

УДК 621.9.06-529

В.В. КОМБАРОВ, Е.А. АКСЕНОВ, Е.А. КРИЖИВЕЦ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОРГАНОВ СТАНКОВ С ЧПУ

Точность определения параметров перемещения, таких как положение, скорость и ускорение влияет на погрешность перемещения по контуру при высокоскоростной обработке. Проведены исследования с целью определения необходимого уровня точности получения данных о скорости и ускорении. Выявлено, что измерение положения с дискретностью 0,001 мм не позволяет получить корректные значения скорости и ускорения. Для определения скорости необходимо обеспечить разрядность измерения положения порядка $1 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-6}$ мм, а для определения ускорения $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ мм, что невозможно реализовать за счет увеличения дискретности датчиков. Предложено разработать алгоритмы устройства регистрации сигналов датчика и алгоритмы обработки данных о положении для определения значений скорости и ускорения с необходимой точностью.

Ключевые слова: ЧПУ, скорость, ускорение, дискретность, энкодер, измерительный сигнал.

Введение

Одним из основных направлений повышения эффективности механообработки в авиастроении является применение режимов высокоскоростной обработки на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). Использование режимов высокоскоростной обработки требует повышения технологической скорости перемещения рабочих органов до величин соизмеримых со скоростью ускоренного перемещения оборудования выпуска 80 – 90-х годов [1]. Повышение контурной подачи при обработке сопровождается повышением инерционных нагрузок на органы станка и увеличением динамических погрешностей позиционирования. Возникает задача обеспечения необходимой точности позиционирования при движении по заданному контуру с высокой подачей. Эта задача актуальна как при создании нового оборудования, так и при проведении модернизации существующего станочного парка. Для решения этой задачи в контуре управления положением органов станка применяют регулирование с дополнительными корректирующими звеньями по скорости и ускорению. Эффективность применения такого регулятора зависит от большого количества факторов, один из которых точность данных о скорости и ускорении рабочего органа, полученных по данным обратной связи по положению.

Целью проведения исследования является определение необходимого уровня точности получения данных о скорости и ускорении и определение путей ее достижения.

С этой целью решены задачи проведения исследований процесса движения органов станка 16К20Ф3, исследования размерности и величин скоростей и ускорений во внутреннем представлении ЧПУ, исследования предельной возможности повышения дискретности датчиков положения и сформулированы возможные пути обеспечения необходимого уровня точности данных скорости и ускорения.

1. Размерность скорости и ускорения во внутреннем представлении ЧПУ

Основной единицей времени в системе ЧПУ является такт управления. Под тактом управления понимается некий установленный промежуток времени ($T_{\text{ц}}$) в начале которого осуществляется контроль положения органов станка и установка управляющего задания скорости движения для приводов. Положение органа станка в произвольном такте управления ($X_{\Phi i}$) измеряется в дискретах (d). Система ЧПУ при обработке информации о процессе движения органов станка оперирует величинами тактовой скорости (V_t [$d/\text{такт}$]) и тактового ускорения (a_t [$d/\text{такт}^2$]) в единицах внутреннего представления длины в дискретах (d) за единицу времени равной такту управления (такт). Величины фактической скорости ускорения органа станка могут быть определены по изменению положения за такт:

$$V_{Ti} [d/\text{такт}] = \frac{(X_{\Phi i} - X_{\Phi i-1})[d]}{1[\text{такт}]}, \quad (1)$$

$$a_{Ti} \left[\frac{d}{\text{такт}^2} \right] = \frac{(V_{Ti} - V_{Ti-1}) \left[\frac{d}{\text{такт}} \right]}{1 \left[\text{такт} \right]}, \quad (2)$$

где X_{Φ_i} , $X_{\Phi_{i-1}}$ – фактическое положение органа в текущем и предыдущем такте; V_{Ti} , V_{Ti-1} – скорость в текущем и предыдущем такте; a_{Ti} – ускорение в текущем такте.

Выражения (3) и (4) позволяют преобразовать величины технологической подачи и ускорения к внутреннему представлению системы ЧПУ.

Цена деления одной дискреты зависит от кинематической схемы движения органа станка и типа датчика положения. Наиболее распространенным случаем является такое соотношение параметров механизма, при котором обеспечивается цена деления равная 0,0005 – 0,001 мм. В рассматриваемых далее материалах принята цена дискреты равная 0,001 мм:

$$V_T \left[\frac{d}{\text{такт}} \right] = \frac{F \left[\frac{\text{мм}}{\text{мин}} \right] \cdot K \left[\frac{d}{\text{мм}} \right]}{f_{Ц} \left[\frac{\text{такт}}{\text{сек}} \right] \cdot 60 \left[\frac{\text{сек}}{\text{мин}} \right]}; \quad (3)$$

$$a_T \left[\frac{d}{\text{такт}^2} \right] = \frac{1000 \left[\frac{\text{мм}}{\text{м}} \right] \cdot n \cdot g \left[\frac{\text{м}}{\text{сек}^2} \right] \cdot K \left[\frac{d}{\text{мм}} \right]}{f_{Ц}^2 \left[\frac{\text{такт}^2}{\text{сек}^2} \right]}, \quad (4)$$

где F [мм/мин] – технологическая подача; K [d/мм] – дискретность измерения положения; $f_{Ц}$ [Гц] – частота цикла управления; n – безразмерная величина перегрузки; g [м/сек²] – ускорение свободного падения.

2. Экспериментальное определение скорости и ускорения рабочих органов станка

Экспериментальные исследования процесса движения проведены на станке 16К20Ф3 с системой ЧПУ на базе персонального компьютера. Система ЧПУ интегрирована с программно-аппаратным комплексом исследования алгоритмов и процессов в станках с ЧПУ [2]. Частота цикла управления системы ЧПУ 1000 Гц. Исследования проведены на примере движения оси (Z) продольного перемещения суппорта. В системе измерения положения суппорта применен оптический датчик типа BE178 Z2500. Цена дискреты измерения положения с учетом алгоритма учетверенного счета и передаточного числа кинематической цепи составляет 0,001 мм. В соответствии с паспортом станка точность продольного перемещения суппорта составляет $\pm 0,01$. Проведенные исследования показали, что для организации управления по положению измерения положения органов станка в десять раз точнее требуемой точности позиционирования вполне достаточно,

но не достаточно для определения параметров скорости и ускорения.

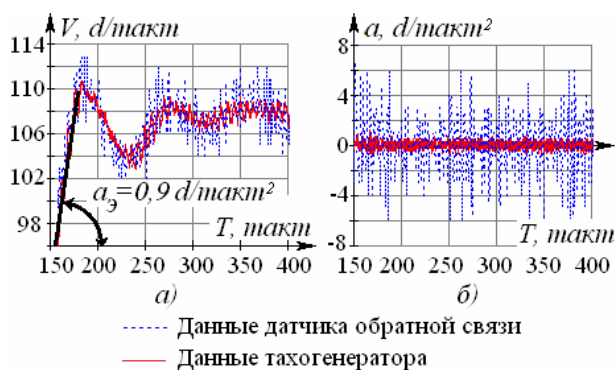


Рис. 1. Сравнение графиков:
а – скорости; б – ускорения

На рис. 1 приведены графики изменения скорости и ускорения, рассчитанные по данным датчика положения и полученные прямым измерением сигнала тахогенератора. Сигнал тахогенератора регистрировали осциллографом PV6501 при частоте дискретизации 8000 Гц и разрешении по напряжению 15,63 мВ, что в пересчете на разрешение по положению составляет 0,233 мкм.

Разброс величин скорости и ускорения по данным оптического датчика в несколько раз превышает разброс величин скорости по данным тахогенератора (см. рис.1). Разброс полученных значений может быть обусловлен как характером движения, так и параметрами системы измерения положения в системе ЧПУ. Для оценки влияния системы измерения положения проведено исследование движения маховика. На рис. 2 приведены графики изменения скорости и ускорения, полученные с оптического энкодера при плавном замедлении маховика. Очевидно, что график изменения скорости (см. рис. 2, а) не отображает плавного движения, а график изменения ускорения (см. рис. 2, б) не отображает равноускоренного движения. При фактическом значении ускорения a_3 равном $-0,006 \text{ d/такт}^2$ значение ускорения вычисленное по выражению 2 принимает дискретные значения $-1, 0, +1 \text{ d/такт}^2$.

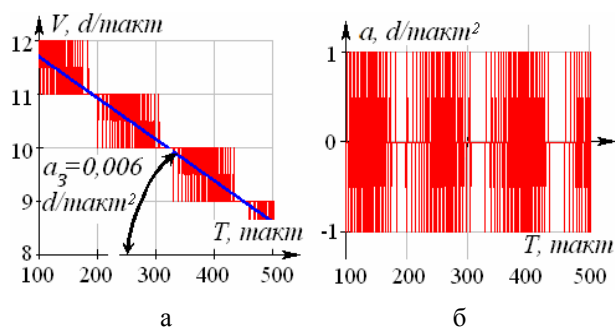


Рис. 2. Графики скорости (а) и ускорения (б) маховика

Несоответствие характеру движения связано с дискретностью представления данных в системе ЧПУ и обусловлено «грубой» дискретностью датчика. Разброс параметров может объясняться как характеристиками датчика, так и свойствами регистрирующей системы и системы обработки данных. Например, равномерность длительности цикла управления или предварительная обработка данных могут влиять на величину разброса.

Простейшим способом достижения оптимальных параметров является подбор датчика обратной связи, обеспечивающего требуемую точность измерений. Для этого необходимо определить величины дискретности измеряемых параметров, при которых будет достигнута необходимая точность.

3. Определение необходимой дискретности и разрядности величин скорости и ускорения

В современном оборудовании, предназначенном для высокоскоростной обработки, применяются системы ЧПУ с частотой цикла управления до 2500 Гц. [1]. Увеличение частоты цикла управления приводит к значительному уменьшению тактовой скорости. На рис. 3, а приведены зависимости тактовой скорости, рассчитанные по формуле (3) для различных частот управления. Достаточно большим технологическим скоростям соответствуют небольшие значения тактовой скорости. Так при частоте контроллера в 1000 Гц и технологической скорости 20 000 мм/мин тактовая скорость составляет всего 333,3 $d/макм$.

Улучшение качества управления при модернизации оборудования обеспечивает увеличение максимальной технологической подачи до величины равной скорости быстрого позиционирования. Так на станке 16К20Ф3 получена максимальная технологическая подача 9000 мм/мин. (тактовая скорость 150 $d/макм$).

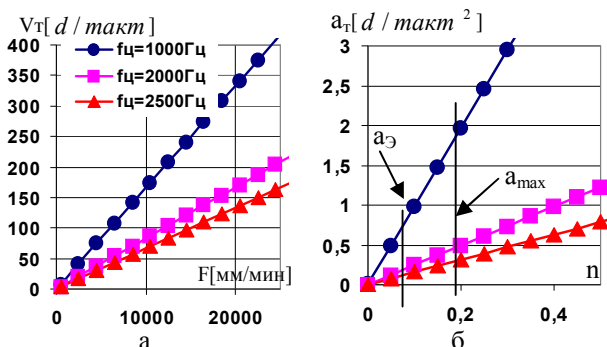


Рис. 3. Зависимости параметров движения:
а – тактовая скорость от технологической подачи;
б – тактовое ускорение от перегрузки;
 a_{max} – максимальное ускорение;
 $a_{э}$ – эксплуатационное ускорение

При измерении скорости движения рабочих органов станка с точностью до дискреты позиционирования имеется возможность распознавать максимум несколько сотен градаций скорости для современного высокоскоростного оборудования. При модернизации оборудования с максимальными скоростями движения органов до 6000 мм/мин количество градаций различаемых скоростей не превышает 100. Глубина регулирования приводов подач на модернизируемом оборудовании составляет 10000, а на современном оборудовании может достигать 30000. Это означает, что привод обеспечивает движение органа станка с соответствующим количеством градаций скорости. Таким образом, при измерении с точностью до дискреты позиционирования система ЧПУ определяет скорость движения органов станка от 100 до 300 раз грубее, чем в состоянии обрабатывать привод. Для определения параметров скорости необходимо обеспечить разрядность измерения положения порядка $1 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-6}$ мм.

Максимальное значение ускорения рабочих органов на современных станках с линейными двигателями достигает величин 1,5...2g [3]. Для системы ЧПУ с частотой управления 1000...2500 Гц такая перегрузка соответствует тактовому ускорению в 19...3,14 $d/макм^2$. Максимальные ускорения для модернизируемого оборудования значительно меньше указанных величин. Так при ступенчатом задании максимального перепада управляющего напряжения продольное перемещение суппорта станка 16К20Ф3 максимальное ускорение составляет 2,1 $d/макм^2$, что соответствует перегрузке 0,21g (ограничение a_{max} рис. 3, б). При этом S-образный закон разгона-торможения, обеспечивающий приемлемые характеристики точности, достигает максимального ускорения порядка 0,9 $d/макм^2$, что соответствует перегрузке порядка 0,09g (ограничение $a_{э}$, рис. 3, б). Начальное ускорение S-образного закона может составлять 0,002...0,010 $d/макм^2$. Таким образом, физическая величина ускорения для большинства типов оборудования должна определяться с точностью от 0,001 до 0,01 доли дискреты. При измерении с точностью до дискреты позиционирования система ЧПУ определяет фактическое ускорение рабочих органов станка от 100 до 1000 раз грубее ее фактической величины. Для определения параметров ускорения необходимо обеспечить разрядность измерения положения порядка $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ мм.

4. Ограничение дискретности датчиков положения

В используемой нами системе ЧПУ для измерения положения органов станка используются ин-

крементные оптические энкодеры. Достоинствами оптических энкодеров является высокая помехоустойчивость при передаче сигнала по проводам значительной длины, легкость монтажа, высокая степень защиты.

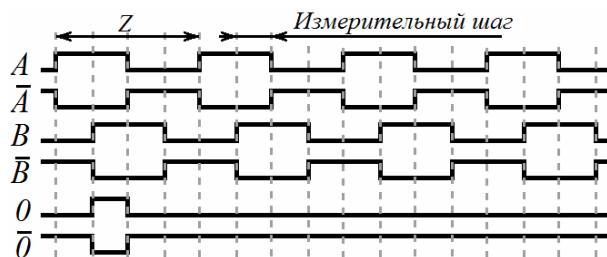


Рис. 4. Измерительные сигналы инкрементального энкодера

На выходе с датчика формируются квадратурные сигналы (рис. 4). Смещение сигнала по каналу В относительно А позволяет определять направление вращения. Количество периодов сигнала А, В определяется количеством измерительных штрихов датчика (Z). Алгоритм учетверенного счета позволяет использовать в качестве измерительного шага расстояние между двумя ближайшими фронтами сигналов А, В. Устройство измерения положения органов станка выполняет непрерывный счет с учетом направления движения фронтов сигналов А, В. Наличие инверсных сигналов обеспечивает высокую степень помехозащищенности.

В предыдущем разделе показано, что для измерения физических параметров движения, таких как скорость и ускорение, необходимо определять значения величин в 1000 раз точнее, чем это выполняется в описанном примере. Рассмотрим возможность измерения параметров движения за счет применения датчиков с большей дискретностью.

Передовые производители выпускают угловые датчики положения с количеством измерительных штрихов до $3,6 \cdot 10^6$ d/об. Допустимая скорость вращения углового датчика ограничивается механическими возможностями подшипниковых узлов датчика и максимально допустимой частотой измерительного сигнала ($f_{\text{И}}$) (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры энкодеров

Тип	n_{max} , об/мин	Z , d/об	$f_{\text{И}}$, кГц	Изготовитель
A110-F	5000	9000...180000	125	Brown & Sharpe
ERN420	6000/12000	1000...5000	≥ 300	Heidenhain
ERN460	6000/12000	1000...5000	≥ 300	Heidenhain

Выражение (5) связывает частоту измерительных импульсов с механической частотой вращения и количеством штрихов датчика:

$$f_{\text{И}} [\text{Гц}] = \frac{n_{\text{В}} [\text{об/мин}] \cdot Z [\text{d/об}]}{60 [\text{сек/мин}]} \quad (5)$$

Очевидно, что сочетание максимальных значений параметров дает частоту электрического сигнала значительно превышающую допустимую. Таким образом, существует объективное ограничение максимально возможной дискретности датчика положения по ограничению электрических параметров измерительного сигнала датчика.

Ниже приведены выражения, которые позволяют определить максимально допустимую дискретность вращающегося энкодера при использовании его в системе измерения положения линейных осей (6) и углового позиционирования шпинделя (7)

$$Z [\text{d/об}] = \frac{f_{\text{И}} [\text{Гц}] \cdot h [\text{мм/об}] \cdot 60 [\text{сек/мин}]}{F [\text{мм/мин}]} \quad (6)$$

$$Z [\text{d/об}] = \frac{f_{\text{И}} [\text{Гц}] \cdot 60 [\text{сек/мин}]}{n_{\text{В}} [\text{об/мин}]} \quad (7)$$

где Z – количество измерительных штрихов датчика; $f_{\text{И}}$ – предельная частота измерительных импульсов; h – перемещение линейного органа на один оборот датчика; F – технологическая подача.

При использовании в системе измерения положения линейных осей и алгоритма учетверенного счета цена дискреты

$$d [\text{мм}] = \frac{h [\text{мм/об}]}{4 \cdot Z [\text{d/об}]} \quad (8)$$

Рассмотрим выбор параметров датчика на примере модернизации станка типа 16K20Ф3 (рис. 5). Максимальная подача продольного перемещения по паспорту станка составляет 7500 мм/мин . Для случая модернизации без увеличения максимальной подачи и использовании датчика с предельно допустимой частотой измерительных импульсов 300 КГц получаем необходимое количество штрихов датчика $Z = 24000 \text{ d/об}$. При этом цена дискреты составляет $1 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$, что как минимум в 100 раз грубее необходимой разрядности.

Увеличение необходимой технологической подачи приводит к уменьшению максимально допустимого количества штрихов датчика и соответственно увеличению цены дискреты измерительной системы.

При необходимости перемещения органов с подачей 60000 мм/мин предельное количество штрихов вращающегося энкодера составляет 3000 d/об , а цена дискреты составляет $0,8 \text{ мкм}$.

В диапазоне технологически обоснованных скоростей вращения шпинделя от 2000 до 10000 об/мин дискретность датчика позиционирования шпинделя ограничена значением 9000 ... 1800 d/об.

Таким образом, обеспечить необходимую точность измерения скорости и ускорения за счет простого увеличения дискретности датчика невозможно.

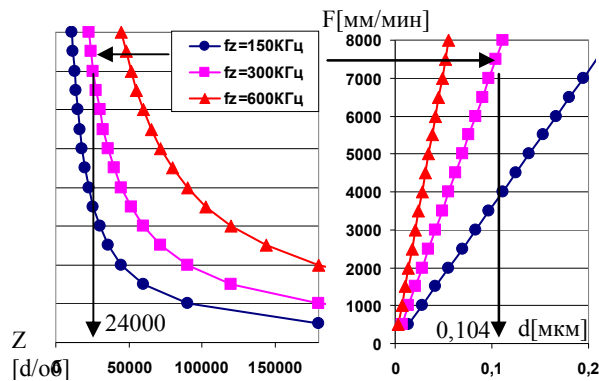


Рис. 5. Определение предельной дискретности датчика и цены дискреты линейного перемещения координаты

4. Пути решения задачи определения скорости и ускорения по данным обратной связи положения рабочего органа станка

Решение задачи определения скорости и ускорения рабочих органов станка следует искать в разработке алгоритмов работы устройства регистрации сигналов датчика и алгоритмов обработки данных о положении.

Алгоритм работы регистрирующего устройства должен обеспечивать не только подсчет импульсов датчика, но и подсчет периода следования импульсов, по которому непосредственно может быть вычислена величина скорости. Следует учитывать, что вычисление дополнительных параметров в регистрирующем устройстве сопровождается усложнением схемы устройства, а значит, повышением его стоимости. Существенное влияние на работу такого устройства будут оказывать погрешности датчика, в частности неравномерность расположения измерительных штрихов. Разработка алгоритма требует дополнительных исследований.

В устройстве обработки данных величина скорости может быть определена путём предварительной математической обработки данных о положении

или периодах следования измерительных сигналов. Алгоритм обработки должен учитывать теоретически допустимые пределы величин скорости и ускорения и максимально допустимые величины запаздывания получения данных. Следует учитывать, что обработка должна выполняться в режиме реального времени. Исходя из этих требований, может быть сформирован оптимальный алгоритм математической обработки, обеспечивающий точность определения значений параметров.

Немаловажным является обеспечение стабильности цикла управления, определяющего период регистрации данных с датчика. Эта проблема относится как к регистрирующему устройству, так и к устройству обработки и решается путём согласования их работы.

Заключение

В результате проведенных исследований определен необходимый уровень точности получения данных о скорости и ускорении. Для определения скорости необходимо обеспечить разрядность измерения положения до $1 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-6}$ мм., а для определения ускорения $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ мм.

Повышение дискретности датчика из-за ограничения частоты измерительных импульсов не позволяет обеспечить необходимую разрядность измерения положения. Так при модернизации станка типа 16К20Ф3 повышение дискретности датчика позволяет повысить разрядность измерения положения только до $1 \cdot 10^{-4}$ мм.

Решение задачи определения скорости и ускорения рабочих органов станка с необходимой степенью точности следует искать в разработке алгоритмов работы устройств регистрации сигналов датчика и алгоритмов обработки данных.

Литература

1. Комбаров В.В. Исследование влияния частоты цикла управления системы ЧПУ на точность обработки / В.В. Комбаров, Е.В. Комбарова, Е.А. Аксёнов // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 144-148.
2. Комбарова Е.В. Исследование кинематических параметров движения органов станка с ЧПУ / Е.В. Комбарова, Р.В. Варнас // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 72-77.
3. Потапов В. Линейные приводы: экономика и жизнь / В. Потапов // ИТО новости. – 2001. – № 2. – С. 47-53

Поступила в редакцию 27.05.2011

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

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕМІЩЕННЯ ОРГАНІВ ВЕРСТАТИВ З ЧПК

В.В. Комбаров, Є.О. Аксенов, Є.О. Криживец

Точність визначення параметрів переміщення, таких як положення, швидкість і прискорення впливає на похибку переміщення по контуру при високошвидкісній обробці. Проведено дослідження з метою визначення необхідного рівня точності отримання даних про швидкість і прискорення. Виявлено, що вимірювання положення з дискретністю 0001 мм не дозволяє отримати коректні значення швидкості і прискорення. Для визначення швидкості необхідно забезпечити розрядність вимірювання положення порядку $1 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-6}$ мм., а для визначення прискорення $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ мм, що неможливо реалізувати за рахунок збільшення дискретності датчиків. Запропоновано розробити алгоритми пристрою реєстрації сигналів датчика та алгоритми обробки даних про положення для визначення значень швидкості та прискорення з необхідною точністю.

Ключові слова: ЧПК, швидкість, прискорення, дискретність, енкодер, вимірювальний сигнал.

DETERMINATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF CNC MACHINES EXECUTION UNITS

V.V. Kombarov, E.A. Aksenov, E.A. Kryzhyvets

At high-speed machining accuracy of determination of motion parameters like position, speed and acceleration, influence errors of motion along contour. Investigations are carried out with aim of determination of accuracy required level for speed and acceleration data. It was revealed that position measurements with discreteness of 0.001 mm do not permit to obtain proper values of speed and acceleration. In order to determine speed it is necessary to provide position measurements with decimal digit position of $1 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-6}$ mm, and for acceleration – $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ mm, that is not possible to realize only at the expense of sensors discreteness increase. Development of algorithms for sensors signals recording device and algorithms of data processing for determination of speed and acceleration values with a required accuracy is proposed.

Key words: CNC, speed, acceleration, discreteness, encoder, measuring signal.

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

Аксенов Евгений Александрович – аспирант кафедры 501 проектирования радиоэлектронных систем ЛА Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aks-ev@mail.ru.

Криживец Евгений Александрович – инженер 3 категории кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Cj_31337@mail.ru.