

УДК 621.9.06-529:621.914.1-185.4

В. В. КОМБАРОВ, В. Ф. СОРОКИН, Е. А. КРИЖИВЕЦ*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЦИКЛА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ЧПУ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДВИЖЕНИЙ**

При создании технологических систем с числовым программным управлением (ЧПУ) для высокоскоростного фрезерования необходимо обеспечить высокую точность траекторных перемещений рабочих органов станка. Применение для этих целей систем ЧПУ на базе персонального компьютера требует проведения исследований влияния погрешности длительности цикла управления и отдельных его этапов на точность управления движением. Для рассмотренной схемы программной организации цикла экспериментально показано, что погрешность длительности цикла обусловлена процессами, происходящими в операционной системе, и проявляется в виде случайных и систематических погрешностей. Предложены соотношения для оценки влияния погрешности длительности цикла по событию измерения положения и выдачи управляющего воздействия приводу подач. Проведенные исследования подтверждают качественное совпадение характера изменения расчетных и экспериментальных погрешностей. Показано, что для систем с технологическими подачами свыше 2000 мм/мин в ошибке управления преобладает влияние погрешности цикла по событию измерения положения.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, система ЧПУ, точность позиционирования, ошибка по положению, цикл управления.

Введение

Применение режимов высокоскоростной обработки на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) в авиастроении является одним из основных направлений повышения эффективности механообработки. Основной тенденцией в развитии систем управления для современного механообрабатывающего оборудования является создание систем ЧПУ на базе персонального компьютера [1-3]. Перспективными являются одно и двухуровневые системы, в которых задачи, решаемые системой управления, а именно, подготовка данных для управляющих программ, интерполяция траектории, управление движением, управление электроавтоматикой и отображение информации для оператора выполняются на одном компьютере или распределяются между двумя вычислительными машинами.

Задачи интерполяции траектории, управления движением и управления электроавтоматикой должны выполняться с четкой синхронизацией по времени. В связи с этим возникает необходимость выполнения программы управления в режиме реального времени. Под реальностью времени понимается, что затраченное время на определенную процедуру не превышает заранее установленного ограничения [1], то есть поведение вычислительной системы предсказуемо. Время реакции на прерывание обычно не превышает 2-8 мкс. Время переключения контекста, затрачиваемое на передачу управления от процесса к процессу находится в пределах

80-160 мкс. Время задержки активизации процесса после обработки прерывания находится в пределах 4-16 мкс. При этом время выполнения вышеперечисленных операций зависит от множества факторов, определяющих состояние вычислительной машины, на момент начала выполнения соответствующей операции. По этой причине существует некоторый разброс времени выполнения различных системных процедур, что порождает погрешность моментов времени выполнения управляющих процедур от цикла к циклу и снижает точность движения по заданной траектории.

Технологическая необходимость реализации режимов высокоскоростной обработки определяет тенденцию повышения частоты и, соответственно, уменьшение длительности цикла управления в системе ЧПУ. Для современных образцов систем ЧПУ характерно уменьшение длительности цикла управления до 1000-400 мкс. Очевидно, что при такой длительности цикла задержки выполнения отдельных системных процедур, описанные выше, могут приводить к существенным погрешностям управления. В рамках проводимых исследований по обеспечению точности при реализации технологии высокоскоростной обработки, перед авторами стала задача определения степени влияния стабильности цикла управления на точность траекторных перемещений органов станка. Целью исследования является разработка методики снижения погрешности позиционирования органов станка при движении по расчетной траектории.

1. Цикл управления движением в системе ЧПУ на базе персонального компьютера

В работе рассматривается схема управления движением органов станка с тактированием по времени. При такой схеме управления контроль положения органов станка и установка управляющего задания скорости движения для приводов подач осуществляется один раз за некий установленный промежуток времени, называемый тактом управления ($T_{ц}$). В промежутке времени между моментами выдачи управляющего задания органы станка перемещаются с заданной скоростью без контроля со стороны системы ЧПУ. Для обеспечения точности управления важно, чтобы длительность такта управления была постоянна и соответствовала заранее заданной величине.

Цикл управления в системе ЧПУ на базе персонального компьютера (рис. 1.) реализуется с помощью прикладной программы «Задача ЧПУ», запускаемой на выполнение один раз в такт.

Для тактирования по времени используется прерывание таймера (внутреннего или внешнего) [3]. Разброс времени, затрачиваемого на выполнение системных процессов, таких как, обработка прерывания и передача управления прикладной задаче приводят к нестабильности по времени выполнения управляющих действий в различных циклах управления.

Принцип последовательной обработки информации в центральном процессоре персонального компьютера определяет то обстоятельство, что процедуры измерения положения, расчета и выдачи управляющего задания, необходимые для реализации управления, выполняются последовательно по определенному алгоритму. По этой причине измерение положения и выдача управляющего задания приводу выполняются в разные моменты времени внутри управляющего цикла с некоторой временной задержкой. Стабильность процесса запуска программы ЧПУ и длительностей временных задержек определяется особенностями реализации режима реального времени в операционной системе персонального компьютера и алгоритмом организации цикла управления.

По причине различных затрат времени и погрешностей длительности выполнения обработки прерывания, передачи управления прикладной задаче, выполнения расчетных и обменных операций, каждое событие внутри цикла характеризуется различными величинами погрешностей длительности выполнения процедур и всего цикла в целом.

На рис. 2 приведена диаграмма цикла соответствующая алгоритму, приведенному на рис. 1. Оче-

видно, что длительность цикла, измеряемая по различным событиям, будет иметь различную погрешность.

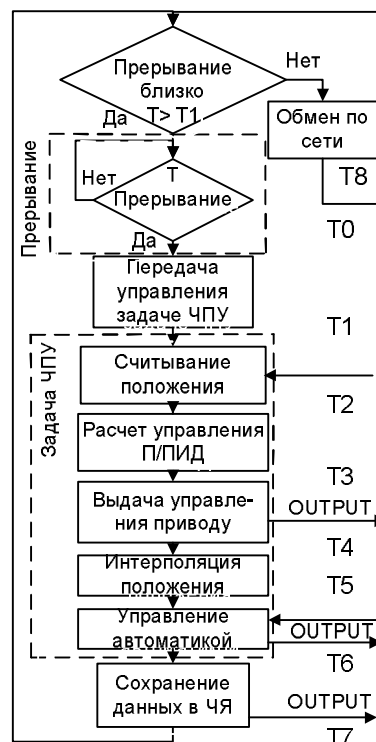


Рис. 1. Схема организации цикла управления движением в системе ЧПУ на базе персонального компьютера

Длительность цикла управления по событию обработки программного прерывания таймера составляет

$$T_{ц} = T \pm 0,5 \cdot \Delta T_{пр}. \quad (1)$$

Длительность цикла управления по событию измерения положения составляет

$$T_{ц_ип} = T \pm 0,5 \cdot \Delta T_{пр} \pm 0,5 \cdot \Delta T_{пу} \pm 0,5 \cdot \Delta T_{ип}. \quad (2)$$

Длительность цикла управления по событию выдачи управляющего задания приводу составляет

$$T_{ц_уп} = T \pm 0,5 \cdot \Delta T_{пр} \pm 0,5 \cdot \Delta T_{пу} \pm 0,5 \cdot \Delta T_{ип} \pm 0,5 \cdot \Delta T_r \pm 0,5 \cdot \Delta T_{уп}. \quad (3)$$

Результаты измерения длительности различных участков цикла управления, приведены на рис. 3.

Промежуток времени T_1 соответствует затратам времени на передачу управления прикладной программе «Задача ЧПУ» после наступления события прерывания таймера. Время T_2 соответствует моменту времени завершения измерения положения и обработку данных о положении рабочих органов. Время T_4 показывает затраты времени на выполнение расчетов в программно-реализованном ПИД регуляторе положения, преобразование и выдачу управляющего задания приводам подач.

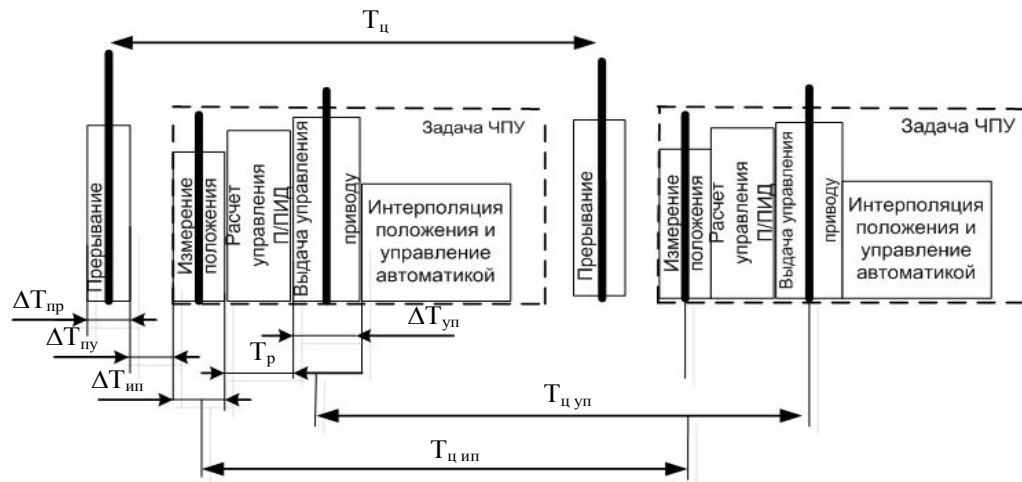


Рис. 2. Погрешности длительности этапов цикла

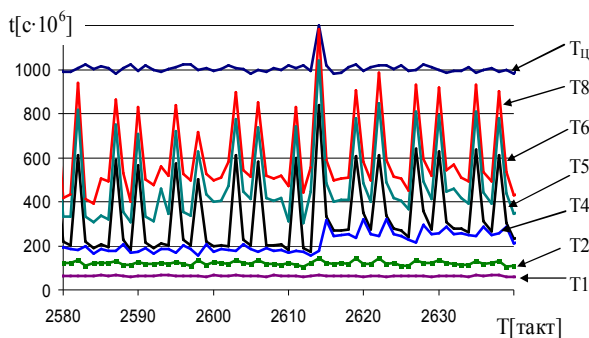


Рис. 3. Длительности выполнения этапов цикла

Время T5 соответствует моменту завершения расчетов интерполяции положения на несколько тактов вперед. Время T6 соответствует моменту завершения прикладной программы «Задача ЧПУ» и переходу блока управления системы ЧПУ на обслуживание сетевого обмена данными с машиной верхнего уровня. Время T8 соответствует переходу к ожиданию очередного прерывания таймера. Как видно из приведенного рисунка, погрешность длительности выполнения различных этапов цикла управления значительно отличаются.

Погрешность длительности выполнения отдельных этапов и всего цикла управления может быть обусловлена формированием шума квантования дискретных процессов вычисления. В этом случае ошибка длительности цикла будет иметь случайный характер. Если погрешность длительности формируется из-за прохождения вычислительных и прочих процессов операционной системы, служебных аппаратных прерываний в процессорном устройстве и контроллерах персонального компьютера, то погрешность будет иметь систематический характер на частотах выполнения соответствующих процессов.

При анализе длительности выполнения процедуры «Расчет управления ПИ/ПИД» в спектре погрешности выявлены систематические отклонения с частотой 70 и 140 Hz, что свидетельствует о протекании систематических процессов на соответствующих частотах (рис. 4). Таким образом, погрешность длительности этапа цикла обусловлена как случайными, так и регулярными процессами, происходящими в операционной системе и, соответственно, проявляется в виде случайных и систематических погрешностей.

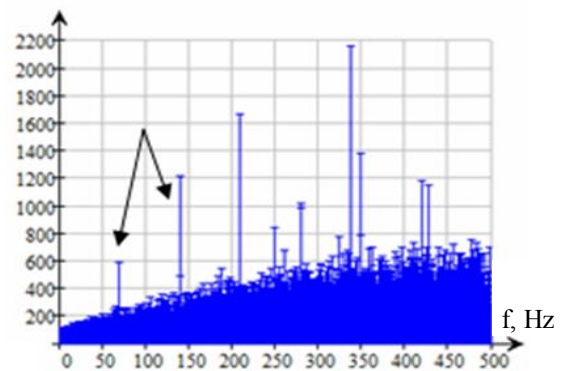


Рис. 4. Спектр погрешности длительности выполнения процедуры «Расчет управления ПИ/ПИД»

Наличие экстремумов на частотах 70, 140 Hz в амплитудно-частотной характеристике, построенной по данным о погрешности позиционирования рабочих органов (рис. 5) свидетельствует о том, что погрешность цикла на частотах выше частоты пропускания влияет на погрешность позиционирования рабочих органов. Выявленные обстоятельства обосновывают целесообразность проведения исследований закономерностей влияния погрешности длительности отдельных этапов цикла на точность пе-

ремещения рабочих органов и соответственно точность обработки.

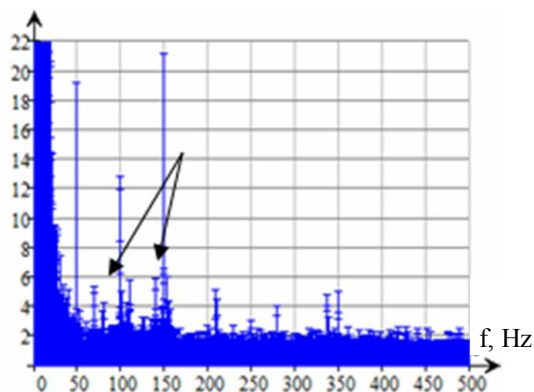


Рис. 5. АЧХ ошибки положения рабочего органа

2. Режим движения при исследовании влияния погрешности длительности цикла

Погрешности в длительности выполнения отдельных процедур и цикла управления приводят к погрешностям в измерении положения органов станка и неравномерному запаздыванию выдачи управляющего воздействия приводу подач, что приводит к ухудшению точности траекторных перемещений.

Погрешности траекторных перемещений при движении органов станка возникают из-за действия большего количества факторов. С целью минимизации влияния различных факторов не связанных со стабильностью цикла управления исследование влияния целесообразно проводить в установившихся режимах движения. В режиме установившегося движения минимизируется влияние инерционных сил, отсутствуют различные переходные процессы, связанные с изменением режимов работы электродвигателя и привода подач. В идеале режим установившегося движения должен характеризоваться постоянством всех управляющих и управляемых параметров системы. Однако на практике в режиме установившегося движения происходит постоянная компенсация различных отклонений управляемых параметров, что проявляется в изменении значения величины ошибки позиционирования (ΔX) (рис. 6. зона 2). Отклонения управляемых параметров обусловлено возникновением возмущений из-за несовершенства механики станка, погрешности и дискретности датчиков положения, погрешности цикла управления.

При движении в установившемся режиме управляющее задание приводу подач изменяется в

соответствии с выражением

$$U = U_{УСТ} \pm \Delta U, \quad (4)$$

где $U_{УСТ}$ - среднее значение управляющего задания;

ΔU - изменение управляющего задания, обусловленное компенсацией погрешности.

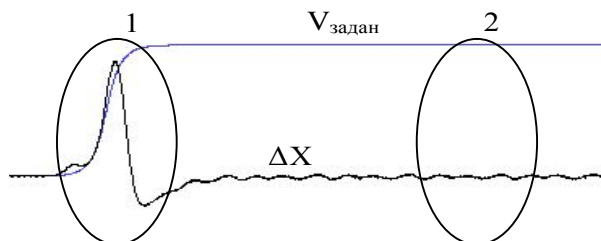


Рис. 6. Изменение ошибки позиционирования:

- 1 – переходный процесс;
- 2 – установившийся режим

Величина ΔU формируется как сумма величин компенсации фактических погрешностей позиционирования и ошибки расчета управляющего задания из-за погрешности цикла управления.

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_{УСТ}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Относительную величину разброса значений управляющего задания δ (выражение 5) можно использовать для оценки влияния различных факторов на погрешность управления в установившемся режиме движения.

3. Оценка влияния нестабильности цикла по моменту времени измерения положения

В системе управления с тактированием по времени для каждого такта управления рассчитывается перемещение органа станка. Фактическое перемещение за такт определяется по датчику положения. Ошибка позиционирования ΔX , вычисляемая как разность заданного и фактического положения, используется для формирования корректировки управляющего задания приводу в каждом такте.

При отклонении в длительности цикла по событию измерения положения на величину ΔT (рис. 7) фактическое перемещение будет измерено с ошибкой ΔX . Выражение 6 позволяет оценить максимальное значение ошибки измерения положения.

$$\Delta X = \pm V_x \cdot \Delta T. \quad (6)$$

Измерение положения с ошибкой ΔX приводит к формированию дополнительного управляющего воздействия на привод. При использовании пропорционального закона управления оценить относи-

тельную величину погрешность управляющего задания, возникающую из-за учета ошибочного значения положения, можно с помощью выражения

$$\delta_{\text{ИП}} = \frac{K_P \cdot \Delta T}{K_V} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где K_P - коэффициент пропорциональности;

K_V - коэффициент задания по скорости.

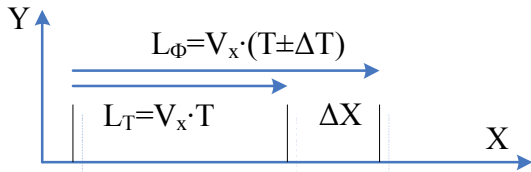


Рис. 7. Погрешность измерения положения

3. Оценка влияния нестабильности цикла по моменту времени выдачи управляющего задания приводу подач

Система ЧПУ осуществляет контроль позиционирования при движении по заданной траектории. Приводу передается задание скорости, необходимой для движения по траектории. При управлении с тактированием по времени, с достаточной для рассматриваемой задачи точностью, можно считать, что изменение управляющего задания приводу и параметры движения органа станка изменяются мгновенно в момент передачи задания приводу. На протяжении такта, до момента выдачи следующего управляющего воздействия параметры движения не изменяются, и органы станка перемещаются равноускоренно. Для обеспечения точности позиционирования по траектории, необходимо, чтобы в конце каждого такта управления органы станка перемещались с заданной скоростью. Если длительность цикла по событию выдачи управляющего воздействия на привод изменяется на величину ΔT , то в конце такта управления формируется ошибка скорости ΔV_x (рис. 8).

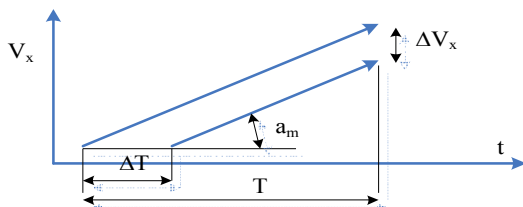


Рис. 8. Погрешность по циклу выдачи управляющего задания приводу

Ошибка по скорости требует формирования дополнительного управляющего воздействия, относительную величину которого, можно оценить с

помощью выражения

$$\delta_{\text{УП}} = \frac{a_m \cdot \Delta T}{V + a_m \cdot T}, \quad (8)$$

где a_m - допустимое ускорение движения;

V - текущая скорость координаты;

T - длительность цикла управления.

4. Экспериментальное исследование влияния нестабильности цикла на точность траекторных перемещений органов станка

Экспериментальное исследование влияния нестабильности цикла управления проведено на станке 16К20Ф3 с системой ЧПУ на базе персонального компьютера. На станке в соответствии с комплектацией завода изготовителя применены двигатели постоянного тока и привода подач типа «Кемток». На станке применены датчики положения типа ВЕ 178 А5-М (Z2500), обеспечивающие измерение положения с точностью до 0,001 мм. Такт управления системы ЧПУ 1000 мкс. Исследования проведены с использованием программно-аппаратного комплекса регистрации параметров движения органов станка и параметров функционирования системы ЧПУ, интегрированного с системой управления [10]. Система регистрации параметров обеспечивает непрерывную потактовую запись 300 параметров в течение 60 секунд. Для измерения длительности программных процедур применен внешний аппаратный таймер с разрешением $1 \cdot 10^{-7}$ сек.

Исследования проводились в диапазоне подач продольной координаты от 100 до 10000 мм/мин.

Значение относительной величины погрешности задания управляющего напряжения использовано для оценки погрешности управления в установленном режиме движения

$$\delta_{\text{Э}} = \frac{\Delta U}{U_{\text{ср}}}, \quad (9)$$

где ΔU - доля управляющего напряжения, обусловленная компенсацией наблюдаемой ошибки положения;

$U_{\text{ср}}$ - среднее управляющее напряжение в установленном режиме движения.

На рис. 9 приведены результаты обработки экспериментов, проведенных при различных настройках регулятора. На рис. 10 приведена зависимость погрешности управления движением от контурной подачи. Кривые $D_{\text{э-}}$; $D_{\text{э+}}$; $D_{\text{э}}$ отображают относительную погрешность управляющего задания в эксперименте при максимальной отрицательной и максимальной положительной погрешности позиционирования или диапазон изменения погрешно-

сти. Кривые $D_{ип}$, $D_{уп}$ отображают расчетную относительную погрешность управляющего задания по ошибке измерения положения и ошибке выдачи управляющего воздействия на привод. Величины расчетной относительной погрешности $D_{ип}$, $D_{уп}$ получены по соотношениям 7, 8, соответственно. Кривая $D_{сум}$ отражает суммарную величину расчетных погрешностей управляющего задания.

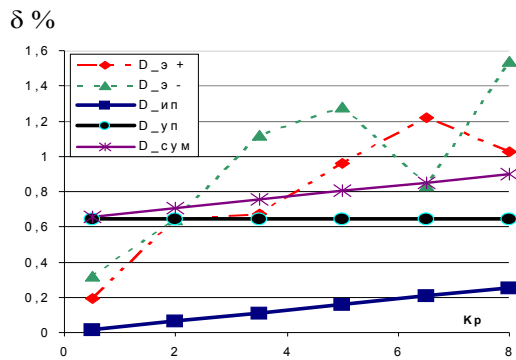


Рис. 9. Погрешность управления движением в зависимости от настройки регулятора

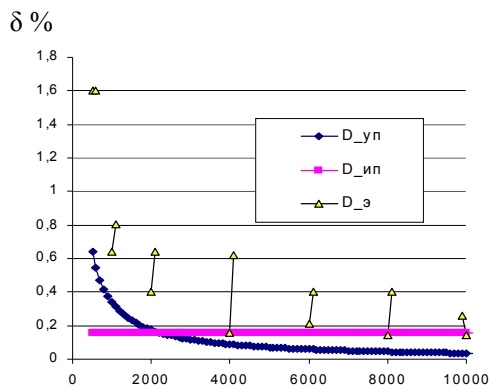


Рис. 10. Погрешность управления движением в зависимости от контурной подачи

Анализ приведенных данных показывает, что существует качественное совпадение характера изменения погрешности управления, обусловленной погрешностью длительности цикла, с характером изменения экспериментальных данных. Относительная погрешность управления при увеличении подачи уменьшается. При увеличении подачи свыше 2000 мм/мин в ошибке управления преобладает составляющая ошибки измерения положения ($D_{ип}$). При малых подачах преобладает воздействие ошибки длительности цикла по событию выдачи управляющего воздействия ($D_{уп}$). Соответственно, для технологических систем с малыми подачами рабочих органов, необходимо стабилизировать цикл управления по моменту выдачи управляющего воздействия на привод подач, а для высокоскоростных систем наиболее важной является стабилизация

цикла по событию измерения положения рабочих органов.

Увеличение усиления по каналу рассогласования регулятора приводит к незначительному увеличению погрешности управления, обусловленной погрешностью цикла по событию измерения положения

Заключение

Проведенные исследования подтвердили предположение о влиянии нестабильности цикла управления на точность управления траекторными перемещениями рабочих органов в станках с ЧПУ.

Рассмотрена схема организации цикла управления движением рабочими органами станка в системе ЧПУ на базе персонального компьютера. Экспериментально показано, что погрешность длительности этапа цикла обусловлена как случайными, так и регулярными процессами, происходящими в операционной системе и соответственно, проявляется в виде случайных и систематических погрешностей.

Предложенные соотношения для оценки влияния погрешности длительности цикла по событию измерения положения и выдачи управляющего воздействия приводу подач отображают качественный характер изменения погрешности управления.

Определено, что при управлении с подачами свыше 2000 мм/мин в ошибке управления преобладает влияние погрешности цикла по событию измерения положения ($D_{ип}$), а при малых подачах в ошибке управления преобладает влияние погрешности цикла по событию выдачи управляющего воздействия на привод ($D_{уп}$).

При создании технологических систем с ЧПУ на базе персонального компьютера необходимо выбирать различные схемы организации управляющего цикла в зависимости от максимальной подачи, реализуемой на оборудовании с целью стабилизации цикла по различным событиям управления.

Литература

1. Сосонкин, В. Л. Системы числового программного управления [Текст] : учеб. пос. / В. Л. Сосонкин, Г. М. Мартынов. – Москва : Изд-во Логос, 2005. – 296 с.
2. Сосонкин, В. Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: методологические аспекты построения открытых систем ЧПУ [Текст] / В. Л. Сосонкин, Г. М. Мартынов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. – № 2. – С. 2-11.
3. Букреев, В. Программно-аппаратный комплекс для исследования алгоритмов интерполяции траекторий движения многокоординатных электроприводов [Текст] / В. Букреев, Н. Гусев, М. Ко-

валенко // *Разработки. Научные исследования.* – 2007. – № 1. – С. 46–53.

4. Степанов, А. *Высокоскоростное фрезерование в современном производстве [Текст] / А. Степанов // CAD/CAM/CAE Observer.* – 2003. – № 4 (13). – С. 2–8.

5. Аврамов, А. А. *Прогнозирование подачи при высокоскоростной механообработке [Текст] / А. А. Аврамов // Cutting Tool Engineering.* – 2002. – № 3 (54). – С. 40, 42–44.

6. Никоноров, А. *Высокоскоростная фрезерная обработка [Текст] / А. Никоноров // Мир техники и технологии.* – 2008. – № 12 (85). – С. 28–31.

7. Шмидт, Ю. *Механообработка без применения смазочно-охлаждающей жидкости [Текст] /*

Ю. Шмидт, Т. Конольд, М. Дук // *Werkstatt und Betried.* – 2001. – № 9. – С. 38, 40, 42, 47–49.

8. Виттингтон, К. *Высокоскоростная механообработка [Текст] / К. Виттингтон, В. Власов // САПР и Графика.* – 2002. – № 11. – С. 107–113.

9. Потапов, В. *Линейные приводы: экономика и жизнь [Текст] / В. Потапов // ИТО новости.* – 2001. – № 2. – С. 47–52.

10. *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 31.05.2015, рассмотрена ан редколлегии 23.06.2015

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТАБІЛЬНОСТІ ЦИКЛУ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМИ ЧПУ НА ТОЧНІСТЬ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ РУХІВ

В. В. Комбаров, В. Ф. Сорокін, Е. А. Криживец

При створенні технологічних систем з числовим програмним управлінням (ЧПУ) для високошвидкісного фрезерування необхідно забезпечити високу точність траєкторних переміщень робочих органів верстата. Застосування для цих цілей систем ЧПУ на базі персонального комп'ютера вимагає проведення досліджень впливу похибки тривалості циклу управління і окремих його етапів на точність управління рухом. Для розглянутої схеми програмної організації циклу експериментально показано, що похибка тривалості циклу обумовлена процесами, що відбуваються в операційній системі, і проявляється у вигляді випадкових і систематичних похибок. Запропоновано співвідношення для оцінки впливу похибки тривалості циклу за подією вимірювання положення і видачі керуючого впливу приводу подач. Проведені дослідження підтверджують якісний збіг характеру зміни розрахункових і експериментальних похибок. Показано, що для систем з технологічними подачами понад 2000 мм/хв в помилці управління переважає вплив похибки циклу по події вимірювання положення.

Ключові слова: високошвидкісного фрезерування, система ЧПУ, точність позиції органів верстату, помилка позиції, цикл управління.

STUDY OF CNC SYSTEM CONTROL CYCLE STABILITY INFLUENCE ON SHAPE-GENERATING ACCURACY

V. V. Kombarov, V. F. Sorokin, E. A. Kryzhyvets

When creating technological system with CNC for highspeed machining it is necessary to provide high accuracy trajectory movements of work machine body. Application for this purpose CNC systems based on the PC requires studies of the effect of error cycle time management and its individual stages on the accuracy of motion control. For consideration of program circuit looping experimentally shown that the error of the cycle time due to processes occurring in the operating system, and is manifested in the form of random and systematic errors. Proposed ratios for assessing the impact of the error cycle time for the event, and measuring the position of the control actions feed drive. It is shown that for systems with process feeds more than 2,000 mm / min in the error management cycle is dominated by the influence of the error of measuring the position of the event.

Key words: high-speed milling (HSM), CNC system, machine organ precision placement, position error, control cycle.

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

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

Криживец Евгений Александрович – аспирант каф. технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».