

УДК 621.9.06-529:621.91

В.В. КОМБАРОВ, В.Ф. СОРОКИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ЦИКЛА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ЧПУ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Рассмотрена задача определения предела повышения частоты цикла управления системы ЧПУ при высокоскоростной обработке. Методика определения рациональной частоты цикла управления по предельно допустимой погрешности аппроксимации (chord error) учитывает влияние ограничений кинематических параметров оборудования, таких как, максимальная величина подачи, допустимые величины ускорения и рывка рабочих органов. Проведено исследование максимально возможного диапазона изменения значений ограничений кинематических параметров оборудования. Рассмотрено влияние дискретности системы ЧПУ на выбор частоты цикла управления для оборудования различного класса точности.

Ключевые слова: частота цикла управления, высокоскоростная обработка, система ЧПУ, подача, ускорение, рывок.

Введение

За последние 20 лет технология механообработки лезвийными инструментами претерпела существенное изменение. Достижения в области производства металлорежущего инструмента, приводных электродвигателей, электроники, развитие информационных технологий и вычислительной техники позволили значительно повысить производительность станочного оборудования.

Сокращение основного времени обработки достигается благодаря реализации процесса обработки с высокими скоростями резания, превышающими традиционные как минимум в 5...10 раз, и достигающими до 5000...10000 м/мин [1 – 3].

Реализация такого процесса обработки криволинейных контуров деталей, характерных для авиационного, требует высоких технологических подач [2 – 5] и соответствующего быстродействия систем ЧПУ. Повышение частоты цикла управления системы ЧПУ применяется для обеспечения точности обработки при высоких подачах, свойственных технологии высокоскоростного фрезерования и применяется, как для нового современного оборудования, так и для оборудования эксплуатируемого на авиационных предприятиях.

Частоты цикла ЧПУ, традиционно, выбирается на основе решения задачи обеспечения динамики объекта управления с учетом производительности и быстродействия вычислительного устройства системы ЧПУ [6, 7]. Одним из направлений повышения точности обработки является повышение частоты

цикла управления системы ЧПУ. В работе [8] указывается, что увеличение частоты цикла вдвое приводит к четырехкратному увеличению точности, но не уточняется, какой части погрешности это касается и существует ли предел повышения точности.

В [1] показано, что увеличение частоты цикла приводит к уменьшению погрешности аппроксимации задания криволинейных траекторий и не влияет на погрешность интерполяции и динамическую точность позиционирования органов станка.

При увеличении технологических подач возрастают инерционные нагрузки, что приводит к увеличению погрешностей позиционирования. Это обстоятельство обуславливает необходимость более глубокого рассмотрения механики движения и учета в процессе управления таких параметров как ускорение и рывок, которыми ранее пренебрегали. Одним из способов решения этой проблемы является применение алгоритмов оперативного планирования подачи, выполняемого системой ЧПУ в процессе обработки. В работах [9, 10] предложены постановка и некоторые решения задачи планирования подачи, с учетом ограничений величин скорости, ускорения и рывка. Ограничение кинематических параметров должны учитываться не только при планировании подачи в процессе управления органами станков, но и при определении рациональных параметров системы ЧПУ, однако этот вопрос исследован недостаточно.

Целью статьи является разработка методики определения рациональной частоты цикла управления системы ЧПУ, обеспечивающей допустимый

уровень погрешности аппроксимации криволинейных траекторий при обработке с любыми возможными подачами и учитывающей ограничения кинематических параметров для конкретного оборудования.

1. Определение рациональной частоты цикла по величине допустимой погрешности аппроксимации

Появление погрешности аппроксимации (chord error) при движении по криволинейной траектории обусловлено циклическим характером функционирования системы ЧПУ. В процессе управления движением органов станка система ЧПУ выполняет интерполяцию координат точек заданной траектории для каждого цикла управления. При интерполяции рассчитываются координаты точки, лежащей на заданной кривой и отстоящей от предыдущей точки позиционирования на расстоянии равному шагу интерполяции, величина которого соответствует перемещению, совершаемому за один такт управления. Считается, что на участке между точками интерполяции станок осуществляет перемещение по прямой линии (рис. 1). Таким образом, любая криволинейная траектория при управлении приводами подвергается аппроксимации ломаной линией [1, 6, 9 – 11].

В общем случае криволинейная траектория

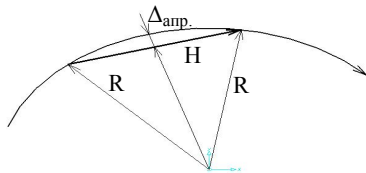


Рис. 1. Погрешность аппроксимации при интерполяции криволинейной траектории

имеет переменный радиус кривизны вдоль длины дуги. Однако, элементарный участок кривой на интервале интерполяции с достаточной для практики точностью можно представить в виде дуги окружности радиусом R (мм). Для случая движения по дуге окружности погрешность аппроксимации $\Delta_{\text{апр.}}$ (дискрет) рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\text{апр.}} = R \cdot k - \sqrt{(R \cdot k)^2 - \left(\frac{F \cdot k}{f_{\text{Ц}} \cdot 60 \cdot 2}\right)^2}, \quad (1)$$

где F – контурная подача (мм/мин);

k – коэффициент дискретности системы (дискрет/мм);

$f_{\text{Ц}}$ – частота цикла управления (Гц).

Величина шага интерполяции H (дискрет) вычисляется по выражению

$$H = \frac{F \cdot k}{f_{\text{Ц}} \cdot 60}. \quad (2)$$

Расчеты по выражениям (1), (2) показывают, что при увеличении частоты цикла $f_{\text{Ц}}$ на порядок происходит уменьшение шага H интерполяции на порядок, а погрешности аппроксимации $\Delta_{\text{апр.}}$ на два порядка.

При интерполяции криволинейной траектории точки позиционирования для каждого такта управления задаются в узлах сетки в соответствии с дискретностью осей станка (рис. 2). Дискретность позиционирования определяется точностью измерения координат датчиками положения и дискретностью расчетов внутри системы ЧПУ. Расчетные точки интерполяции не лежат абсолютно точно на заданной кривой, из-за чего, возникает погрешность интерполяции $\Delta_{\text{инт.}}$, которая в пределе равна одной дискрете позиционирования и не может быть устранена.

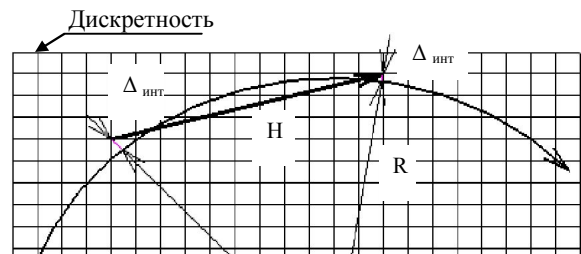


Рис. 2. Погрешность интерполяции

Можно предположить, что система ЧПУ имеет рациональный набор характеристик, если такие обеспечивают согласованные между собой уровни точности различных составляющих погрешностей обработки.

В такой постановке частота цикла управления $f_{\text{Ц}}$ является рациональной, если выполняется условие

$$\Delta_{\text{апр.}} \leq \Delta_{\text{инт.}} \leq \Delta_{\text{доп}} = 1. \quad (3)$$

Из выражений (1) и (3) получим соотношение для определения рациональной частоты цикла управления системы ЧПУ по величине допустимой погрешности аппроксимации траектории

$$f_{\text{Ц}} \geq \frac{F \cdot k}{120 \cdot \sqrt{(R \cdot k)^2 - (R \cdot k - \Delta_{\text{доп}})^2}}. \quad (4)$$

Ввиду инерционности механической системы перемещения рабочих органов станка система ЧПУ снижает подачу $F(L)$ на участках траектории с малыми радиусами кривизны с учетом ограничений величин допустимого ускорения A_{max}^i и рывка J_{max}^i для всех p управляемых осей станка. Поэтому определение рациональной частоты цикла управления сводится к оптимизационной задаче

$$f_{\text{Ц}} = \max_{F \rightarrow F_{\text{max}}} \{f_{\text{Ц}}(F, R, k)\}, \quad (5)$$

при граничных условиях для p осей станка:

$$|F| \leq F_{\max}^i, |A_{\max}| \leq A_{\max}^i, |J_{\max}| \leq J_{\max}^i, i = \overline{1, p}, \quad (6)$$

где $F(L)$ – рабочая подача вдоль длины кадра (контурная скорость обработки – мм/мин);

F_{\max}^i – максимально допустимая подача i -го привода станка (мм/мин);

A_{\max}^i – максимально допустимое ускорение i -го привода станка (мм/сек²);

J_{\max}^i – максимально допустимый рывок i -го привода станка (мм/сек³).

2. Учет ограничений кинематических параметров

При реализации технологии высокоскоростного фрезерования на новом и существующем оборудовании авиационных предприятий увеличение технологических подач приводит к увеличению инерционных нагрузок и соответствующему увеличению фактических погрешностей позиционирования. Для их уменьшения система ЧПУ при планировании подачи снижает скорость движения на участках траектории с малыми радиусами с учетом максимально допустимых величин подачи, ускорения и рывка. Рассмотрим особенности определения ограничений (6) при нахождении рациональной частоты цикла.

В качестве ограничения подачи F , необходимо выбирать наибольшую из максимально допустимых подач управляемых осей станка F_{\max}^i . В этом случае для остальных осей будет гарантировано обеспечиваться ограничение величины $\Delta_{\text{апр}}$.

Оценку влияния ограничений по ускорению и рывку выполним на примере движения по дуге окружности с постоянной подачей. При движении по дуге окружности с постоянной подачей возникает центростремительное ускорение a_n (мм/сек²)

$$a_n = (F/60)^2/R. \quad (7)$$

Предельно допустимое ускорение часто задается через безразмерную величину допустимой перегрузки $n_{\text{перегр}}$ и ускорение свободного падения g (м/сек²)

$$n_{\text{перегр}} = \frac{a_{\text{доп}}}{g \cdot 1000}. \quad (8)$$

Используя (7), получим выражение для оценки ограничения подачи по величине допустимого ускорения

$$F_{\text{доп}(a)} \leq 60 \cdot \sqrt{(R \cdot A_{\max})}. \quad (9)$$

Максимальную величину рывка управляемой оси при обработке окружности с постоянной подачей можно оценить по выражению

$$J_{\max} = (F/60)^3/R^2. \quad (10)$$

Откуда получаем выражение для расчета ограничения подачи по величине допустимого рывка

$$F_{\text{доп}(J)} \leq 60 \cdot \sqrt[3]{J_{\max} \cdot R^2}. \quad (11)$$

Для вычисления ограничений (9), (11) величины A_{\max} , J_{\max} необходимо выбирать наибольшие из максимально допустимых (6).

Значения величин A_{\max}^i , J_{\max}^i зависят от конструкции управляемой оси станка, типа и характеристик приводного двигателя и электропривода. Так, например, в работе [9] приведены характеристики 5-ти осевого обрабатывающего центра MIKRON UCP 710, у которого ось X и ось Z имеют различные соотношения характеристик по A_{\max}^i , J_{\max}^i . Для осей X, Z MIKRON UCP 710 и оси X MA655CM30A проведен расчет допустимых подач по ограничению ускорения и рывка (рис. 3).

Ограничение по рывку оси X MIKRON UCP 710 для любых значений радиуса кривизны является более жестким по сравнению с ограничением по ускорению (рис. 3, а). Для оси Z ограничение по

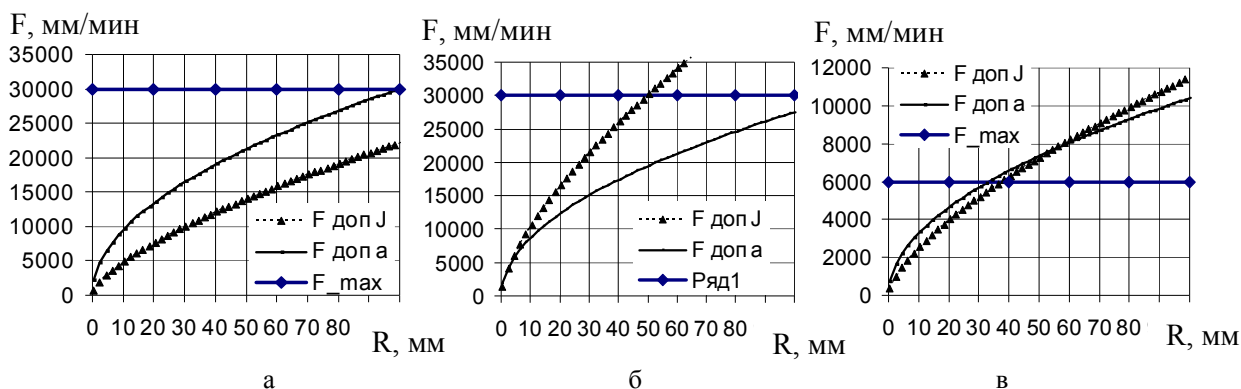


Рис. 3. Допустимая подача по ограничению ускорения и рывка:
а – ось X MIKRON UCP 710, б – ось Z MIKRON UCP 710, в – ось X MA655CM30A

рывку является существенным при радиусах до R3 мм, а при больших значениях радиуса основным является ограничение по ускорению. Для оси X станка MA655CM30A (рис.3в) ограничение рывка является определяющим при радиусах менее 55 мм, при больших радиусах основным ограничением является ограничение по ускорению. Однако максимальная подача оси X для MA655CM30A составляет 6000 мм/мин, что соответствует ограничению по рывку при R40 мм. Это означает, что при обработке радиусов в диапазоне от 0 до 40 мм система планирования подачи будет снижать скорость движения органов станка с учетом ограничения по рывку, а при радиусах больше 40 мм, основным ограничением будет ограничение максимальной подачи. Ограничение по ускорению для рассматриваемой оси X MA655CM30A никогда не будет определять режим обработки криволинейного контура. Приведенные примеры показывают, что *ограничения по максимальной подаче, ускорению и рывку осей являются независимыми и должны учитываться при определении параметров системы ЧПУ.*

3. Исследование рациональной частоты цикла управления

Исследование рациональной частоты цикла управления проведено на примере рассмотрения максимально возможного диапазона изменения значений ограничений кинематических параметров для оборудования с рядовой на сегодняшний день дискретностью к равной 1000 дискр/мм. Рассмотрено возможное задание максимальной подачи до 100 м/мин, изменение ускорений в диапазоне от 0.01g до 10g и рывка в диапазоне от 5 м/сек³ до 5000 м/сек³.

Определение частоты цикла управления с учетом ограничений кинематических параметров осуществляем с помощью построения диаграммы пре-

дельной частоты цикла управления по величине допустимой погрешности аппроксимации траектории (chord error) по выражению (4) (рис. 4). Совместное использование выражений (9), (4) и выражений (11), (4) позволяет рассчитать дополнительные ограничения частоты управляющего цикла по величине предельно допустимой перегрузки и рывку при обработке дуги окружности произвольного радиуса. На рис. 4 линии R0.25, ..., R5 показывают зависимость предельной частоты цикла от величины радиуса дуги (0.25мм, ..., 5мм) и контурной подачи при которой допустимая погрешность аппроксимации $\Delta_{доп}$ составляет одну дискрету позиционирования. Линии $n=0.01g, \dots, n=10g$ показывают ограничение подачи по величине допустимого ускорения при движении по дуге радиусом R. Линии $J_{max}=5 \dots 5000$ показывают ограничение подачи по величине рывка (5 ... 5000 м/сек³).

Наиболее распространенные модели станков с ЧПУ, применяемые на авиационных предприятиях, обладают следующими характеристиками по величине максимальной подачи быстрого перемещения и допустимому ускорению рабочих органов:

- 6P13ГН1, F_{max} 1000мм/мин, $n_{перегр}$ 0.006 ... 0.01;
- ФП7М, F_{max} 1500мм/мин, $n_{перегр}$ 0.006 ... 0.012;
- ФП7СМН, F_{max} 4500мм/мин, $n_{перегр}$ 0.012 ... 0.02;
- MA655CM30A F_{max} 6000мм/мин, $n_{перегр}$ 0.02 ... 0.1;
- 16K20Ф3, F_{max} 7500мм/мин, $n_{перегр}$ 0.02 ... 0.08.

Допустимая величина рывка не указывается в паспортных характеристиках оборудования, но из практического опыта можно утверждать, что для всех вышеприведенных моделей она значительно меньше 5 м/сек³. Из анализа графиков, приведенных на рис. 4, очевидно, что ограничения по допустимому ускорению и рывку являются более жесткими по сравнению с ограничением по величине погрешности аппроксимации при максимальной подаче для всех рассматриваемых моделей станков.

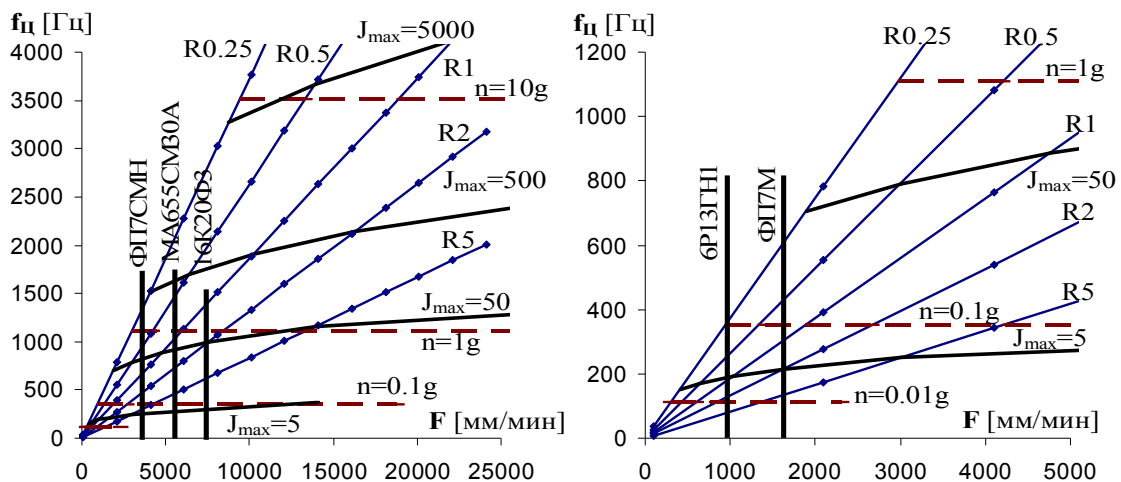


Рис.4. Рациональная частота цикла управления по ограничению допустимой погрешности аппроксимации $\Delta_{доп}$ равной одной дискрете (1 мкм)

Для управления оборудованием типа 6P13ГН1, ФП7М, ФП7СМН, МА655СМ30А, 16К20Ф3 обладающим динамическими характеристиками по параметру допустимого ускорения ($n_{\text{перепр}} < 0.1g$) и рывку ($J_{\text{max}} < 5\text{м/сек}^3$) технологически обоснованной по точности аппроксимации траектории является частота цикла управления равная 350 Гц. Применение для такого оборудования системы ЧПУ на базе персонального компьютера с частотой управления 1000 Гц [12] гарантирует, что для всех значений радиусов погрешность аппроксимации $\Delta_{\text{апр}}$ (chord error) не превысит величины дискретности системы 1 мкм.

Передовые образцы оборудования, выпускаемые лидерами станкостроения, обеспечивают динамические характеристики по параметру допустимого ускорения ($n_{\text{перепр}} = 1g$) и рывку ($J_{\text{max}} = 50\text{м/сек}^3$). Для такого оборудования технологически обоснованной по точности аппроксимации траектории является частота цикла управления равная 1200 Гц.

Управление оборудованием с частотой цикла не ниже частоты $f_{\text{ц}}$ рациональной по величине допустимой погрешности аппроксимации, определенной по предложенной методике, гарантирует, что погрешность задания траектории не превысит одной единицы дискретности системы.

4. Влияние дискретности на выбор частоты

Для прецизионных станков применяются системы ЧПУ с дискретностью $k=10000$ и $k=100000$. Зависимость предельной частоты цикла управления $f_{\text{ц}}$ по величине допустимой погрешности аппроксимации траектории с учетом ограничения по ускорению от величины дискретности k и допустимой перегрузки $n_{\text{перепр}}$ приведена на рис. 5.

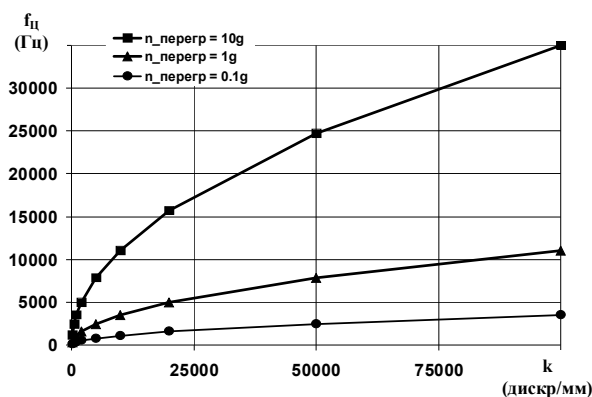


Рис. 5. Зависимость $f_{\text{ц}}$ от дискретности системы ЧПУ

Для существующего оборудования с характеристикой допустимого ускорения ($n_{\text{перепр}} < 0.1g$) мо-

жет потребоваться система с частотой цикла до 3500 Гц. Для оборудования соответствующего современному уровню с характеристикой по ускорению ($n_{\text{перепр}} < 1g$) необходима система с частотой $f_{\text{ц}}$ до 11000 Гц. И для перспективного оборудования с характеристикой по ускорению соответствующей ($n_{\text{перепр}} < 10g$) необходима система с частотой $f_{\text{ц}}$ до 35000 Гц.

Заключение

Сформулировано условие выбора рациональной частоты цикла управления системы ЧПУ, заключающиеся в обеспечении согласования между собой уровня точности составляющих погрешности обработки, таких как, погрешность интерполяции $\Delta_{\text{инт}}$ и погрешность аппроксимации $\Delta_{\text{апр}}$.

Предложены расчетные соотношения и методика определения рациональной частоты цикла управления по ограничению погрешности аппроксимации с учетом ограничений кинематических параметров при высокоскоростной обработке, таких как максимальная подача, допустимое ускорение и допустимый рывок.

Определены значения рациональной частоты управления для оборудования с различными ограничениями кинематических характеристик. При дискретности системы $k=1000$ дискр/мм частота $f_{\text{ц}}$ 350 Гц является рациональной по параметру ограничения погрешности аппроксимации для оборудования, составляющего основной парк авиационных предприятий. Для современных высокоскоростных станков с дискретностью $k=1000$ дискр/мм рациональной является частота цикла управления $f_{\text{ц}}$ 1200 Гц. Частота $f_{\text{ц}}$ 35000 Гц является рациональной для оборудования с потенциально возможными характеристиками по ускорению и рывку при дискретности $k=100000$ дискр/мм.

Литература

1. Комбаров, В.В. Исследование влияния частоты цикла управления системы ЧПУ на точность обработки [Текст] / В.В. Комбаров, Е.В. Комбарова, Е.А. Аксёнов // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 144 – 148.
2. Сергеева, Е.В. Высокоскоростная обработка. Определение, особенности и примеры применения в авиакосмической промышленности [Электронный ресурс] / Е.В. Сергеева // HSC Consulting. – Режим доступа: <http://www.sergeev-hsc.de/>. – 31.05.2012 г.
3. Фельдштейн, Е.В. Обработка деталей на станках с ЧПУ [Текст]: учеб. пособие / Е.В. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 3-е изд., доп. – 2008. – С. 299.

4. Сорокин, В.Ф. Повышение производительности и качества формообразования лопаточных моноколес при фрезеровании на станках с ЧПУ [Текст] / В.Ф. Сорокин, В.Ф. Мозговой // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2003. – № 21. – С. 27 – 34.

5. Технология обработки моноколес высокоскоростным фрезерованием [Текст] / А.Я. Качан, С.А. Петров и др. // Оборудование и инструмент. – 2006. – №2 (75). – С. 26 – 32.

6. Дроздов, В.Н. Системы автоматического управления с микроЭВМ [Текст] / В.Н. Дроздов, И.В. Мирошник, В.И. Скорубский. – Л.: Машиностроение. Ленинг. Отд-ние, 1989. – 284 с.

7. Лукас, В.А. Теория управления техническими системами [Текст]: компактный учебный курс для вузов / В.А. Лукас; 3-е издание перераб. и дополн. – Екатеринбург: Изд-во УГТГА 2002 – 675 с.

8. Прогнозирование подачи при высокоскоростной механообработке [Текст]: пер. с англ. / А.А. Аврамов // Cutting Tool Engineering. – 2002.

– № 3 (54). – С. 40, 42 – 44.

9. 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.

10. Wei Fan. Time-Optimal Interpolation for Five-axis CNC Machining along Parametric Tool Path based on Linear Programming [Text] / Wei Fan, Xiao-Shan Gao, Ke Zhang // Mathematics Mechanization Research Preprints KLMM, Chinese Academy of Sciences Vol. 31 March, 2012. – P. 21 – 42.

11. Михеев, Ю.Е. Системы автоматического управления станками [Текст] / Ю.Е. Михеев, В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.

12. Программно-аппаратный комплекс для исследования алгоритмов и процессов в станках с ЧПУ [Текст] / В.С. Кривцов, Е.В. Комбарова, Р.В. Варнас, Е.А. Аксенов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 4 (81). – С. 5 – 11.

Поступила в редакцию 31.05.2012

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

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ЧАСТОТИ ЦИКЛУ КЕРУВАННЯ СИСТЕМИ ЧПК З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНІЙ ОБРОБЦІ

В.В. Комбаров, В.Ф. Сорокін

Розглянуто задачу визначення межі підвищення частоти циклу керування системою ЧПК при високошвидкісній обробці. Методика визначення раціональної частоти циклу керування по гранично допустимій похибці апроксимації (chord error) враховує вплив обмежень кінематичних параметрів обладнання, таких як максимальна величина подачі, допустимі величини прискорення та ривка робочих органів. Проведено дослідження максимально можливого діапазону зміни значень обмежень кінематичних параметрів обладнання. Розглянуто вплив дискретності системи ЧПК на вибір частоти циклу керування для обладнання різного класу точності.

Ключові слова: частота циклу керування, високошвидкісна обробка, система ЧПК, подача, прискорення, ривок.

DETERMINATION OF RATIONAL CNC CONTROL CYCLE FREQUENCY CONSIDERING LIMITATIONS OF KINEMATIC PARAMETERS AT HIGH-SPEED MACHINING

V.V. Kombarov, V.F. Sorokin

The task of determination of limits for increase of CNC control cycle frequency is analyzed at high speed machining. Methodology for determination of rational control cycle frequency from limit permissible chord errors includes influence of limitations of machines kinematical parameters such as maximum feedrate, limit values of acceleration and jerk of the machine actuators. Maximum possible ranges of limitations for machines kinematical parameters changes are investigated. Influence of CNC system discreteness on determination of control cycle frequency for machines of different accuracy ranks is analysed.

Key words: frequency of control cycle, high-speed machining, CNC system, feedrate, acceleration, jerk.

Комбаров Владимир Викторович – научный сотрудник кафедры технологии производства летательных аппаратов, руководитель центра САПР и ИТ Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarov1@mail.ru.

Сорокин Владимир Федорович – д-р техн. наук, доцент кафедры технологии производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sovladf@ukr.net.