе [5] приведен алгоритм решения задачи вычисления тактовой длины криволинейной траектории обработки, обеспечивающий стабильность контурной скорости в диапазоне (- 0,11 %, +0,09 %).

Очевидно, что этот результат не обеспечивает заданного уровня стабильности контурной скорости при высокоскоростной обработке.

В тезисах доклада [6] авторами предложено три метода, обеспечивающих необходимый уровень стабилизации контурной скорости, а в статье [7] разработан метод прямой стабилизации, отличающийся возможностью получения результата с любой заданной точностью, но в то же время и с самым низким (из трех) быстродействием.

Целью данной статьи является разработка алгоритма стабилизации контурной скорости по критерию высокого быстродействия, применение которого целесообразно в интерполяторах систем ЧПУ, имеющих вычислительные устройства низкой производительности.

1. Математическая постановка задачи стабилизации контурной скорости

Для простоты восприятия, постановку задачи стабилизации контурной скорости рассмотрим на классическом примере трехкоординатной обработки.

Представим математическую модель траекто-

рии движения инструмента при обработке на оборудовании с программируемыми осями X, Y, Z (рис.1) в виде векторного параметрического уравнения

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u), \quad u \in [u_0, u_n], \quad (1)$$

где u_0 – параметр в начальной точке кривой;
 u_n – параметр в конечной точке кривой.

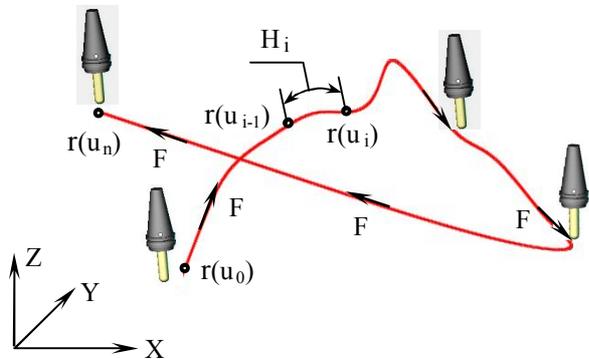


Рис. 1. Траектория движения инструмента

Скалярная форма этого уравнения имеет вид:

$$X = x(u), \quad Y = y(u), \quad Z = z(u). \quad (2)$$

С одной стороны, длина участка траектории обработки на интервале $u \in [u_{i-1}, u_i]$ определяется по формуле

$$S(u_{i-1}, u_i) = \int_{u_{i-1}}^{u_i} \sqrt{\left[\frac{\partial x(u)}{\partial u} \right]^2 + \left[\frac{\partial y(u)}{\partial u} \right]^2 + \left[\frac{\partial z(u)}{\partial u} \right]^2} du. \quad (3)$$

С другой стороны, расстояние перемещения инструмента с заданной контурной скоростью F за время одного такта управления τ определяется соотношением

$$H = F \cdot \tau \quad (4)$$

и называется *тактовой длиной траектории*.

Величина тактовой длины траектории численно равна *тактовой скорости*, то есть перемещению, совершаемому инструментом за один такт управления.

Тогда задача стабилизации контурной скорости сводится к решению интегрального уравнения

$$S(u_{i-1}, u_i) = H \quad (5)$$

с целью определения неизвестного значения параметра u_i и последующего расчета по математической модели (2) координат точки $\mathbf{r}(u_i)$, отстоящей от точки $\mathbf{r}(u_{i-1})$ на расстояние H_i (рис. 1), отличающееся от заданной соотношением (4) тактовой длины траектории на величину вычислительной погрешности, которую принято оценивать в процентах и рассчитывать по формуле

$$\delta_i = \frac{H_i - H}{H} \cdot 100\%, \quad i = \overline{1..n}, \quad (6)$$

где H – заданная соотношением (4) тактовая длина траектории; H_i – фактическая тактовая длина траектории на i -м цикле управления; n – количество циклов управления, необходимых для движения по траектории

$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u)$ на интервале $[u_0, u_n]$.

Мерой стабильности контурной скорости на всем рассматриваемом участке криволинейной траектории служат показатели:

$\delta_{\min} = \min(\delta_i)$ – минимальная погрешность ($H_i < H$);

$\delta_{\max} = \max(\delta_i)$ – максимальная погрешность ($H_i > H$);

$\delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\delta_i|$ – средняя погрешность;

$\delta_{\text{ср кв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}}$ – среднеквадратичная погрешность.

Нетривиальность задачи (5) заключается в том, что она решается в режиме реального времени для каждого цикла управления и вычислительное устройство интерполятора системы ЧПУ должно справляться с ней за время существенно меньшее одного такта управления (например, $\tau = 0,001$ сек).

2. Классификация методов стабилизации контурной скорости

Рассуждения предыдущего раздела позволяют сделать обобщающий вывод, что задачу вычисления тактовой длины траектории (стабилизации контурной скорости) обработки можно решать в математической постановке (3) - (5) для любых интерполяторов систем ЧПУ, включая классические линейно-круговые.

Просто для траекторий, заданных отрезками прямых линий или дугами окружностей, интеграл (3) берется аналитически, и задача стабилизации контурной скорости сводится к прямому расчету значений тактовой длины по достаточно простым алгебраическим выражениям. Очевидно, что с такой задачей справится любое современное вычислительное устройство.

Иначе обстоит дело с криволинейными траекториями, которые задаются сплайн-функциями, эвольвентами, спиралями Архимеда и др.

В этом случае интегральное уравнение (5) приходится решать итерационными численными методами в режиме реального времени, а качество решения поставленной технической задачи зависит от множества таких факторов, как: быстродействие и объем памяти вычислительного устройства системы ЧПУ; структура и организация работы интерполятора; информативность и вычисляемость метода геометрического моделирования траекторий движения инструмента; разнообразие и эффективность методов стабилизации контурной скорости и др.

Организация работы интерполяторов в современных системах ЧПУ достаточно гибкая и предоставляет много возможностей для выбора методов

решения технологических задач.

Структурно интерполятор системы ЧПУ для высокоскоростной обработки целесообразно строить по двухуровневой схеме (рис. 2).

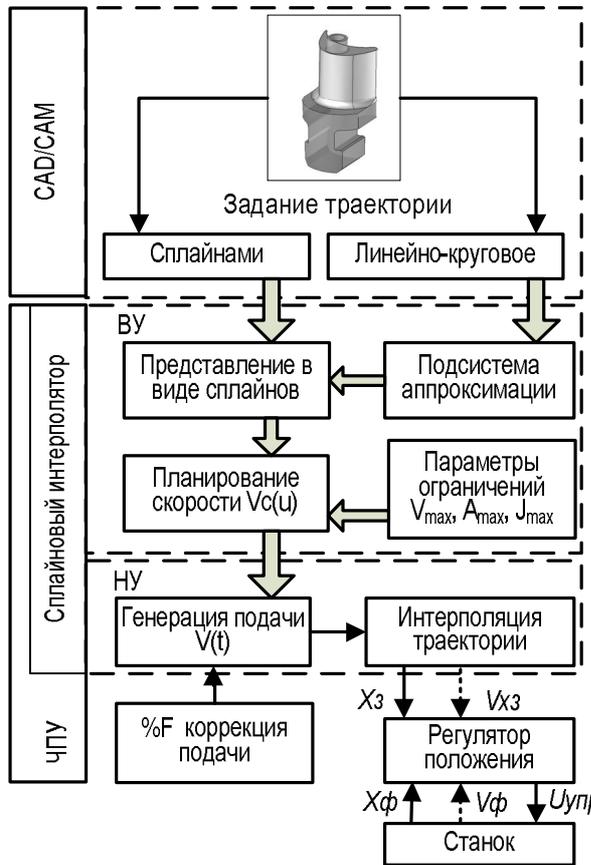


Рис. 2. Структурная схема системы ЧПУ со сплайновым интерполятором

На верхнем уровне (ВУ) решаются задачи не требующие режима реального времени, а задачи нижнего уровня (НУ) решаются в режиме реального времени.

Среди задач верхнего уровня необходимо выделить два блока. Блок «представление в виде сплайнов» обеспечивает формирование математической модели криволинейной траектории движения инструмента, а блок «планирование подачи» - формирование программы плавного изменения контурной скорости движения инструмента внутри кадра с учетом гладких законов разгона-торможения и ограничений оборудования. Кроме того существует блок подготовительных расчетов, задачей которого является подготовка вспомогательных данных для снижения вычислительной нагрузки нижнего уровня.

Расчет тактовой длины траектории осуществляется на нижнем уровне интерполятора, а время и точность решения задачи, на которые, как отмечалось ранее, накладываются жесткие ограничения, зависят от эффективности используемого метода.

Методы стабилизации контурной скорости

можно классифицировать по способу решения интегрального уравнения (5) при вычислении тактовой длины траектории в интерполяторе системы ЧПУ.

По данному показателю целесообразно разделить методы стабилизации на два класса: *прямые* и *непрямые* (табл. 1).

Таблица 1

Классификация методов стабилизации скорости

Класс метода	Способ решения
Прямой	Аналитический
	Численный
Непрямой	Итерационный
	Безитерационный

Прямым методом стабилизации будем называть метод, обеспечивающий решение интегрального уравнения (5) и вычисление тактовой длины траектории целиком на нижнем уровне интерполятора без использования полученных на верхнем уровне вспомогательных функций.

Соответственно методы, использующие для расчета тактовой длины кроме уравнения траектории обработки (1) еще и некоторые вспомогательные функции, будем называть *непрямыми методами интерполяции*.

В свою очередь прямые методы можно разделить на *аналитические* и *численные*, а непрямые – на *итерационные* и *безитерационные*.

В *аналитических методах* осуществляется прямое вычисление тактовой длины траектории по алгебраическим выражениям, полученным при аналитическом решении интегрального уравнения (5). Эти методы самые точные и быстродействующие, но их использование ограничено интегрируемыми функциями для моделирования траекторий обработки (например, отрезками прямых и дугами окружностей в линейно-круговых интерполяторах).

Численные прямые методы базируются на итерационном алгоритме решения уравнения (4), при котором значение u_i , обеспечивающее выполнение условия

$$\frac{|S(u_1, u_2) - F \cdot \tau|}{F \cdot \tau} \cdot 100 < \epsilon,$$

определяется путем целенаправленного изменения на каждой итерации параметра u_i и многократного численного вычисления интеграла (3). Эти методы универсальны и обеспечивают стабилизацию контурной скорости с заданной допустимой погрешностью ϵ , однако обладают относительно низким быстродействием, что мешает использовать их в интерполяторах систем ЧПУ с вычислительными устройствами низкой производительности.

Описание эффективного прямого численного метода стабилизации контурной скорости для сплайнового интерполятора приведено в работе [7].

Использование не прямых методов стабилизации контурной скорости мотивировано желанием сокращения вычислительной работы в реальном времени на нижнем уровне интерполятора за счет переноса части вычислений на верхний уровень. Естественно это приведет к увеличению погрешности получаемого результата и к появлению дополнительной информации, которую необходимо передавать с верхнего уровня интерполятора на нижний перед началом обработки каждого сегмента траектории.

В итерационных не прямых методах стабилизации контурной скорости исключается процесс численного вычисления интеграла (3), но остается итерационный процесс определения параметра u_i .

Осуществить эту стратегию можно, если на верхнем уровне интерполятора создать вспомогательную аналитически интегрируемую функцию, аппроксимирующую подинтегральную функцию

$$f(u) = \sqrt{x'(u)^2 + y'(u)^2 + z'(u)^2}$$

на всей области определения сегмента траектории обработки $u \in [u_0, u_n]$.

Для этого на верхнем уровне интерполятора производится предварительное вычисление подинтегральной функции $f(u_k)$ в некоторых опорных точках $u_k \in [u_0, u_n]$ с последующей аппроксимацией полученных пар чисел (u_k, f_k) вспомогательной аналитически интегрируемой функцией $\hat{f}(u)$, которая передается на нижний уровень интерполятора до начала ЧПУ обработки данного участка траектории. При этом на нижнем уровне в реальном времени осуществляется такой же, как в прямом методе итерационный процесс с аналитическим вычислением интеграла вспомогательной функции $\hat{f}(u)$.

Кроме погрешности ε , источником вычислительных погрешностей этих методов является погрешность аппроксимации при создании вспомогательной функции $\hat{f}(u)$.

В безитерационных методах стабилизации контурной скорости исключается любой итерационный вычислительный процесс.

Очевидно, что это условие минимизирует время вычисления тактовой длины криволинейной траектории (не считая аналитических методов) и является предметом дальнейшего исследования этой работы.

3. Вычисление тактовой длины траектории безитерационным методом

Осуществить такую стратегию можно, если вспомогательная функция свяжет параметр u уравнения траектории движения инструмента (1) с длиной пути $S(u_0, u)$ от начальной точки $\Gamma(u_0)$ до точки $\Gamma(u)$.

В обобщенной форме эта функция должна иметь вид

$$u = \varphi(S), \quad S \in [0, S_n], \quad (7)$$

$$\text{где } S_n = S(u_0, u_n) = \int_{u_0}^{u_n} \sqrt{x'(u)^2 + y'(u)^2 + z'(u)^2} du.$$

Для создания этой функции вначале на верхнем уровне интерполятора в некоторых опорных точках $u_k \in [u_0, u_n]$ осуществляется численное вычисление интеграла, например по правилу Симпсона

$$S_k = S(u_0, u_k) = \int_{u_0}^{u_k} \sqrt{x'(u)^2 + y'(u)^2 + z'(u)^2} du \quad k=1...m,$$

где m – количество выбранных опорных точек.

Затем полученные пары чисел (S_k, u_k) аппроксимируются с высокой точностью некоторой стандартной функцией (например, сплайн-функцией) на всей области определения $S_k \in [0, S_n]$ и области изменения $u_k \in [u_0, u_n]$ табличных данных.

Для решения задачи аппроксимации предлагается использовать метод оптимального отображения в пространство В-сплайнов с линейной функцией отображения и базисными функциями третьей или пятой степени [8, 9]. В этом случае сплайн-функция для моделирования вспомогательной функции $\varphi(S)$ будет иметь вид

$$u = \varphi(S) = \sum_{j=1}^{N+1} C_j \cdot B_3 \left(\frac{N}{S_n} \cdot S - j \right), \quad (8)$$

где N – размерность пространства В-сплайнов;

C_j – действительные коэффициенты;

$B_3(u)$ – экономичная форма базисного В-сплайна третьей степени, имеющая следующее представление

$$B_3(u) = \frac{1}{6} \cdot \begin{cases} 4 - 3 \cdot (2 - |u|) \cdot u^2, & |u| < 1, \\ (2 - |u|)^3, & 1 \leq |u| < 2, \\ 0, & |u| \geq 2. \end{cases}$$

Параметры вспомогательной функции (8) передаются на нижний уровень интерполятора до начала ЧПУ обработки данного сегмента траектории.

При этом на нижнем уровне в реальном времени осуществляется прямое вычисление по формуле (8) значения параметра u_i , которое соответствует текущей точке позиционирования инструмента в конце i -го такта управления, отстоящей от начальной точки траектории $\Gamma(u_0)$ на расстояние, рассчитываемое по формуле

$$S_i = N \cdot \tau \cdot i, \quad i = \overline{1..n},$$

с последующим вычислением по математической модели (2) координат точки $\Gamma(u_i)$.

Для создания математической модели (1, 2)

траектории обработки также целесообразно использовать метод оптимального отображения в пространство В-сплайнов [8, 9], но с базисными функциями не ниже пятой. Обоснование этого утверждения содержится в работах [2, 10, 11].

Финитность базисных сплайнов $B_3(u)$, $B_5(u)$ в математических моделях траектории обработки (2) и вспомогательной функции (8), а также отсутствие итерационных вычислительных процессов обеспечивает заявленное высокое быстродействие представленного непрямого метода стабилизации контурной скорости.

Иначе обстоит дело с достижением необходимой точности результата. Источником вычислительных погрешностей данного метода является погрешность численного интегрирования и погрешность приближения функции (7) аппроксимируемой функцией (8) при создании вспомогательной функции $\varphi(S)$, которая может достигать значительных величин.

Следует заметить, что стратегия с построением вспомогательной функции (7) использовалась также в работе [5], где была получена неудовлетворительно-высокая погрешность стабилизации контурной скорости в диапазоне $\delta_{\min} = -0,11\%$; $\delta_{\max} = 0,09\%$.

Скорее всего, неудовлетворительный результат связан с отсутствием управления точностью приближения функции (7) при расчете табличных данных (S_k, u_k) и аппроксимации их вспомогательной функцией (8).

Повышать точность приближения функции (7) можно, увеличивая количество выбранных опорных точек в таблице (S_k, u_k) . Однако, условием успешности влияния операции увеличения количества опорных точек на точность стабилизации контурной скорости является возможность аппроксимации всех этих точек на всей области определения $S_k \in [0, S_n]$ табличных данных единственной функцией $\varphi(S)$.

Это условие выполняется при использовании приближающей функции (8) и метода оптимального отображения в пространство В-сплайнов.

Возможности получения высокого быстродействия и необходимой точности стабилизации контурной скорости непрямым безитерационным методом покажем на численном примере.

4. Численный эксперимент

Численный эксперимент для проверки точности и быстродействия прямого метода стабилизации контурной скорости проведем на сегменте криволинейной траектории движения инструмента дли-

ной 155,6 мм (рис. 1). Математическая модель траектории задана сплайн-функцией пятой степени, состоящей из 18 звеньев, то есть $u \in [0, 18]$.

График вспомогательной функции $u = \varphi(S)$ представлен на рисунке 2.

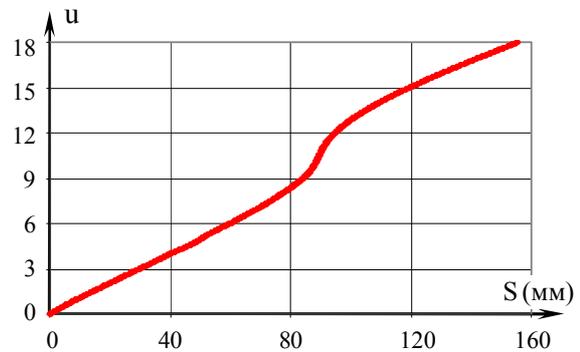


Рис. 2. График вспомогательной функции

Зададим частоту цикла управления $f_{\text{ц}} = 1000$ Гц и контурную подачу обработки $F = 3000$ мм/мин.

Тогда величина такта управления будет равна $\tau = 0,001$ сек.; шаг интерполяции $H = 0,05$ мм, а общее количество рассчитываемых интерполятором точек траектории $n = 3112$.

Выполним расчет для нескольких значений параметра m (табл. 2). Этот параметр определяет количество опорных точек (S_k, u_k) для создания вспомогательной функции $\varphi(S)$ и, как правило, соответствует количеству звеньев N в аппроксимирующей функции (8). В результате расчета определим погрешность стабилизации контурной скорости.

Анализ результатов показывает, что для получения данным методом необходимого уровня точности стабилизации контурной скорости ($\delta \approx 0,001\%$), требуется вспомогательная сплайн-функция с количеством звеньев (коэффициентов C_j) в 20 – 50 раз превышающих количество звеньев в сплайн-функциях, задающих траекторию обработки (2). Для более плавной, чем представлена на рисунке 1, траектории, очевидно, потребуется вспомогательная функция (8) с относительно меньшим количеством звеньев. Однако указанный здесь факт, безусловно, относится к недостаткам рассматриваемого метода.

Таблица 2

Погрешность стабилизации контурной скорости

m	$\delta_{\min} (\%)$	$\delta_{\max} (\%)$	$\delta_{\text{ср}} (\%)$	$\delta_{\text{ср кв}} (\%)$
180	-0,4490	0,5218	0,00868	0,04155
360	-0,0360	0,0352	0,00059	0,00285
540	-0,0066	0,0067	0,00012	0,00055
720	-0,0022	0,0034	0,00004	0,00018

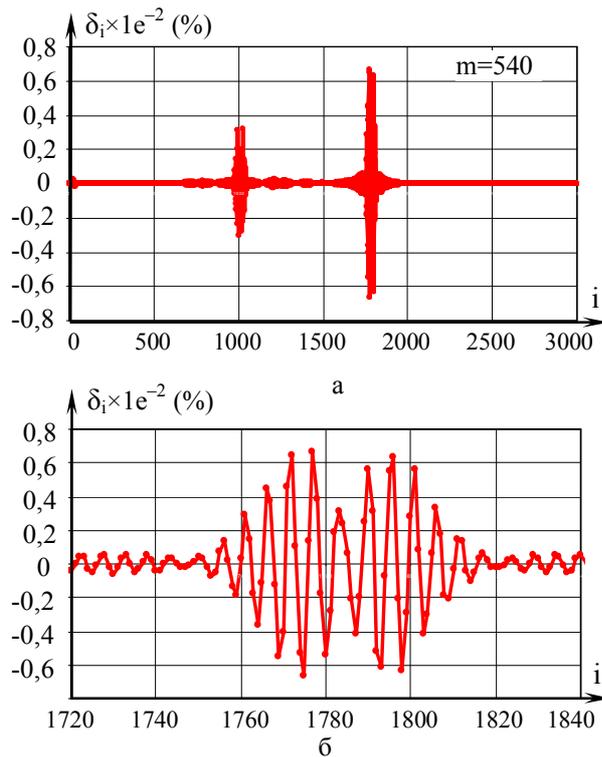


Рис. 3. График изменения погрешности стабилизации скорости: а – на всей траектории обработки; б – на участке максимальной погрешности

На графике изменения погрешности стабилизации контурной скорости (рис. 3) присутствует два пика роста значений погрешности. Пики соответствуют участкам траектории, имеющим максимальную кривизну профиля, на которых, как правило, подача обработки снижается. В то же время даже на этих участках погрешность хотя и осциллирует, но изменяется от минимума к максимуму плавно (рис. 3,б).

Указанные факторы можно отнести к достоинствам описываемого непрямого метода стабилизации контурной скорости.

Быстродействие метода оценим, рассчитав среднее время вычисления тактовой длины траектории, приведенное к величине такта управления (в процентах)

$$K_{\text{ср}} = \frac{T}{n \cdot \tau} \cdot 100, \quad (9)$$

где $K_{\text{ср}}$ – среднее время расчета тактовой длины (%); T – общее время интерполяции всей траектории (сек).

Вычисления проводились на серийном компьютере с процессором средней производительности Intel T3100, 1,9 ГГц.

В результате для вспомогательной функции (8) с любым количеством звеньев получено общее время интерполяции всей траектории $T < 0,06$ сек.

Подставив это значение в формулу (9), получим оценку $K_{\text{ср}} < 1,9\%$, то есть среднее время вы-

числения процессором средней производительности тактовой длины траектории занимает не более двух процентов от времени одного цикла управления.

Таким образом, представленный метод стабилизации контурной скорости отвечает критерию высокого быстродействия.

Заключение

Разработана классификация методов решения задачи стабилизации контурной скорости в интерполяторах систем ЧПУ.

Показано, что наиболее точным является метод прямого вычисления тактовой длины криволинейной траектории, а наиболее экономичным с точки зрения вычислений в режиме реального времени – не прямой безитерационный метод.

Проблема сокращения вычислительной нагрузки на нижнем уровне интерполятора решена использованием вспомогательной функции связывающей длину траектории обработки с параметром математической модели этой траектории. При этом время вычисления значения вспомогательной функции не зависит от её размера.

Результаты эксперимента подтвердили высокое быстродействие данного метода, обеспечивающего вычисление тактовой длины криволинейной траектории на серийном процессоре средней производительности за время, не превышающее двух процентов времени одного цикла управления системы ЧПУ.

Литература

1. Петраков, Ю. В. Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ [Текст] : моногр. / Ю. В. Петраков. – К. : Січкара, 2011. – 220 с.
2. Кривцов, В. С. Проблемы сплайновой интерполяции с гладко-ограниченными кинематическими параметрами движения в задачах числового программного управления высокоскоростным оборудованием [Текст] / В. С. Кривцов, В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9(96). – С. 11 – 19.
3. Beudaert, X. Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path [Text] / X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier // *International J. of Machine Tools & Manuf.* – 2012. – Vol. 57. – P. 73 – 82.
4. Heng, M. Feedrate Optimization of Spline Toolpaths on Machine Tools with Dynamic Uncertainty [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // *Proceedings of the 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, June 3-7, 2007*. – 12 p.
5. Heng, M. Design of a NURBS Interpolator with minimal feed fluctuations and continuous feed modulation capability [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // *International J. of Machine Tools & Manuf.* – 2010. – Vol. 50(3).

– Р. 281 – 293.

6. Сорокин, В. Ф. Методы стабилизации контурной скорости для сплайновых интерполяторов систем ЧПУ [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров, И. А. Тернюк // *Прогрессивная техника, технология и инженерное образование : тез. докл. XIV Междунар. научно-техн. конф. 25 – 28 июня 2013 г. – К. : НТУУ «КПИ», 2013. – Ч.2. – С. 32 – 35.*

7. Сорокин, В. Ф. Метод прямой стабилизации контурной скорости для сплайнового интерполятора системы ЧПУ [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров, И. А. Тернюк // *Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 9(106). – С. 11 – 19.*

8. Сорокин, В. Ф. Математическая модель сложноточной поверхности для адаптивного программного управления металлообрабатывающим оборудованием [Текст] / В. Ф. Сорокин // *Технологические системы. – 2002. – № 5 (16). – С. 44 – 51.*

9. Сорокин, В. Ф. Модифицированный метод

приближения функций В-сплайнами [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. А. Леховицер, Е. Н. Бут // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3. – Х., 1999. – С. 28 – 38.*

10. Сорокин, В. Ф. Сравнение кинематических параметров движения при моделировании траектории высокоскоростной ЧПУ обработки сплайнами третьей и пятой степени [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // *Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8(95). – С. 11 – 17.*

11. Сорокин, В. Ф. Влияние математических параметров гладких траекторий высокоскоростной обработки на кинематические параметры движения рабочих органов оборудования [Текст] / В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения : междунар. сб. науч. тр. ДонНТУ. – Донецк, 2012. – № 1,2 (44). – С. 231 – 237.*

Поступила в редакцию 31.05.14, рассмотрена на редколлегии 14.06.214

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф., проректор по НР А. В. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

СТАБІЛІЗАЦІЯ КОНТУРНОЇ ШВИДКОСТІ В СПЛАЙНОВОМУ ІНТЕРПОЛЯТОРІ СИСТЕМИ ЧПУ ЗА КРИТЕРІЄМ ВИСОКОЇ ШВИДКОСТІ

В. Ф. Сорокін, В. В. Комбаров, І. О. Тернюк

Розглянуто завдання забезпечення інтерполятором системи ЧПУ високої стабільності контурної швидкості руху інструмента при обробці складно фасонних поверхонь. Розв'язання завдання зводиться до високоточного обчислення в режимі реального часу дугової відстані, яку проходить інструмент по криволінійній траєкторії за один такт управління. Розроблено класифікацію методів стабілізації контурної швидкості. Показано, що непрямий безітераційний метод обчислення тактової довжини траєкторії являється самим економічним за обсягом обчислень. Проблема скорочення обсягу обчислень вирішено використанням допоміжної функції, що зв'язує довжину траєкторії з параметром її математичної моделі. Час обчислення значення допоміжної функції не залежить від її розміру. Розроблено алгоритм безітераційного методу стабілізації контурної швидкості. Результати експерименту підтвердили високу швидкодію цього методу.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, система ЧПУ, сплайн, інтерполяція, швидкість, стабілізація.

STABILIZATION OF CONTOUR FEEDRATE FOR THE SPLINE INTERPOLATOR CNC SYSTEM BY HIGH PROCESSING SPEED CRITERION

V. F. Sorokin, V. V. Kombarov, I. A. Ternyuk

The task of providing of high stability of contour feedrate of tool movement with CNC system interpolator when processing of complex surfaces is considered. The solution of this problem is reduced to the high-precision calculation of the arc distance that the tool passes along a curvilinear path at a single control cycle in real time. The classification of methods of stabilization of contour feedrate is developed. There is shown that indirect non-iterative method of calculation of the arc distance that the tool passes along a curvilinear path at a single control cycle is the most economical in the amount of calculations. The problem of reducing the amount of calculations is solved using auxiliary function. This function connects arc distance of a curvilinear path with the parameter of its mathematical model. Time of calculating of the value of the auxiliary function is independent of its size. Algorithm of non-iterative method of stabilization of feedrate is developed. The experimental results confirmed the high processing speed of this method.

Key words: high-speed milling, CNC system, spline interpolation, feedrate, stabilization.

Сорокин Владимир Федорович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

Комбаров Владимир Викторович – науч. сотр. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

Тернюк Игорь Александрович – аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».