

УДК 621.9.06-529:621.91

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

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ КОНТУРНОЙ ПОДАЧИ В СИСТЕМЕ ЧПУ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ НА ПРИМЕРЕ КРУГОВОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Рассмотрена модель взаимодействия модулей «Интерполятор» и «Регулятор положения» для системы ЧПУ. Выполнена оценка свойств информативности и вычисляемости для традиционной модели взаимодействия модулей. Показано, что значительное искажение дифференциальных кинематических характеристик свойственно для традиционного метода задания движения с помощью потактового изменения интерполяционного положения. Метод не обладает свойством вычисляемости при управлении высокоскоростным оборудованием. Предложено изменение структуры модели. Проанализированы требования к стабильности задания контурной подачи при интерполяции. Показано, что для высокоскоростной обработки необходим уровень точности задания подачи порядка 0,0001%. Разработан метод круговой интерполяции скорости и положения, обеспечивающий заданный уровень стабильности скорости управляемых осей. Описана структурная схема регулятора положения, обеспечивающая управление положением с учетом скорости, ускорения и рывка.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, система ЧПУ, интерполяция, скорость, ускорение, рывок, стабильность, погрешность.

Введение

В настоящее время в авиационной промышленности возросла потребность в повышении эффективности и качества производства сложнофазонных деталей изготавливаемых на оборудовании с ЧПУ. Применение современного режущего инструмента обеспечивает возможность повышения технологических подач. Однако, простое повышение скорости обработки на существующем станочном оборудовании приводит к снижению точности обработки. Основной причиной снижения точности является увеличение инерционных нагрузок и динамических погрешностей движения рабочих органов станков при высоких подачах. Для снижения погрешностей, в том числе, динамических проводятся исследования в различных направлениях, в частности:

– совершенствование методов задания траектории [1, 2, 5, 13, 14]. Недостатки линейной аппроксимации криволинейной траектории хорошо известны. Это потеря точности обработки; нарушение кинематической и динамической стабильности процесса, особенно важной при высокоскоростной обработке. Применение сплайновой интерполяции обеспечивает плавность изменения кинематических характеристик. Однако замена дуг окружностей сплайнами приводит к искажению кинематических характеристик ускорения и рывка, что приводит к погрешности формообразования [5]. По этой причине интерполятор системы ЧПУ для высокоскоростной обра-

ботки должен поддерживать возможность всех видов интерполяции: линейной; круговой, сплайновой. При этом требования по обеспечению стабильности контурной подачи должны быть одинаковыми для всех видов интерполяции;

– совершенствование структуры регулятора положения, направленное на увеличение порядка дифференциальных кинематических характеристик, используемых при управлении электроприводом. Предлагаются структуры, использующие компенсационное управление с учетом скорости, ускорения и рывка при управлении формообразующими движениями [3, 12];

– повышение частоты цикла, что увеличивает быстродействие системы ЧПУ, уменьшает погрешность аппроксимации траектории, но отрицательно сказывается на возможности наблюдения кинематических параметров движения [7].

Однако развитие отдельных модулей не сопровождается изменением общей модели взаимодействия модулей «Интерполятор» и «Регулятор положения». В процессе совершенствования отдельных модулей не осуществляется анализ свойств информативности и вычисляемости используемых моделей взаимодействия. Не уточняются или вообще не формулируются требования к стабильности задания скорости и других дифференциальных характеристик движения рабочих органов станков.

Учитывая эти замечания, возможно, сформулировать требования к стабильности задания подачи для систем высокоскоростной обработки.

Целью статьи является разработка требований к составу и точности интерполируемых данных положения и стабильности задания подачи, необходимых для организации управления с минимальной динамической ошибкой позиционирования.

1. Информативность и вычисляемость модели управления положением в контурной системе ЧПУ

Структурная схема, отражающая основные этапы обмена данными в двухуровневой системе ЧПУ при контурной обработке представлена на рис. 1. Данные о формообразующем движении для каждой управляемой оси рассчитываются в блоке интерполяции и передаются в блок регулятора положения. Канал обмена данными между этими блоками имеет ограниченную пропускную способность. Поэтому управляющее задание, передаваемое из блока интерполяции в блок регулирования положения, должно обладать свойством достаточной информативности и вычисляемости.

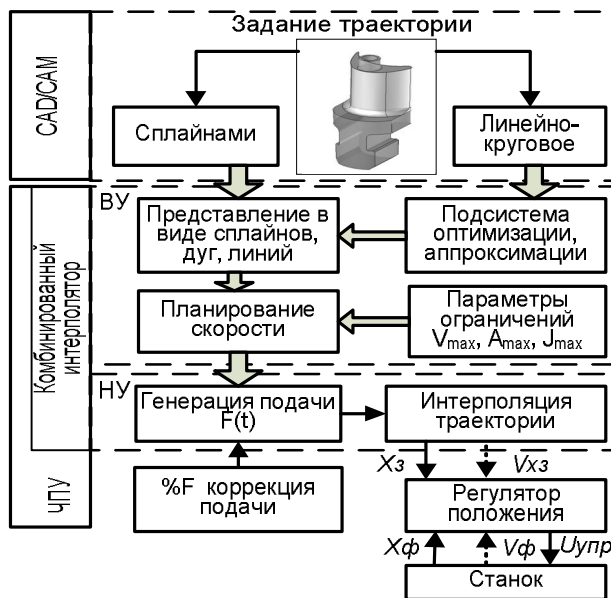


Рис. 1. Структурная схема двухуровневой системы ЧПУ

Информационность – это наличие структуры данных, которая обеспечивает эффективное формирование, поиск, передачу и хранение данных, необходимых для организации управления. Вычисляемость – это наличие простых и экономичных алгоритмов вычисления основных геометрических и дифференциальных характеристик движения, необходимых для организации управления.

Традиционно, исходными данными для работы регулятора являются данные о заданном положении (X_3), и данные обратной связи о фактическом положении управляемого органа ($X_ф$). В регулятор не передается информация о дифференциальных ха-

рактеристиках траектории и для организации управления с компенсацией по скорости эту информацию приходится восстанавливать по конечным разностям данных траектории. Заданная скорость V_3 определяется как первая конечная разность изменения кода положения за такт управления. [3, 13] и соответствует скорости *интерполяционного изменения положения рабочего органа* за такт управления

$$V_{3(i)} = (X_{3(i)} - X_{3(i-1)}) / \tau, \quad (1)$$

где i – порядковый номер такта управления;

$X_{3(i)}$ – заданное положение органа;

τ – длительность цикла управления.

Управляющее воздействие приводу $U_{упр}$ для пропорционально интегрально дифференциального (ПИД) регулятора с компенсацией по скорости рассчитывается по выражению:

$$U_{упр(i)} = k_p \cdot \varepsilon(i) + k_d \cdot \Delta \varepsilon(i) + k_{int} \cdot \sum_{j=0}^i \varepsilon(j) + k_v \cdot V_{3(i)}, \quad (2)$$

где $\varepsilon(i) = X_{3(i)} - X_{факт(i)}$ – ошибка положения;

$X_{факт(i)}$ – фактическое положение органа;

k_p – коэффициент добротности по положению;

k_d – коэффициент дифференциальной составляющей ошибки положения;

k_{int} – коэффициент интегральной составляющей ошибки положения;

k_v – коэффициент передачи по скорости.

При необходимости использования в управлении величин ускорения (a_3) и рывка (J_3), применяются конечно-разностные выражения [3, 13]:

$$a_{3(i)} = (V_{3(i)} - V_{3(i-1)}) / \tau; \quad (3)$$

$$J_{3(i)} = (a_{3(i)} - a_{3(i-1)}) / \tau. \quad (4)$$

Таким образом, информативность задающего воздействия обеспечивается потоком данных о тактовом изменении положения (X_3), а вычисляемость применением конечно-разностного дифференцирования для получения данных о дифференциальных кинематических характеристиках движения.

2. Искажение дифференциальных кинематических характеристик движения при интерполяционном задании перемещения

Модель управления положением в контурной системе (2), и требования к дискретности и разрядности задания положения (X_3) как характеристики информативности управляющего параметра сформированы для технологических систем металлообработки в 80-х годах прошлого столетия. Изменение технологических режимов механообработки опре-

деляет повышение частоты управляющего цикла (Hz) систем ЧПУ. Устойчивая тенденция применения в управлении компенсаций по дифференциальным характеристикам кинематических параметров, повышение требований к порядку дифференцирования (скорость, ускорение, рывок) порождают необходимость проверки достаточности свойств *информативности* и *вычислимости* заданного положения (X_3) как управляющего параметра.

При исследовании разрядности параметров заданного (X_3) положения с точки зрения информативности задающего воздействия необходимо учитывать как изменение абсолютных величин кинематических параметров, реализуемых в технологическом процессе, так и особенности их представления в масштабе машинного времени системы ЧПУ. Во внутреннем представлении системы ЧПУ технологическая подача (F [мм/мин]) преобразуется к тактовой скорости (F_τ [дискр/такт])

$$F_\tau = (F \cdot 1000) / (60 \cdot \text{Hz}). \quad (5)$$

Увеличение частоты цикла управления при ограничении дискретности задания положения значительно сокращает диапазон изменения тактовой скорости (F_τ) и усложняет получение дифференциальных кинематических характеристик.

Задание положения в системе ЧПУ осуществляется в виде целочисленного кода с дискретностью равной дискретности измерения положения. Для исключения накопления погрешности при задании координат точек траектории не допускается применение дробных представлений положения. В результате тактовая интерполяционная скорость перемещения оси ($V_{3(i)}$) при задании движения с постоянной скоростью (F_τ) может принимать два значения, соответствующие целочисленному округлению тактовой скорости в большую и меньшую сторону

$$V_{3(i)} = \begin{cases} \text{int}^+ (F_\tau) \\ \text{int}^- (F_\tau) \end{cases}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведен результат расчета скорости и ускорения на участке разгона органа станка для системы ЧПУ с частотой цикла $\text{Hz} = 1000$ Гц и дискретностью $k=1000$ дискр/мм. Для рассматриваемой модели при плавном изменении подачи (F_τ) выражения (1), (3) дают дискретное изменение скорости ($V_{3(i)}$) и ускорения ($a_{3(i)}$). В начале задания движения параметры скорости и ускорения «не наблюдаются» и соответственно не участвуют в формировании упреждающего управления по компенсационным сигналам. Появление интерполяционного значения скорости и ускорения на 35-ом такте формирует значение этих величин по уровню много больше фактически заданных, а длительность действия этих значений равна одному такту, т.е. эквивалентная

частота задания рассматриваемого воздействия равна 500 Гц. Такое воздействие лежит за пределами полосы пропускания электро-механической части привода подачи, и в силу фильтрующих свойств привода не будет иметь существенного значения для управления приводом и соответственно не влияет на точность исполнения заданных перемещений.

При необходимости движения с дробным значением тактовой подачи F_τ всегда будет возникать погрешность задания скорости ($\Delta_{(+)}$, $\Delta_{(-)}$) (рис. 2).

$$\Delta F\% = \left(\left(F_\tau - V_{3(i)} \right) / F_\tau \right) \cdot 100. \quad (7)$$

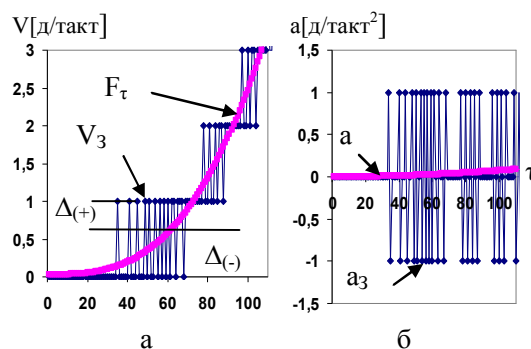


Рис. 2. Пример расчета данных на участке плавного разгона по данным положения (X_3): а – скорость (V_3); б – ускорение (a_3).

Зависимость относительной погрешности задания интерполяционной скорости приведена на рис. 3. Погрешность при подаче $F = 10$ мм/мин составляет +500%, -100%, а при $F = 5000$ мм/мин $\pm 1\%$ и незначительно уменьшается при дальнейшем увеличении подачи. Эта погрешность не зависит от формы траектории, и будет присутствовать при всех видах интерполяции. Эта погрешность является характеристикой модели задания интерполяционного перемещения по положению.

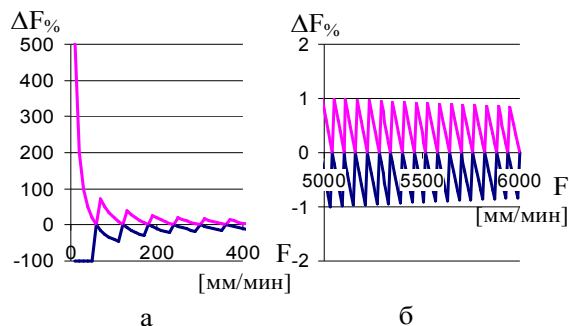


Рис. 3. Погрешность задания скорости через интерполяционные приращения положения: а – погрешность при малых подачах; б – погрешность при больших подачах

Таким образом, использование традиционного метода задания перемещения по изменению интерполяционного положения приводит к значительному искажению дифференциальных кинематических

характеристик, характеризуется низкой стабильностью задания скорости и снижает эффективность применения компенсации в законе управления.

Применение цифровой фильтрации при вычислении дифференциальных характеристик [4] дает положительные эффекты, но только на участках «наблюдаемого» перемещения. На участках начала движения или при движении с малыми подачами, когда интерполяционное перемещение «не наблюдается» фильтрация не эффективна, а при движении на больших подачах не обеспечивает необходимого повышения точности управления [7].

Решить эту проблему можно двумя путями.

Первый путь – это повышение разрядности данных о положении до уровня $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ мм, при управлении с учетом ускорения [7] и $1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ мм при учете рывка. Этот путь невозможно реализовать в большинстве случаев из-за ограниченной дискретности датчиков положения.

Второй путь – это *изменение структуры данных модели взаимодействия интерполятора и регулятора положения*. Достигается расширением состава данных, передаваемых из интерполятора в регулятор положения [2]. Подсистема интерполяции траектории (рис. 1) помимо традиционного расчета данных о потактовом изменении заданного положения рабочего органа (X_3) должна выполнять расчет заданной скорости движения (V_3). Для обеспечения вычисления ускорения, рывка и его производной без искажения данные о скорости должны иметь разрядность как минимум на 3...4 порядка выше разрядности данных о положении.

3. Точность задания кинематических параметров интерполяционного движения

Требования по обеспечению стабильности скорости, предъявляемые к блоку интерполяции, остающиеся неизменными практически с середины 80-х годов прошлого столетия. Так в работе [6] при оценке алгоритма сплайн интерполяции допускается отклонение контурной скорости $\pm 10\%$ и выход в конечную точку участка интерполяции без ошибки по положению (отклонение ± 1 дискр) при цене дискреты $0,001 \dots 0,0001$ мм. В работе [9] допустимыми считаются колебания интерполяционной скорости в пределах $\pm 5\%$. Вышеприведенные ограничения явно некорректные. Такие колебания интерполяционной скорости при движении на подачах необходимых для высокоскоростной обработки значительно превышают допустимые величины ускорений и рывков и не учитывают инерционный характер движения рабочих органов. Предложение вводить «ступенчатое» изменение радиуса дуги в работе [11] не учи-

тывает ограничений кинематических характеристик движения. Характеристика погрешности в $0,1\%$ полученная при разработке сплайнового интерполятора [15] приближается к современным требованиям.

Допущение погрешности выхода в конечную точку или «ступенчатое» изменение геометрических параметров в процессе интерполяции предполагает применение «принудительной» коррекции положения на величину погрешности, что практически соответствует заданию «мгновенного» за один такт перемещения на величину погрешности. Такое перемещение определяет мгновенное изменение дифференциальных кинематических параметров движения. Так при частоте цикла 1000 Гц и дискретности $k=1000$ д/мм такая корректировка эквивалентна мгновенному изменению подачи на 60 мм/мин, ускорения на $0,1$ g и рывка на 1000 м/с³, что по параметру рывка превышает возможности станка MIKRON UCP 710 от 20 до 200 раз [13], а MA655CM30 в 1000 раз. Это означает, что выполнение одномоментной «корректировки» положения даже на одну дискрету недопустимо и расчет выхода в конечную точку по положению должен осуществляться абсолютно точно.

Современный электропривод чувствителен к изменению сигнала на $0,01\%$ от максимального значения задания. Так, как погрешность управления состоит не только из погрешности вычисления скорости, можно утверждать, что ограничение погрешности расчетной величины задания на уровне не хуже $0,01\%$ от текущей, а не максимальной величины будет технически обосновано для управления с компенсацией по скорости [7, 8].

Ошибки параметров ускорения и рывка возникающие из-за погрешности задания подачи не должны превышать физически реализуемые величины. Можно считать минимально достаточным уровнем стабильности скорости погрешность порядка $\pm 0,001\%$ для управления с компенсацией по ускорению и $\pm 0,0001\%$ для управления с компенсацией по рывку. Колебания скорости на последнем шаге не должны приводить к превышению допустимых кинематических характеристик и должны соответствовать регулярному участку кадра.

Сформулируем требования к алгоритмам интерполяции высокоскоростной обработки. Необходимо обеспечивать:

- точность интерполяции точек позиционирования не хуже ± 1 дискреты по каждой интерполируемой оси;
- выход в конечную точку участка интерполяции без ошибки по положению;
- постоянство контурной скорости не хуже $\pm 0,01 - 0,0001\%$; в зависимости от порядка дифференциальных кинематических характеристик, используемых при компенсации управления;

– обеспечение выхода в конечную точку кадра с допустимым отклонением по скорости, в соответствии с требованиями к регулярным участкам кадра.

4. Параметрическая интерполяция скорости и положения

Основные подходы к разработке алгоритмов интерполяции сформированы в предположении ограниченных вычислительных возможностей интерполирующего устройства и ориентированы на выполнение целочисленных вычислений по рекуррентным соотношениям. Этими особенностями отличаются алгоритмы, созданные на основе метода цифровых дифференциальных анализаторов (ЦДА).

В работе [9] приведен анализ точности алгоритма многоквadrантной круговой интерполяции с многозрядными приращениями. Алгоритм обеспечивает приемлемую точность радиуса окружности, но низкую точность воспроизведения контурной подачи $\pm 9\%$. Целочисленная реализация алгоритма не позволяет осуществлять перемещения, с подачами меньше 1 дискр/такт, что исключает возможность его применения в системах ЧПУ с высокой частотой цикла.

В работе [10] предложен алгоритм точного кругового интерполятора, позволяющего варьировать шаг интерполяции, в широком диапазоне дробных чисел начиная от нулевого значения. Алгоритм расчета ориентирован на передачу данных о скорости движения через потактовое приращение координат, и обладает недостатками, описанными выше.

Алгоритм характеризуется недостаточностью свойств информативности, что приводит к нарушению вычисляемости, что не позволяет применять его в системах высокоскоростной обработки.

Выше приведенные алгоритмы интерполяции ориентированы на упрощенный набор вычислительных операций, выполняемый процессором управляющего устройства СЧПУ. Однако уровень развития процессорных устройств, достигнутый на сегодняшний день, ставит под сомнение целесообразность такого подхода. С другой стороны, применение в системах ЧПУ сплайновой интерполяции требует гораздо больших вычислительных затрат, чем выполнение расчетов для дуг окружностей с использованием тригонометрических функций, применения которых избегали в ранее рассмотренных алгоритмах. Эти обстоятельства позволяют рекомендовать к применению в системах ЧПУ алгоритм круговой интерполяции с применением параметрического задания дуг окружностей, как функции угла поворота (рис. 4).

Рассматриваемый алгоритм круговой интерполяции обеспечивает вычисление координат пози-

ционирования и осевых скоростей в соответствии с требованиями к интерполятору, сформулированными выше.

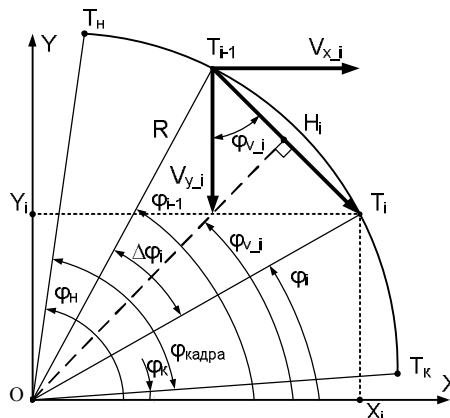


Рис. 4. Схема расчета координат и осевых скоростей при круговой интерполяции

Расчет тактового приращения углового положения $\Delta\phi_i$ осуществляется по выражению

$$\Delta\phi_i = \frac{\phi_{\text{кадра}}}{L_{\text{кадра}}} \cdot H_i. \quad (8)$$

Знак шага интерполяции H_i зависит от типа выполняемой функции G2(G3). Угловое положение ϕ_i текущей точки интерполяции T_i определяется по выражению

$$\phi_i = \phi_H + \sum_{j=0}^i \Delta\phi_j. \quad (9)$$

Угол проецирования вектора скорости на оси станка определяется как

$$\phi_{V_i} = \phi_H + \sum_{j=0}^{i-1} \Delta\phi_j + 0,5 \cdot \Delta\phi_i. \quad (10)$$

Вычисление интерполяционных координат текущей точки T_i и осевых скоростей позиционирования в текущую точку осуществляется по выражениям

$$X_i = \text{int} [R \cdot \cos(\phi_i)] \quad (11)$$

$$Y_i = \text{int} [R \cdot \sin(\phi_i)] \quad (12)$$

$$V_{X_i} = \text{int} [-H_i \cdot K_{mv} \cdot \sin(\phi_{V_i})] \quad (13)$$

$$V_{Y_i} = \text{int} [H_i \cdot K_{mv} \cdot \cos(\phi_{V_i})] \quad (14)$$

где K_{mv} – коэффициент задания значимого разряда.

На рис. 5 представлены результаты численного эксперимента по оценке точности интерполяции положения и скорости.

График изменения интерполяционной скорости движения оси (V_{X_i}) незначительно отличается от точного значения скорости движения оси (V_{X_a}) (рис. 5, а).

Погрешность интерполяционной скорости движения оси возникает в результате отсечения дробной части после соответствующего повышения порядка в выражениях (13), (14) и она не превышает цены разряда заданного коэффициентом K_{mv} . При применении коэффициента $K_{mv} = 100$ погрешность задания скорости не превышает 0,01 дискт/такт (рис. 5, в, г). Соответствующее значение K_{mv} позволяет задать скорость оси с точностью до $1 \cdot 10^{-6}$ дискт/такт, что при дискретности $1 \cdot 10^{-3}$ мм эквивалентно заданию разрядности порядка $1 \cdot 10^{-9}$ мм. Указанные величины погрешностей обеспечиваются во всем возможном диапазоне изменения значений радиуса дуги и шага интерполяции, а степень превышения разрядности задания скорости по сравнению с заданием положения управляется коэффициентом K_{mv} .

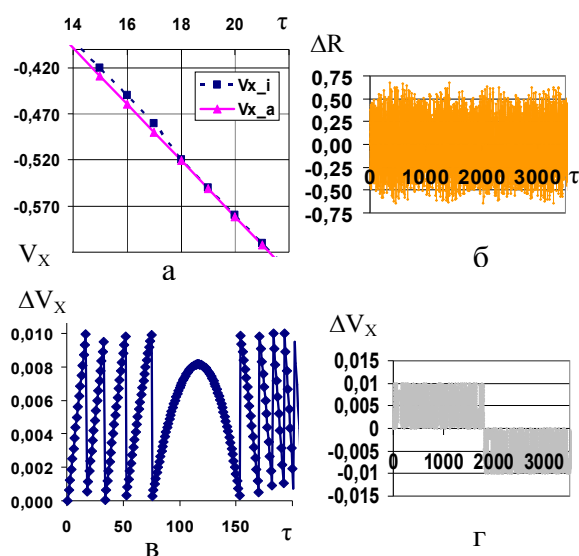


Рис. 5. Погрешность задания контурной подачи при повышении разрядности задания скорости
 а – сопоставление интерполяционной V_{x_i} и точной скорости V_{x_a} оси;
 б – погрешность радиуса окружности;
 в – абсолютная погрешность скорости оси;
 г – абсолютная погрешность скорости оси

Погрешность интерполяции положения оценивается по погрешности радиуса ΔR . Погрешность радиуса ΔR не превышает $\pm 0,7$ дискреты (рис. 5, б). Указанные величины погрешностей обеспечиваются во всем возможном диапазоне изменения значений радиуса дуги и шага интерполяции.

Максимальная погрешность задания контурной подачи для рассмотренного метода может быть определена по выражению

$$\Delta F\% = \left((60 \cdot f_{Ц}) / (K_{mv} \cdot F \cdot k) \right) \cdot 100. \quad (15)$$

На рис. 6 приведены результаты расчетов относительной погрешности задания подачи в зависимости от степени повышения разрядности. Для обеспечения стабильности интерполяции контурной по-

дачи на уровне не хуже 0,01% в диапазоне подач свыше 1 мм/мин, необходимо применять коэффициент повышения разрядности задания скорости не ниже $K_{mv} = 10000$.

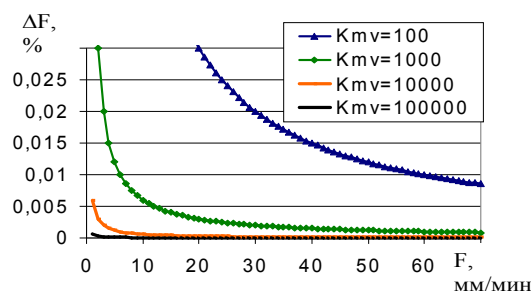


Рис. 6. Относительная погрешность задания контурной подачи при повышении разрядности задания скорости

Предложенный метод интерполяции использует давно известные математические соотношения параметрического задания окружности. Отличается тем, что обеспечивает необходимую для высокоскоростной обработки информативность за счет раздельного представления данных о положении (X_i, Y_i) и скорости движения осей (V_{x_i}, V_{y_i}) и высокую степень вычисляемости, за счет повышения разрядности задания скорости (V_{x_i}, V_{y_i}) на 4...6 порядков выше разрядности задания положения.

5. Управление положением при интерполяции скорости и положения

На основании результатов ранее рассмотренных вопросов, предложена модель управления формирующими движениями при высокоскоростной обработке с раздельным заданием величин перемещения и скорости движения рабочих органов станка. Задание перемещений осуществляется в соответствии с дискретностью измерения положения, обеспечиваемой в системе ЧПУ. Задание скорости осуществляется с повышением разрядности как минимум на 3-4 порядка по сравнению с заданием положения. Повышенная разрядность задания скорости обеспечивает использование дифференциальных кинематических характеристик заданной траектории движения рабочего инструмента, что приводит к повышению точности позиционирования при высокоскоростной обработке криволинейных контуров.[2] Структурная схема регулятора, реализующая модель управления с компенсацией по дифференциальным кинематическим характеристикам приведена на рис. 7. Расширенная структура данных используемых в обмене между «интерполятором» и «регулятором положения» содержит информацию о положении (X_3) и скорости (V_3) , обеспечивает необходимую информативность модели данных.

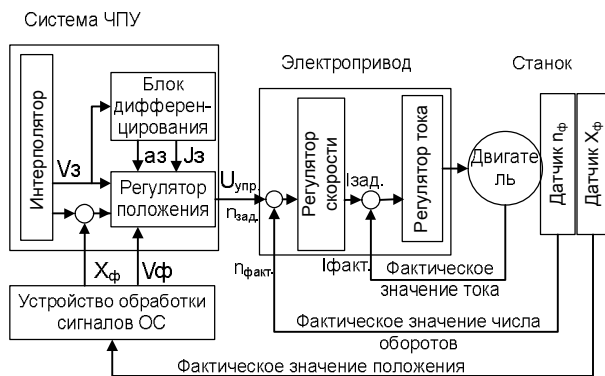


Рис. 7. Структурная схема контурной системы управления положением при высокоскоростной обработке

В предложенной схеме расчет кода управляющего воздействия осуществляется по выражению

$$U_{упр(i)} = k_p \cdot \varepsilon(i) + k_d \cdot \Delta \varepsilon(i) + k_{int} \cdot \sum_{j=0}^i \varepsilon(j) + \left\{ k_v \cdot V_{X(i)} + k_a \cdot a_{X(i)} + k_R \cdot J_{X(i)} \right\}, \quad (16)$$

где $V_{X(i)}$ – интерполяционная скорость движения рабочего органа, рассчитанная в блоке интерполяции;

a_3 – величин заданного ускорения, рассчитывается в регуляторе положения по выражению (3);

J_3 – величин заданного рывка, рассчитывается в регуляторе положения по выражению (4);

k_v , k_a , k_R – коэффициент передачи по скорости, ускорению и рывку.

Заключение

Проведено исследование свойств информативности и вычисляемости традиционной модели взаимодействия модулей интерполяции и регулирования положения системы ЧПУ высокоскоростного оборудования. Показано, что причиной нестабильности подачи при применении метода задания движения с помощью потактового изменения интерполяционного положения является нарушение свойства вычисляемости из-за недостаточной информативности модели взаимодействия.

Предложено изменение структуры данных модели взаимодействия интерполятора и регулятора положения. Сформулировано требование к блоку интерполяции траектории о необходимости выполнения помимо расчета заданного положения, расчета скорости движения рабочего органа с разрядностью превышающей разрядность данных положения на 3...4 порядка.

Проанализированы требования к стабильности задания контурной подачи при интерполяции. Показано, что для высокоскоростной обработки необходим уровень точности задания подачи порядка 0,0001%.

Разработан метод круговой интерполяции скорости и положения, обеспечивающий заданный уровень стабильности скорости управляемых осей. Описана структурная схема регулятора положения, обеспечивающая управление положением с учетом скорости, ускорения и рывка.

Обеспечение необходимой информативности и вычисляемости в предложенной модели позволяет обеспечить стабильность задания скорости рабочих органов на заранее определенном уровне.

Результаты представленных исследований справедливы для любых форм задания траекторий режущего инструмента, как с помощью линейной интерполяции, так и с помощью сплайнов или других гладких кривых.

Литература

1. Сосонкин, В.Л. Программирование систем числового программного управления [Текст]: учеб. пос. / В.Л. Сосонкин, Г. М. Мартинов. – М.: Логос, 2008. – 344 с.
2. Кривцов, В.С. Проблемы сплайновой интерполяции с гладкоограниченными кинематическими параметрами движения в задачах числового программного управления высокоскоростным оборудованием [Текст] / В.С. Кривцов, В.В. Комбаров, В.Ф. Сорокин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9 (96). – С. 11 – 19.
3. Бугров, Ю.Н. Повышение технологической точности и производительности специализированного оборудования с ЧПУ на основе нелинейного программирования и модифицированных сплайн-функций [Текст] / Ю.Н. Бугров // *Информатика и технология. Межвузовский сборник научных трудов*. – М.: МГУПИ, 2010. – С. 40-46.
4. Бугров, Ю.Н. Цифровая фильтрация сигналов управления и контроля в системах управления технологическим оборудованием и специализированными станками [Текст] / Ю.Н. Бугров // *Научные труды межд. НПК «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении»*. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 347-353.
5. Аналитическое представление NURBS-кривых для операций реального времени в системах ЧПУ [Текст] / Ю.А. Раисов, И.В. Бычков, Н.И. Бычков, В.В. Комбаров // *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. – 2012. – №6. – С. 36 – 46.
6. Раисов, Ю.А. Корректная постановка задачи формообразования при реализации B-spline интерполяции [Текст] / Ю.А. Раисов, И.В. Бычков, Н.И. Бычков // *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. – 2010. – № 5. – С. 33 – 38.
7. Комбаров, В.В. Определение физических величин перемещения органов станков с ЧПУ [Текст] / В.В. Комбаров, Е.В. Комбарова, Е.А. Криживец // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7(84). – С. 109 – 115.

8. Комбаров, В.В. Обработка данных при вычислении скорости и ускорении в контуре обратной связи системы ЧПУ [Текст] / В.В. Комбаров, Е.А. Аксенов, Е.В. Комбарова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 10 (87). – С. 29 – 33.

9. Комбинированный метод круговой интерполяции [Текст] / Ю.А. Раисов, И.В. Бычков, В.В. Комбаров, Е.В. Комбарова // *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. – 2005. – № 6 (56). – С. 47 – 51.

10. Раисов, Ю.А. Точный линейно-круговой интерполятор для систем формообразования в машиностроении [Текст] / Ю.А. Раисов, И.В. Бычков, В.В. Комбаров // *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. – 2007. – № 1 (63). – С. 12 – 18.

11. Бычков, И.В. Анализ формообразующих процессов на оборудовании с ЧПУ и изменение условий постановки прямой задачи [Текст] / И.В. Бычков // *Вопросы проектирования и производства кон-*

струкций летательных аппаратов. – 2011. – № 2 (66). – С. 134 – 140.

12. Feed drive modelling for the simulation of tool path tracking in multi-axis High Speed Machining [Text] / David Prévost, Sylvain Lavernhe, Claire Lartigue, Didier Dumur // *Int. Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2011. – № 3-4. – P. 266-284.

13. 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.

14. Erkorkmaz, K. Quintic spline interpolation with minimal feed fluctuation [Text] / K. Erkorkmaz, Y. Altintas // *J. Manuf. Sci. Eng.* – 2005. – Vol. 127. – P. 339 – 349.

15. Heng, M. Design of a NURBS Interpolator with minimal feed fluctuations and continuous feed modulation capability [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*. – 2010. – Vol. 50 (3). – P. 281 – 293.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

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

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ КОНТУРНОЇ ПОДАЧІ В СИСТЕМІ ЧПУ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ПРИКЛАДІ КРУГОВОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

В.В. Комбаров, В.Ф. Сорокін

Розглянуто модель взаємодії модулів «Інтерполятор» і «Регулятор положення» для системи ЧПУ. Виконана оцінка властивостей інформативності та обраховування для традиційної моделі взаємодії модулів. Показано, що значне спотворення диференціальних кінематичних характеристик властиво для традиційного методу завдання руху за допомогою потактові зміни інтерполяційного положення. Метод не має властивість обрахування при управлінні високошвидкісним обладнанням. Запропоновано зміна структури моделі. Проаналізовано вимоги до стабільності завдання контурної подачі при інтерполяції. Показано, що для високошвидкісної обробки необхідний рівень точності завдання подачі порядку 0,0001%. Розроблено метод кругової інтерполяції швидкості та положення, що забезпечує заданий рівень стабільності швидкості керування осей. Описана структурна схема регулятора положення, що забезпечує управління становищем з урахуванням швидкості, прискорення та ривка.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, система ЧПК, інтерполяція, швидкість, прискорення, ривок, стабільність, похибка.

THE PROVIDING STABILITY OF CONTOUR FEEDRATE IN CNC SYSTEM BY HIGH-SPEED EQUIPMENT ON EXAMPLE OF CIRCULAR INTERPOLATION

V.V. Kombarov, V.F. Sorokin

The model of communication of modules “Interpolator” and “Position Regulator” for CNC system is considered. The rating of informative and computability features for traditional model of communication of modules is executed. It is shown, that appreciable deformations of differential kinematical characteristics is typically for traditional method of given motion with cycle-accurate changing of interpolational position. The method does not hold feature of computability under control of high-speed equipment. The changing model structure is proposed. The requirements to stability of given contour feedrate when interpolation are analyzed. It is shown, that for high-speed machining need level of feedrate accuracy about 0,0001%. The method of circular interpolation of feedrate and positioning, which provide given level stability of speeds by controlled axis is developed. The position regulator structure scheme, which provide control with taking into account feedrate, acceleration and jerk is described.

Key words: high-speed milling, CNC system, interpolation, velocity, acceleration, jerk, stability, accuracy.

Комбаров Владимир Викторович – науч. сотр. каф. технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarov1@mail.ru.

Сорокин Владимир Федорович – д-р техн. наук, проф. каф. технологии производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», e-mail: sovldf@ukr.net.