

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ синхронизации и точного позиционирования осей в системе ЧПУ

Л.И. Мартинова, Р.Л. Пушков,
Н.В. Козак, Е.С. Трофимов (МГТУ "Станкин")

Рассмотрены архитектура и специфика построения подсистем синхронизации и точного позиционирования осей в открытой модульной системе ЧПУ. Представлены практические результаты решения этих задач на примере станков зубофрезерования и координатно-измерительной машины. Выявлены и проанализированы особенности управления движением в станках с портальной организацией исполнительных механизмов осей перемещения¹.

Ключевые слова: ЧПУ, точность обработки, синхронизация осей, электронная коробка скоростей, ведущий и ведомый привод, зубофрезерование, свободная кинематика.

Введение

Основным требованием, которому должны удовлетворять металлорежущие станки в соответствии с их служебным назначением – точность относительного перемещения инструмента и заготовки, что определяет формообразование изготавливаемого изделия, погрешности размеров, формы и расположения обрабатываемых поверхностей [1, 2].

Точность относительного перемещения инструмента и заготовки зависит от точности кинематических перемещений и точности позиционирования, которая определяется тем, насколько точно режущий инструмент в процессе обработки выходит в функциональную точку с определенными координатами (подразумевает точность при подходе к заданной точке с любой стороны, а также постоянство выхода рабочего органа станка в заданную координату при многократном повторении). Частным случаем точности позиционирования является точность угловых (делительных) перемещений. Эти требования относятся, в основном, к станкам координатной группы, особенно к станкам многоцелевого назначения, когда режущий инструмент в процессе обработки должен выходить в функциональную точку с определенными координатами.

В металлообработке есть ряд формообразовательных процессов, в которых обрабатываемая поверхность формируется в результате кинематической связи перемещения инструмента и заготовки, например, обработка зубчатых колес, винтовых поверхностей, резьбы и т.п. Для получения таких поверхностей станок должен обеспечить согласованное движение заготовки и инструмента. При изготовлении зубчатых колес воспроизводится так называемое зубчатое зацепление (например, воспроизводится обкат зубчатой рейки и диска заготовки).

Точность согласования указанных движений называют кинематической точностью или точностью обката. В обычных станках кинематическая точность обеспечивается жесткой кинематической связью, которая реализуется механической коробкой скоростей. Это очень негибкое решение, так как даже незначительная смена номенклатуры изделий требует значительных затрат времени на переналадку оборудования. В станках с ЧПУ класса Hi-End, обладающих мощными вычисли-

тельными ресурсами, эта задача решается на уровне ЧПУ без применения настраиваемой коробки скоростей. Суть состоит в реализации функциональности "синхронизация осей", управляемых прецизионными следящими приводами. При этом обеспечивается высокая кинематическую точность, а настройка станка сводится к простой смене управляющей программы.

Применение следящего привода подачи с замкнутой схемой управления сопряжено с двумя видами погрешностей, снижающих точность перемещений рабочих органов:

- погрешностями элементов привода подачи и рабочего органа, не охватываемые системой обратной связи; эти погрешности появляются в основном при применении систем обратной связи с круговым измерительным преобразователем (ИП);
- погрешностями результатов измерения перемещения или угла поворота рабочего органа станка, полученных измерительным преобразователем.

Точное позиционирование осей станка, в том числе обеспечение требуемого положения инструмента относительно заготовки система ЧПУ обеспечивает синхронным управлением приводами движения. При этом решается одна из задач:

- синхронизация приводов для движения по одной координате;
- синхронизация нескольких осей для реализации сложного согласованного движения.

Первая задача имеет место в станках портального типа, протяженных конвейерах, печатных и упаковочных машинах, где движение по одной координате (исполнительного узла или заготовки) производится посредством более чем одним двигателем. Для портальных станков такое решение продиктовано потребностью обеспечить жесткость конструкции, снизить возможных погрешностей от механических передач и деформаций и т.п.

Для печатных, прокатных и конвейерных машин необходимость в синхронной работе нескольких двигателей обусловлена протяженностью самого конвейера либо подвергаемого обработке материала (бумаги, пленки, ткани и т.п.) прокатываемого через серию валков. Ранее задача синхронизации движения здесь решалась механическим путем, например, применением

¹ Работа выполнена по Госконтрактам № П901 и № П717 на проведение НИР в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

клиноременной или зубчатой передач. Решения этой задачи на уровне ЧПУ позволяет исключить механическую синхронизацию, обеспечивая более высокую надежность, производительность и снижение эксплуатационных издержек. Фирма Bosch Rexroth применяет электронную линейную передачу (ELS), реализующую многоосевую синхронизацию движений, повышающую производительность упаковывающих, конвертирующих и печатных машин. В частности, ELS обеспечивает точность пятна чернил 0,01 мм при скорости печати более 48 км/ч [3].

Синхронизация нескольких осей требуется при механообработке поверхностей сложного профиля или организации согласованных операций исполнительных узлов машины. В таких случаях обычно реализуется синхронизация осей с использованием ведущего привода, как это делается при зубофрезеровании червячной фрезой. Система ЧПУ позволяет не только исключить потребность в редукторе с изменяемым передаточным числом, но и значительно повысить точность согласования и позиционирования осей.

Решение задачи синхронизации осей в современных системах ЧПУ ведущих производителей

Задачу синхронизации осей каждый производитель систем ЧПУ решает по-своему из-за отсутствия стандартов в этой области [4].

В системах ЧПУ серий 30i-32i фирмы Fanuc синхронизация осей реализуется электронной коробкой скоростей (EGB – Electric Gear Box). Ось, задающая перемещение, называется главной или ведущей осью, а ось, перемещение которой синхронизировано с ведущей осью называется ведомой осью. Например, при синхронизации перемещения заготовки с вращением инструмента, последнее выступает в качестве движения ведущей оси, а перемещение заготовки – ведомой. В системах Fanuc ведущей осью считается главный шпиндель, а ведомой – ось С.

Синхронизация осей включается и выключается при помощи команд G81/G80:
 G81 T... [L ...] [Q ... P ...]; включение синхронизации осей;
 G80; выключение синхронизации осей.

Параметры команды G81:
 T – число зубьев, ед. 1... 1000
 L – число заходов фрезы, ед. 21... 21
 Q – модуль, мм. 0,1... 25,0
 P – угол наклона, гр. 90,0... 90,0°

Для параметра L знаки "+" или "-" означают вращение оси заготовки в положительном или отрицательном направлении. Если значение L не указывается, то по умолчанию принимается L = 1. Параметры Q и P задаются для косозубых колес.

При нарезании косозубых колес необходимо не только согласовать вращение заготовки и фрезы (для получения эвольвентного профиля), но и обеспечить дополнительное движение доворота заготовки с целью получения профиля (винтовой линии) по длине зуба. Доворот заготовки ас зависит от текущего перемещения вдоль оси Z и рассчитывается по формуле:

Книга является средством перемещения в пространстве опыта со скоростью переборачиваемой страницы.

Иосиф Бродский

$$a_c = Z \cdot \sin(P)/\pi \cdot T \cdot Q.$$

Для повышения точности расчетов коэффициент синхронизации осей K сохраняется в системе в виде обыкновенной дроби с числителем K_n и знаменателем K_d, которые рассчитываются по формулам:

$$K_n = L \cdot \beta,$$

$$K_d = T \cdot \alpha,$$

где T – число зубьев; L – число заходов фрезы; α – число дискрет на оборот датчика ведущей оси; β – число дискрет на оборот датчика ведомой фрезы.

При включении режима синхронизации производится следующая последовательность действий:

- при отработке команды G81 ведомая ось ускоряется (ускорение задается в машинных параметрах) до скорости синхронизации. По достижении скорости синхронизации блок G81 считается исполненным;
- для отмены режима синхронизации указывается команда G80. Во избежание поломки инструмента или заготовки данную команду нельзя исполнять до отвода инструмента от заготовки. При отработке команды ведомая ось тормозится (ускорение задается в машинных параметрах). По достижении скорости ведомой оси, равной нулю, команда G80 считается исполненной.

Пример программы, содержащей синхронизацию осей

N0010 M19	; задание ориентации оси инструмента
N0020 G28 G91 C0	; реферирование оси заготовки
N0030 G81 T20 L1	; включение синхронизации (поворот заготовки на 18° за 1 оборот фрезы)
N0040 S300 M03	; задание скорости вращения инструмента
N0050 G01 X... F...	; перемещение по оси X (врезание)
N0060 G01 Z... F...	; перемещение по оси Z (обработка)
...	
N0100 G01 X... F...	; отвод инструмента
N0110 M05	; остановка вращения инструмента
N0120 G80	; отключение синхронизации
N0130 M30	

В системах ЧПУ серии IndraMotion MTX фирмы RexrothBosch задача синхронизации осей решается более универсально. Ведущие и ведомые оси, а также их коэффициенты синхронизации задаются в сис-

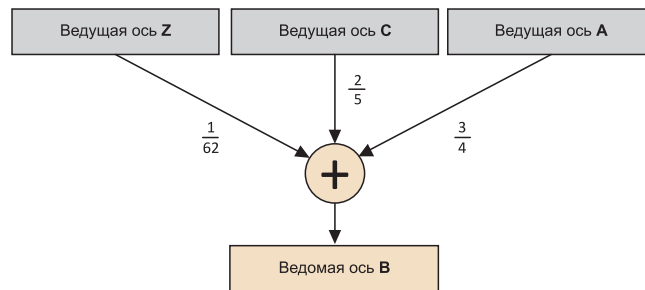


Рис. 1. Зависимость осей в системах Rexroth Bosch

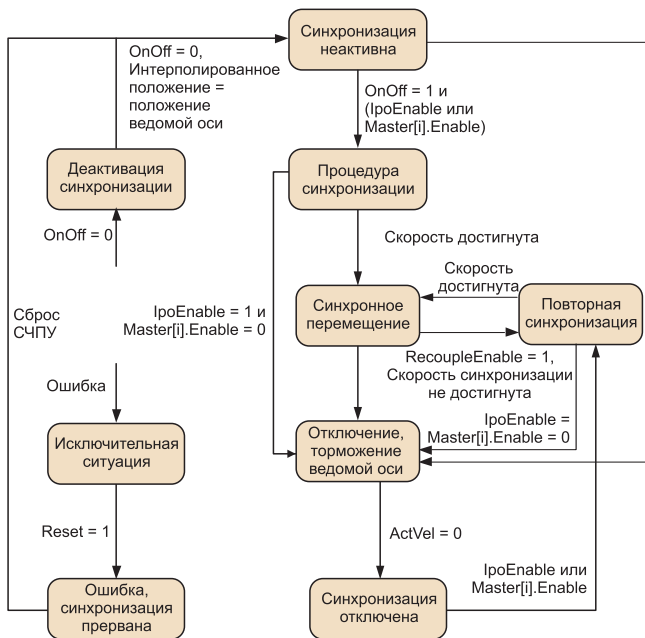


Рис. 2. Граф состояний системы в процессе синхронизации осей

темных параметрах. При этом возможно задать несколько ведущих осей для одной ведомой, как это, например, представлено на рис. 1.

В управляющей программе допускается назначение каскадных зависимостей для осей, когда ось имеет ведущую ось и одновременно является ведущей для другой оси.

При запуске системы синхронизация осей отключена. В дальнейшем она контролируется определенным набором системных переменных, которые устанавливаются в управляющей программе (максимальная скорость ведомой оси, максимальное ускорение, логический параметр, задающий включение/выключение синхронизации и др.)

Граф состояний системы в процессе синхронизации осей приведен на рис. 2.

При расчете позиции ведомой оси учитываются коэффициенты синхронизации и смещения для всех ведущих осей.

В системах Sinumerik SolutionLine (840Dsl) фирмы Siemens технология синхронизации осей для зубонарезания называется EG (ElectronicGearbox). Она позволяет рассчитывать движение ведомой оси на основе движения ведущих осей (их может быть до пяти). Соотношения перемещений между ведомой осью и каждой из ведущих устанавливаются при помощи коэффициентов синхронизации. Синхронизация движения осей может производиться с учетом текущего значения ведущей оси или с учетом заданного значения. Оси могут синхронизироваться каскадно, то есть ведомая ось может быть ведущей для другой оси.

Перед включением синхронизации назначают синхронизируемые оси. *Делается это при помощи команды EGDEF (ведомая ось, ведущая ось 1, тип синхро-*

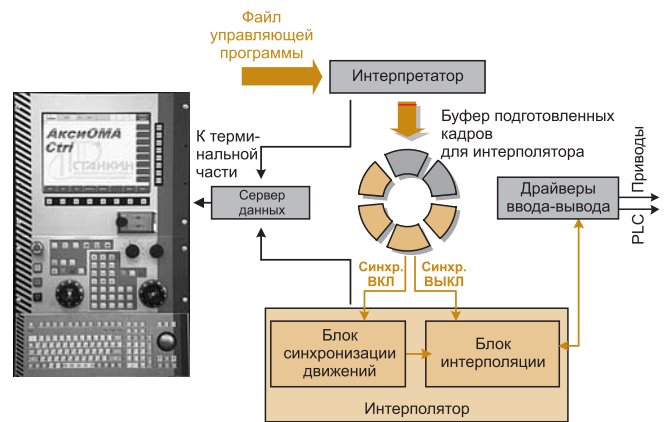


Рис. 3. Классическая архитектура реализации геометрической задачи

низации 1, ...), где тип синхронизации: 0 – расчет по текущей позиции ведущей оси, 1 – расчет по заданной позиции ведущей оси.

Включение синхронизации возможно в нескольких режимах, рассмотрим два из них:

$$EGON(FA, BCM, LA1, Z1, N1, ...) \text{ и } EGONSYN(FA, BCM, SynPosFA, LA1, SynPosLA1, Z1, N1, ...),$$

где FA – ведомая ось; LAi – ведущая ось; Zi – числитель коэффициента синхронизации для i -й оси; Ni – знаменатель коэффициента синхронизации для i -ой оси; $SynPosFA$, $SynPosLAi$ – позиции синхронизации ведомой и ведущих осей; режим синхронизации включается при достижении заданных позиций осями; BCM – режим перехода к следующей команде (он может быть: NOC – когда управление следующей командой передается немедленно, или $FINE$, $COARSE$, $IPOSTOP$ – когда управление следующей командой передается при достижении определенного условия; $разница$ – различаются режимы точностью синхронизации).

При включении режима $EGON$ синхронизация осей запускается немедленно. В режиме $EGONSYN$ оси выходят в заданные позиции, после чего запускается синхронизация.

В общем виде расчет положения ведомой оси производится по формуле:

$$FA_{ycm} = SynPosFA + \sum((LA_i - SynPosLA_i) \cdot CF_i),$$

где $SynPosFA$ и $SynPosLA_i$ – позиция синхронизации для ведомой и ведущих осей; FA_{ycm} – расчетная позиция ведомой оси; LA_i – установочная или текущая позиция ведущей оси; CF_i – коэффициент связи для i -й оси.

Модуль синхронизации осей в архитектуре ядра системы ЧПУ

Архитектура геометрической задачи системы ЧПУ типа PCNC [5] предусматривает наличие интерпретатора, который на входе принимает управляющую программу и создает IPD-код для интерполятора, который, в свою очередь, генерирует команды управления для приводов и электроавтоматики [6].

Реализация задачи синхронизации осей подразумевает расширение функциональностей интерполятора путем добавления специального режима работы, при котором команды управления осями поступают на специальный блок синхронизации, содержащий коэффициенты связи между осями. Данный блок генерирует команды для синхронного движения осей (рис. 3).

Синхронизация движения осей может быть "жесткой" или "настраиваемой". Жесткая синхронизация подразумевает настройку параметров синхронизации в машинных параметрах на этапе ввода системы ЧПУ в эксплуатацию, после чего изменение параметров синхронизации из управляющей программы невозможно. Такой режим синхронизации может применяться, например, в станках с портальной компоновкой, где несинхронное движение может привести к заклиниванию станка.

В режиме настраиваемой синхронизации движения осей коэффициенты синхронизации задаются в управляющей программе, а режим синхронизации включается или выключается при помощи специальной команды.

Расширение языка разработки управляющих программ с учетом требований задач синхронизации осей

В языке управляющих программ системы ЧПУ "АксиОМА Контрол" (разработка МГТУ "Станкин") для задания параметров и включения/выключения режима синхронизации используются специально сформированными G-и M-команды [7]. Включение режима синхронизации осей осуществляется функцией M902, выключение — функцией M903. При первом включении режима синхронизации связи между осями не определены. В этом случае при перемещении осей движение будет производиться так же, как если бы синхронизация осей не была включена. При выключении режима синхронизации осей связи между осями запоминаются блоком синхронизации и при последующем включении синхронизации сразу же применяются. Параметры синхронизации задаются командой G583 <ведущая ось><коэффициент ведомой оси>.

Например, G583 X0 Y0.5 означает, что в режиме синхронизации в качестве ведущей оси выступает ось X, а ведомой с коэффициентом 0,5 — ось Y. То есть при выполнении команды G01 G91 X100, ось Y синхронно переместится на 50 единиц (кадр будет аналогичен кадру G01 G91 X100 Y50).

Допускается задание нескольких ведущих осей для одной ведомой, при этом перемещения ведомой оси будут суммироваться. Например, в следующем примере кадр N120 задает перемещение оси Y на 54 единицы:

```
N100 G583 X0 Y0.5,
N110 G583 Z0 Y0.2,
N120 G01 G91 X100 Z20;
```

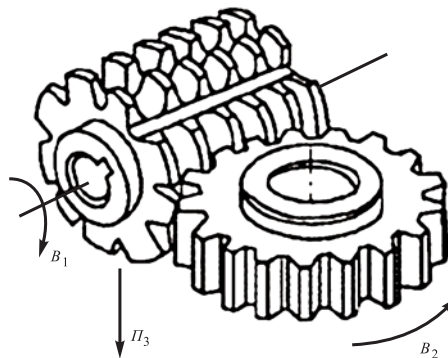


Рис. 5. Нарезание прямозубого зубчатого колеса

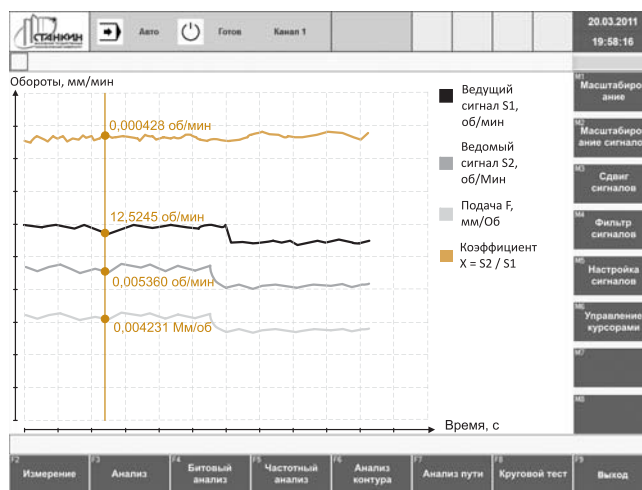


Рис. 4. Проверка синхронизации приводов зубофрезерного станка

$$100 \cdot 0,5 + 20 \cdot 0,2 = 54.$$

Язык предусматривает каскадное задание синхронизации осей, когда ось является ведущей для одной из осей и ведомой — для другой [8]. Пример:

```
N100 G583 X0 Y0.5,
N110 G583 Y0 Z0.2,
N120 G01 G91 X100.
```

Здесь в кадре N120 ось Y переместится на $100 \cdot 0,5 = 50$ единиц, а ось Z переместится на $50 \cdot 0,2 = 10$ единиц.

Удаления данных о связях между осями осуществляется командой G584, которая указывается без параметров.

Проверка точности синхронизации осей при помощи встроенного в систему ЧПУ инструментария

Рассмотрим процесс проверки точности синхронизации осей в случае портального станка с двумя приводами и одной осью. С помощью встроенного в систему ЧПУ осциллографа [9], сигналы с обоих приводов, а также расхождение между ними и максимально допустимое расхождение, выводятся на экран. Оператор имеет возможность отслеживать значения сигналов и расхождение в любой момент времени посредством передвигаемого курсора.

При синхронизации осей зубофрезерного станка

нужно контролировать отношение между скоростями фрезы и заготовки и величину подачи. Для этого на экран выводятся сигналы с приводов движения инструмента и заготовки, их отношение, а также скорость подачи (рис. 4). Сигналы автоматически масштабируются, чтобы вписаться в экран. Оператор, выбрав сигнал, видит реальную шкалу активного сигнала. С помощью передвигаемого курсора отслеживаются значения величин сигналов и расхождения в любой момент времени.

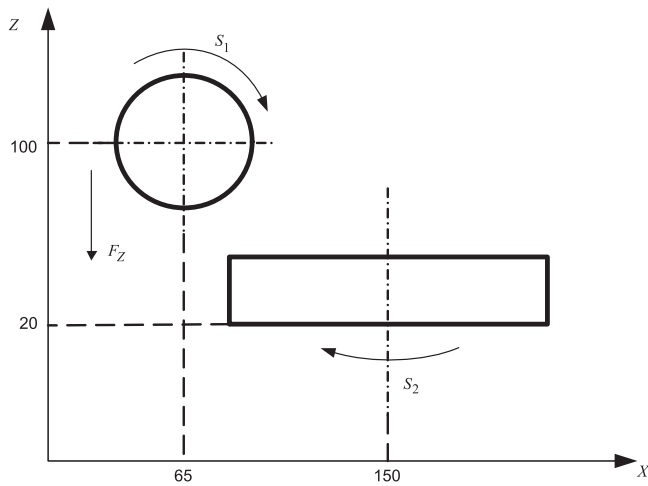


Рис. 6. Схема обработки цилиндрического прямозубого колеса

Практическая реализация задач синхронизации осей на примере зубофрезерного станка

Рассмотрим пример нарезания прямозубого колеса червячной фрезой на зубофрезерном станке (рис. 5). Для этого необходимы два движения формообразования: главное — $\Phi_s(B_1B_2)$, согласующее вращения фрезы и заготовки и обеспечивающее образование эвольвентного профиля, и движение подачи — $\Phi_s(L_3)$, обеспечивающее получение профиля (прямой линии) по длине зуба.

Для согласования вращений заготовки и фрезы в главном движении формообразования используется следующая зависимость [10]:

$$1 \text{ оборот фрезы} \rightarrow k/z \text{ оборотов заготовки,}$$

где k — число заходов фрезы; z — число зубьев нарезаемого колеса.

Рассмотрим пример. Пусть необходимо обработать зубчатое колесо с параметрами: $m = 3$ мм, $z = 33$, $k = 2$, ширина венца зуба — 30 мм. Обработка производится фрезой диаметром $d_{\text{фрезы}} = 85$ мм. Упрощенная схема обработки показана на рис. 6.

Для данной схемы режимы резания $S1 = 100$ об/мин, $S2 = (2/33) \cdot S1 = 6,061$ об/мин, подача вдоль оси Z — 15,15 мм/мин.

Вид управляющей программы:

G00 X65 Z100 ; подвод инструмента
M902 ; включение режима синхронизации осей
G584 ; сброс параметров синхронизации

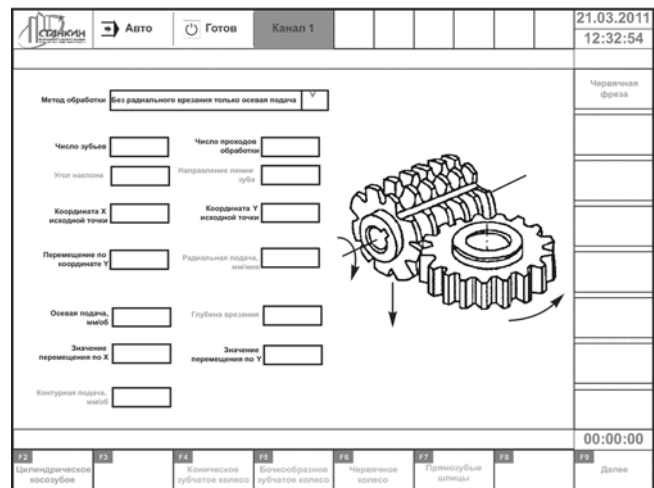


Рис. 7. Пример экрана оператора системы ЧПУ для зубофрезерования

G583 S1=0 S2=0.061 ; задаем коэффициенты синхронизации
S1=100 M3 ; запуск оси S1, ось S2 вращается синхронно

G91 G01 F15.15 Z-90 ; подача
S1=0 M5 ; останов вращения осей
M903 ; выключение синхронизации
G00 X-40 ; отвод инструмента
G00 Z90

Типовые случаи обработки зубчатых поверхностей реализуют в виде станочных циклов зубофрезерования. Оператору предоставляется интерфейс, состоящий из нескольких экранов (рис. 7), проходя которые оператор выбирает в диалоговом режиме параметры обработки, заготовки и инструмента. На основании введенных параметров автоматически формируется управляющая программа, которая может быть непосредственно выполнена или отредактирована оператором.

Заключение

Решение задач синхронизации и точного позиционирования осей на уровне ЧПУ обеспечивает высокую конкурентоспособность технологического оборудования, так как повышает гибкость и степень использования оборудования, в том числе токарно-фрезерных станков, значительно упрощает кинематическую схему станка, позволяет создавать станки с портальной конструкцией движущихся координат.

Статическая синхронизация осей, например, для управления движением портала, жестко задается при вводе станка в эксплуатацию. Для реализации динамической синхронизации осей система ЧПУ предоставляет набор G-функций или функций высокоуровневого языка программирования. Современные

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

- в России — в любом почтовом отделении по каталогу "Газеты. Журналы" агентства "Роспечать" (подписной индекс 81874) или по каталогу "Пресса России" (подписной индекс 39206).
- в странах СНГ и дальнего зарубежья — через редакцию (www.avtprom.ru).

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или заполнив анкету на сайте www.avtprom.ru

В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.

системы ЧПУ реализуют такие режимы синхронизации, как: синхронизация с одной ведущей осью, синхронизация с несколькими ведущими осями и каскадная синхронизация осей.

Для реализации задачи синхронизации в архитектуре ядра системы ЧПУ предложено использование блока синхронизации движения в интерполяторе. Для выполнения зубонарезания пользователю предоставлены G -функции с набором параметров, рассчитываемых по "каноническим" формулам. Для реализации различных типов синхронизации осей предоставлен набор M – команд для включения и выключения режима.

Проверка и контроль процесса синхронизации осей в системе "АксиОМА Контроль" осуществляется с помощью встроенного инструментария – осциллографа, который позволяет контролировать соотношение между скоростью фрезы, скоростью заготовки и величиной подачи.

Список литературы

1. Григорьев С.Н., Мартинов Г.М. Перспективы развития распределенных гетерогенных систем ЧПУ децентрализованными производствами // Автоматизация в промышленности. 2010. №5.
2. Артамонов Е.И., Ничипорович Т.А. Структурная организация виртуальных производственных корпораций // Автоматизация в промышленности. 2010. №5.
3. Фрэнк Бартош Синхронизация систем управления движением // Control Engineering. 2008. №2.
4. Мартинов Г.М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. №1.
5. Мартинов Г.М., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л. Принцип построения распределенной системы ЧПУ с открытой модульной архитектурой // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. №4(12).
6. Мартинова Л.И., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л. Реализация открытости управления электроавтоматикой станков в системе ЧПУ класса PCNC // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. №2.
7. Мартинов Г.М., Обухов А.И., Пушков Р.Л. Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №6.
8. Мартинов Г.М., Пушков Р.Л. Построение инструментария отладки управляющих программ систем ЧПУ на языках высокого уровня // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. №11.
9. Мартинов Г.М., Трофимов Е.С. Модульная компоновка и построение прикладных приложений диагностики систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. №7.
10. Станочное оборудование автоматизированного производства: Учебник для машиностроительных специальностей ВУЗов / Под редакцией В.В. Бушуева. Т. 2. М.: Изд. "Станкин". 1994.

Мартинова Лилия Ивановна – канд. техн. наук, доцент кафедры "Технология машиностроения",

Пушков Роман Львович – старший преподаватель,

Козак Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Компьютерные системы управления",

Трофимов Евгений Сергеевич – младший научный сотрудник ГИЦ МГТУ "Станкин".

Контактный телефон (499) 972-94-40.