

Основы построения однокомпьютерной системы ЧПУ с программно реализованным ядром и открытой модульной архитектурой

Basics of building single-computer CNC system with software-realized kernel and open modular architecture

Работа выполнена в рамках межкафедрального проекта «Создание нового поколения однокомпьютерных систем ЧПУ с программно реализованным ядром и открытой модульной архитектурой». Изложены основные положения построения нового поколения однокомпьютерных систем ЧПУ класса PCNC с программно реализованным ядром и открытой модульной архитектурой. Раскрыты ключевые аспекты специфики реализации.

This work done within the bounds of interdepartmental project “Developing the new generation of single-computer CNC system with software-realized kernel and open modular architecture”. This article describes basic cases of building the new generation of single-computer CNC system with software-realized kernel and open modular architecture. Key cases of the developing specific are observed.

Ключевые слова: система ЧПУ, ядро РВ, координатный стол, открытая модульная архитектура, коммуникационная среда, динамическая система, погрешность на контуре.

Keywords: CNC system, real-time kernel, positioning table, open modular architecture, communication environment, dynamic system, contour inaccuracy.

Основные идеи проиллюстрированы на интеллект-карте проекта (рис. 1). **Программная реализация ядра** позволяет расширять возможности системы управления и вносить в нее изменения без изменения аппаратных решений.



Рис. 1. Интеллект-карта

Такое решение позволяет сохранить инвестиции, вложенные в разработку системы при изменении аппаратной платформы. В качестве операционной системы в силу своей распространенности используется MS Windows с расширением реального времени RTX [1].

Самые продвинутые зарубежные системы ЧПУ имеют двухкомпьютерную архитектуру, но эти системы были спроектированы более десяти лет назад. За это время вычислительные возможности процессоров выросли в несколько раз, появились многоядерные процессоры. Все это позволяет **однокомпьютерной системе** справиться со всеми задачами уровня двухкомпьютерной системы. В частности, применение расширения реального времени RTX 8.1 позволило закрепить терминальную задачу и задачу реального времени за отдельными ядрами процессора в однокомпьютерной системе, что соответствует архитектурным решениям двухкомпьютерной системы ЧПУ.

Модульный подход при организации программного обеспечения системы управления позволяет компоновать системы ЧПУ под конкретные прикладные задачи. С другой стороны, этот подход позволяет иметь недорогой базовой вариант системы ЧПУ с минимальным набором возможностей и выпускать на коммерческой основе системы ЧПУ с расширенным набором функциональностей и прикладных приложений. Одним из дополнительных элементов компоновки системы ЧПУ являются прикладные приложения диагностики, которые используются для ввода станка в эксплуатацию и последующей его диагностики [2].

Открытость системы ЧПУ обеспечивается на уровне станкостроителей и конечных пользователей. Создание собственных интерпретаторов для языков программирования высокого уровня [3], разработка станочных циклов [4] и групповых технологий обеспечивается за счет открытости на уровне языка интерполятора.

Остальные элементы интеллект карты рассмотрим более подробно.

Обоснование выбора интерфейса цифрового привода

К промышленным сетям предъявляют требования относительно модульности, надежности, защиты от внешних помех, простоты в построении, монтаже и программировании логики работы. Сегодня говорить о некоей универсальной промышленной сети не приходится. Однако требования к ней уже сегодня проглядываются и понятны классы прикладных задач, которые надо решать с ее помощью, а именно:

- автоматизация на общезаводском уровне; здесь необходимо выполнение следующих требований: высокая скорость передачи, короткое время реакции на события, длина линий до 300 метров.
- автоматизация на уровне управления конкретными технологическими процессами; здесь предъявляются следующие требования: среднее время цикла опроса датчиков до 100 мс, длина линий связи до 1500 м с реализацией механизмов внутренней защиты (intrinsically safe).

Рассмотрим некоторые из промышленных сетей [5].

CANBUS

В начале 80-х годов возникла необходимость сбора и обработки результатов от множества датчиков, устанавливаемых в автомобилях, за короткие промежутки времени. Эту задачу можно было решить только при использовании сетевой структуры, объединяющей все компоненты и использующей для этой цели недорогую, последовательную сетевую структуру. Фирма BOSCH (Германия) разработала протокол "Control Area Network" (CAN), который был утвержден Международной организацией по стандартам в качестве стандарта ISO 11898. Протокол CAN описывает 1-ый и 2-ой уровень OSI-модели и удовлетворяет требованиям задач реального времени.

Реализованный механизм передачи данных позволяет обнаруживать и исправлять ошибки с хемминговым расстоянием 6 [6], то есть 2 ошибочных бита исправляются и 5 ошибочных битов обнаруживаются. Системы на основе CANbus достаточно легко конфигурируются и обладают средствами централизованной диагностики.

CANbus - это последовательная шина, реализующая механизм разрешения коллизий. В

CANbus каждый блок данных содержит дополнительный 11-битовый идентификатор, который является, по сути, приоритетом данного сообщения. Каждый узел-приемник в сети CANbus сам выбирает предназначенные для него сообщения. Возможные коллизии, связанные с одновременным запросом шины, разрешаются на основе приоритетности сообщений; право на работу с шиной получит тот узел, который передает сообщение с наивысшим приоритетом.

В каждом сообщении может быть передано от 0 до 8 бит данных. Большие блоки можно передавать за счет использования принципа сегментации. Общая схема работы сети представлена на рис. 2.

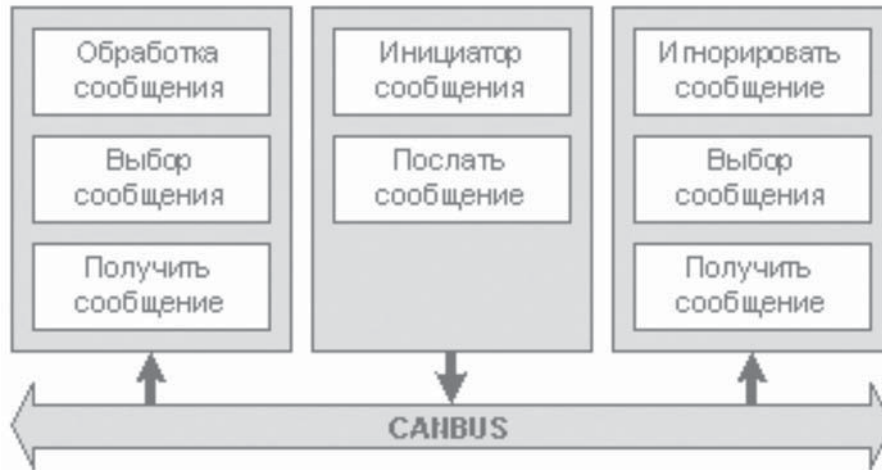


Рис. 2. Общая схема работы сети CANBUS

PROFIBUS

PROFIBUS (Process Field Bus) появился на свет благодаря усилиям группы немецких компаний: Bosch, Siemens и Klockner-Moller. В его задачи входит: организация связи с устройствами, гарантирующими быстрый ответ, создание простой и экономичной системы передачи данных, основанной на стандартах, реализация интерфейса между уровнями 2 и 7 OSI-модели.

Стандарт протокола описывает уровни 1, 2 и 7 OSI-модели (физический уровень, уровень передачи данных и прикладной уровень). В PROFIBUS используется гибридный метод доступа в структуре MASTER/SLAVE и децентрализованная процедура передачи маркера. Сеть может состоять из 122 узлов, из которых 32 могут быть MASTER-узлами. Адрес 0 зарезервирован для режима широкого вещания ("broadcast"). Общая схема PROFIBUS-сети представлена на рис. 3.

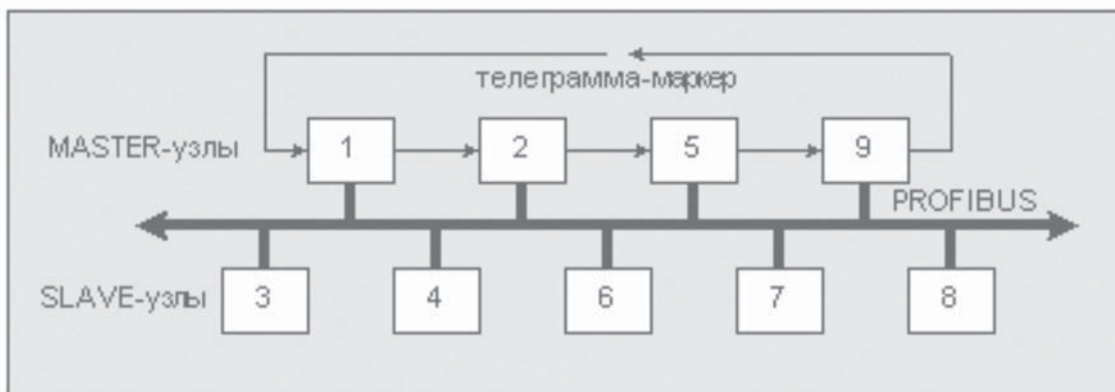


Рис. 3. Принцип работы сети PROFIBUS

В среде MASTER-узлов по возрастающим номерам узлов передается маркер, который предоставляет право ведения циклов чтения/записи на шине. Все циклы строго регламентированы по времени, организована продуманная система тайм-аутов. Протокол хорошо решает разнообразные коллизии на шине. Настройка всех основных временных параметров идет по сценарию пользователя.

Протоколом определены следующие ациклические команды: SDN (послать данные без подтверждения), SDA (послать данные с подтверждением), SRD (послать и запросить данные) и реализована циклическая команда CSRД (циклическая посылка и запрос данных).

При передаче данных обнаружение и исправление ошибок ведется на основе хеммингова расстояния 4, то есть в любой посылке данных 3 ошибочных бита будет обнаружено, а один бит может быть восстановлен.

Задачи в области промышленной связи часто требуют разных решений. В одном случае необходим обмен комплексными (сложными, длинными) сообщениями со средней скоростью. В другом - требуется быстрый обмен короткими сообщениями с использованием упрощенного протокола обмена, например, с датчиками или исполнительными механизмами. В третьем случае необходима работа в опасных участках производства, например, в газопереработке. Все эти задачи протоколу PROFIBUS под силу. Сегодня, говоря о PROFIBUS, необходимо иметь в виду, что под этим общим названием понимается совокупность трех различных, но совместимых протоколов: PROFIBUS-FMS, PROFIBUS-DP и PROFIBUS-PA.

- PROFIBUS-FMS - протокол общего назначения разработан для связи контроллеров и интеллектуальных устройств. Он описывает уровни 1, 2 и 7 OSI-модели. Основное его назначение - передача больших объемов данных.

- PROFIBUS-DP решает задачи управления в реальном времени, где на первое место встает такой параметр, как продолжительность цикла шины, а не программного цикла. Протокол обеспечивает увеличение производительности шины так, для передачи 512 бит данных, распределенных по 32 станциям, требуется всего 6 мс. DP-протокол представляет функциональное подмножество 2-го уровня протокола PROFIBUS-FMS. Уровень 7 OSI-модели в DP не описан.

- PROFIBUS-PA - протокол используется в устройствах, работающих в опасных производствах. В основе протокола PA (Process Automation) лежит протокол ISP (Interoperable Systems Project). Физический уровень (уровень 1 OSI-модели) реализует стандарт IEC1158-2 (с внутренней защитой данных). Уровень 2 - это функциональное подмножество стандарта DIN 19245.

Распределенная система управления может состоять из устройств, реализующих все три типа стандарта, только PA-устройства необходимо подключать через специальные повторители.

SERCOS-II и SERCOS-III

SERCOS – это интерфейс между приводами и контроллером движения, который производит все расчеты траектории, обеспечивает синхронизацию осей и устанавливает необходимые скорость и координату приводов, замыкающих контур системы.

Интерфейс SERCOS обеспечивает синхронизацию с точностью, не превышающей 1 микросекунды. Согласно проведенным измерениям, при использовании чипа SERCON816 задержка составляет всего 0,035 мкс, поэтому с помощью SERCOS осуществляет синхронное управление движением.

Система SERCOS представляет собой кольцевую оптоволоконную сеть, узлами которой являются программно-аппаратные модули. Такой модуль состоит из специального однокристалльного контроллера и трансиверной части, причем ведущий модуль может быть оформлен в виде платы, устанавливаемой в PC, или с помощью программной реализации в виде задачи реального времени. Помимо одного ведущего, все остальные модули являются ведомыми (рис. 4). Коммуникационная сессия осуществляется циклически с постоянной частотой, зависящей от числа ведомых модулей в сети, периодичность циклов настраивается на этапе инициализации системы. Так, управлять пятью следящими приводами можно с периодом 1 мс, а восемью приводами (максимальное число) с периодом 2 мс.

Ограничений на общее число одновременно работающих приводов практически не существует. Длина межзвонкового сегмента для пластиковых оптоволоконных кабелей может достигать 60 м, а для стеклянных 250 м.

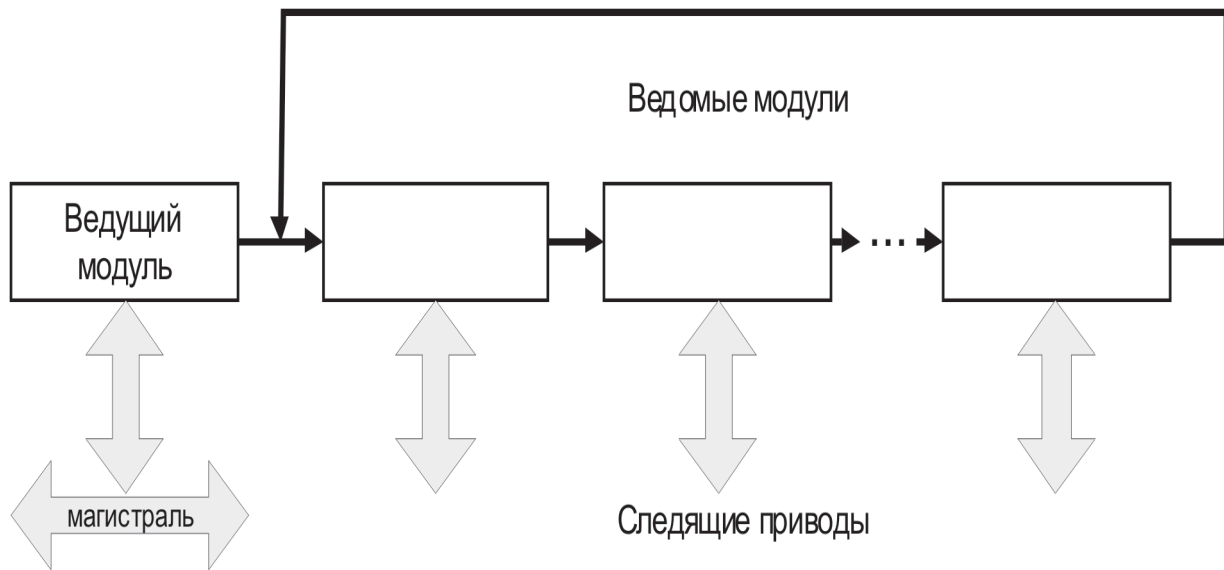


Рис. 4 Организация интерфейса SERCOS

В одном цикле для каждого привода могут быть заданы максимальная скорость подачи и максимальное перемещение, а также предельное значение крутящего момента; в каждом же цикле от каждого привода собирается информация об истинных значениях скорости подачи, перемещения и крутящего момента. На синхронно передаваемую информацию может быть "наложена" асинхронная (по запросу ведущего модуля), в качестве которой могут выступать различные сообщения, выводимые на экран дисплея.

Система SERCOS работает следующим образом. В первой фазе ведущий модуль посылает синхронизирующее сообщение, которое подготавливает ведомые модули к выдаче собственных сообщений. Во второй фазе кольцевая сеть последовательно размыкается в каждом из узлов, и сообщение соответствующего привода направляется ведущему модулю. С этой целью для каждого модуля выделен свой временной интервал, границы которого устанавливаются на этапе инициализации системы. В третьей фазе сообщение ведущего модуля поступает одновременно ко всем ведомым модулям.

Основным преимуществом стандарта SERCOS является то, что в SERCOS кольце электроприводы можно подключать совместно с гидравлическими и пневматическими приводами.

Последняя версия стандарта – SERCOS-III на базе 100 Мбит Ethernet соединения обладает повышенной производительностью и расширенными возможностями управления вводом-выводом. SERCOS-III выстроен на базе существующего механизма реального времени SERCOS-интерфейса, работающего циклически с постоянной частотой. При этом стандартная IP-телеграмма (соответственно протоколу TCP/IP) может быть передана в выделенном временном промежутке «нереального» времени параллельно с информацией реального времени, необходимой для управления следящими приводами. Контроллер SERCOS-III поддерживает обмен подобными телеграммами между любыми сетевыми устройствами. Кроме того, Ethernet позволяет обмениваться командами не только ведомому модулю с ведущим, но и между ведомыми модулями непосредственно [7].

Решение сложных задач управления в реальном времени с передачей большого количества данных целесообразно сделать на базе интерфейса SERCOS-II. Переход со стандарта SERCOS-II на SERCOS-III, который уже имеет промышленную реализацию, но все еще находится на активной стадии исправления ошибок, не предполагает больших изменений в программном коде системы управления.

Архитектурная модель системы ЧПУ с открытым ядром Motion Control

В настоящее время наиболее привлекательными являются открытые системы ЧПУ [8], подсистемы которых (включая интерфейс оператора, Motion Control и контроллер электроавтоматики SoftPLC) стали полностью программно-реализованными на единой компьютерной Windows-платформе. Преимущества программной реализации подсистемы формообразования объединились с достоинствами цифровых следящих приводов.

Представленное на рис. 5 ядро Motion Control имеет практически неограниченное расширение, поддерживаемое мощной инструментальной системой, которая позволяет добавлять новые функции, создавать новые приложения для Motion Control, а также строить интерфейс оператора. Инструментальная система имеет собственный текстовый мультизадачный, событийно-зависимый, объектно-ориентированный язык [9].

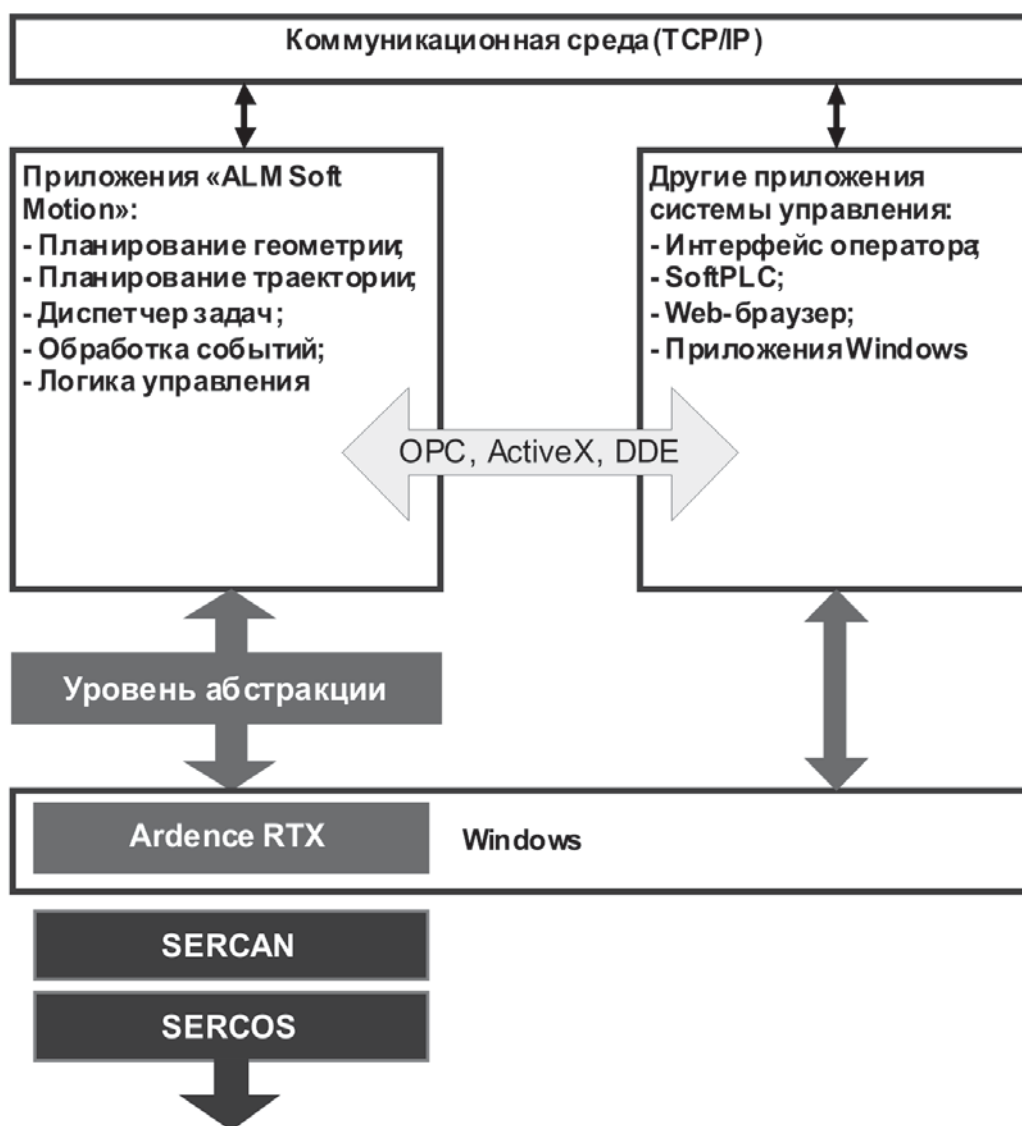


Рис. 5. Архитектура открытого ядра Motion Control

Формирование испытательного стенда

В процессе разработки системы ЧПУ ее отладку осуществляют сначала на эмуляторе «-объекта управления», а затем на рабочем станке. В качестве такого объекта управления запланировано использовать двухкоординатный стол. Модель экспериментального стенда на базе двухкоординатного крестового стола под управлением SERCOS приводов и системы ЧПУ WinPCNC [13] отечественной разработки представлена на рис. 6.

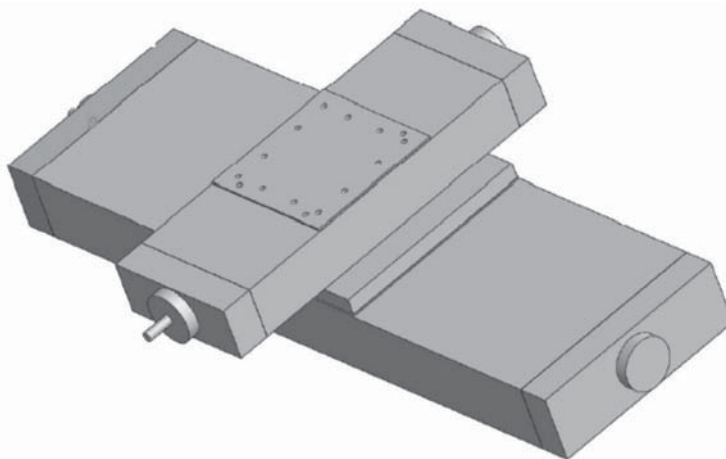


Рис. 6. Модель двухкоординатного стола

Стенд оснащен внешними измерительными устройствами (оптическими или индуктивными измерительными линейками) и предназначен для проведения испытаний динамики системы без учета процесса резания. Данная модель по своей динамике является наиболее приближенной к реальному станку.

Точность обработки на станках определяется, помимо геометрических и кинематических погрешностей, еще и статическими и динамическими усилиями, которые деформируют все расположенные в силовом потоке детали станка [10].

Хорошие динамические характеристики предполагают:

1. Высокое быстродействие привода, дающее возможность обработать задающее воздействие с минимальным запаздыванием.

2. Согласование параметров динамической системы (коэффициентов усиления K_{vx} и K_{vy} по скорости) по отдельным осям. Например, для получения минимальной ошибки при обработке фрезой круга быстродействие и передаточные свойства приводов (коэффициенты усиления) по осям x и y должны быть по возможности равными. В противном случае при одинаковой величине рассогласования действительного и заданного положения узла (X_w и Y_w) вместо круга образуется эллипс, так как

$$V_x = K_{vx} X_w \quad \text{и} \quad V_y = K_{vy} Y_w \quad ,$$

где V_x и V_y – скорости перемещения по соответствующим осям.

3. Малый момент инерции механических элементов привода, приведенный к двигателю.

4. Обеспечение подхода узла к заданной точке без колебаний. Это обеспечивается:

а. Изменением скорости узла от исходного значения по определенному закону (с помощью системы управления) при его подходе к заданной точке;

б. Применением направляющих и тяговых узлов с совершенным трением (мало зависящим от скорости);

в. Согласованием собственной частоты механической f_{0M} и электрической $f_{0Э}$ частей привода ($f_{0M}/f_{0Э} \approx 2$)

Особого подхода требует расчет ошибок контурных систем ЧПУ, когда форма детали образуется за счет движения режущей кромки инструмента по двум координатам одновременно [11]. Схема двухкоординатного привода подачи фрезерного станка показана на Рис. 7а.

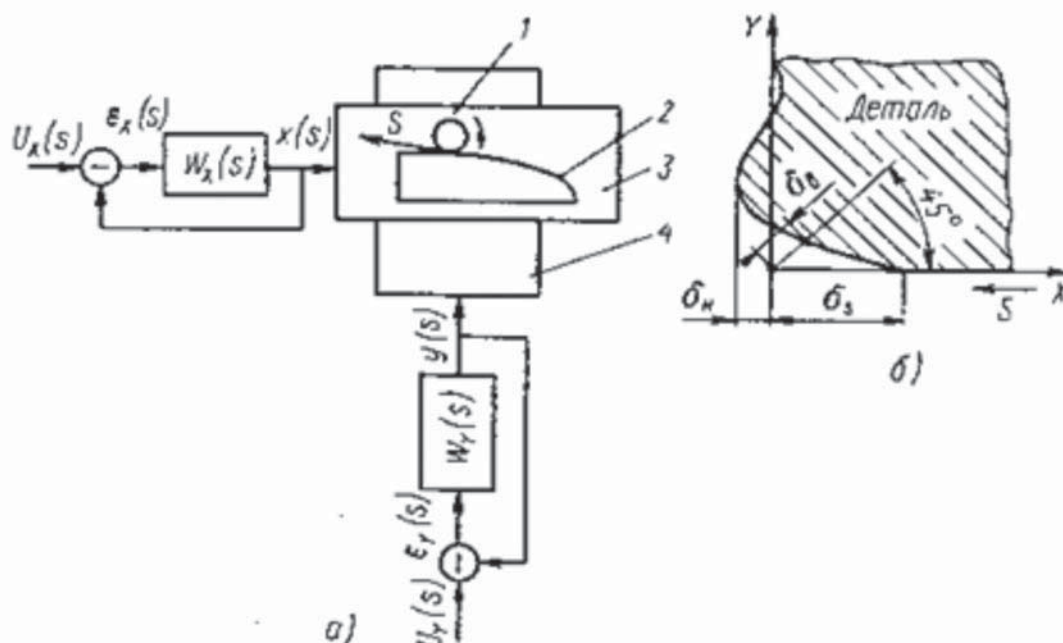


Рис. 7. Схема двухкоординатного привода подачи фрезерного станка (а) и формирование погрешностей при обработке прямого угла (б): 1 - фреза; 2 - деталь; 3 - стол; 4 - салазки; S - подача по контуру

Стол перемещают по координатам X и Y следящие приводы подачи, имеющие соответственно передаточные функции $W_{x(s)}$ и $W_{y(s)}$ первого порядка астатизма. Рассмотрим в качестве примера процедуру определение ошибки при обработке прямого угла (рис. 7б) для идентичных параметров приводов по координатам ($W_{x(s)} = W_{y(s)}$). В этом случае стол по одной координате замедляет движение и останавливается, а по другой, наоборот, начинает движение со скоростью (подачей) S, поэтому перемещения по координатам имеют вид

$$x(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\delta_s}{s} - \frac{S}{s^2} \Phi_\varepsilon(s) \right\};$$

$$y(t) = L^{-1} \left\{ \frac{S}{s^2} \Phi(s) \right\},$$

где $\delta_s = \varepsilon_{21} = S / K_1$ - установившаяся ошибка по скорости; $\Phi(s)$ – передаточная функция замкнутого контура по координате.

Перемещение $y(t)$ можно выразить следующим образом:

$$y(t) = St - \delta_s + x(t)$$

При обработке прямого угла возникает наружная и внутренняя ошибки. Внутренняя ошибка определяется по точке пересечения прямой под углом 45° с полученным контуром детали; тогда

$$\delta_H = \varepsilon_{2m}; \delta_B = \sqrt{2} \varepsilon_2(t_0)$$

$$\text{при } t_0 = \frac{1}{K_1}$$

Погрешность при обработке контуров, образованных плавными кривыми (Рис. 8):

$$\delta_H = \max_t \min_t |\rho_3(t_3) - \rho(t)|,$$

где t_3 – параметр заданного контура; t – параметр полученного контура; $\rho_3(t_3)$ – радиус-вектор заданного контура; $\rho(t)$ – радиус-вектор полученного контура.

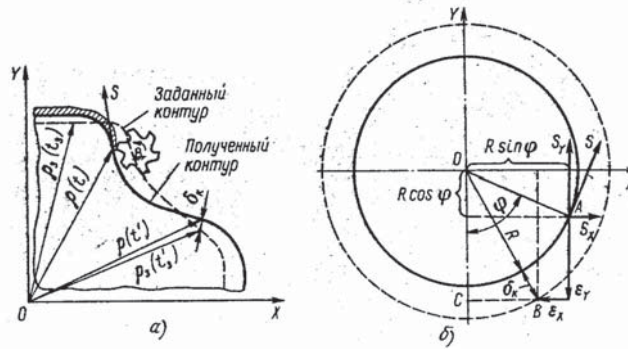


Рис. 8. Определение погрешности на произвольном контуре (а) и на окружности (б)

При обработке контура, ограниченного отрезком прямой под углом α к оси X (параметры приводов по координатам идентичны),

$$\begin{aligned} \rho_3(t_3) &= -St_3 \cos \alpha + x_0 + i(St_3 \sin \alpha + y_0); \\ \rho(t) &= -St \cos \alpha + \frac{S \cos \alpha}{K_1} + x_0 + i \left(St \sin \alpha - \frac{S \sin \alpha}{K_1} + y_0 \right); \\ \delta_H &= \max_{t_3} \min_t \left| (t - t_3) \cos \alpha - \frac{\cos \alpha}{K_1} + i \left[(t_3 - t) \sin \alpha + \frac{\sin \alpha}{K_1} \right] \right| = \\ &= \max_{t_3} \min_t S \sqrt{(t - t_3)^2 + 2(t_3 - t) \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1^2}} = \\ &= \max_{t_3} \min_t S \left| t - t_3 - \frac{1}{K_1} \right|. \end{aligned}$$

При $t = t_3$ получаем $\delta_H = 0$.

Для системы ЧПУ с идентичными приводами подач по координатам погрешность на контуре, ограниченном отрезком прямой, равна нулю.

Погрешность на контуре, ограниченном дугой окружности радиуса R:

$$\begin{aligned} \rho_3(t_3) &= R \cdot e^{i\varphi_3}; \\ \rho(t) &= RM(\omega)e^{i(\varphi_3 - \varphi)}, \end{aligned}$$

где $\varphi_3 = \omega t_3$ – фаза сигнала управления по координатам; $\omega = \omega t$ – сдвиг по фазе, вносимый приводом; $M(\omega) = |\Phi(i\omega)|$, здесь $\Phi(i\omega)$ – частотная передаточная функция привода по координате. Таким образом:

$$\begin{aligned} \delta_H &= \max_{\varphi_3} \min_{\varphi} |\rho_3(\varphi_3) - \rho(\varphi)| = \\ &= \max_{\varphi_3} \min_{\varphi} \left| R \cdot e^{i\varphi_3} - RM(\omega)e^{i(\varphi_3 - \varphi)} \right| = \\ &= \max_{\varphi_3} \min_{\varphi} \left| R \cdot e^{i\varphi_3} \right| \left| 1 - M(\omega)e^{-i\varphi} \right| = \min_{\varphi} \left[R \sqrt{1 - 2M(\omega) \cos \varphi + M^2(\omega)} \right] = R[1 - M(\omega)]. \end{aligned}$$

Итак, контурная погрешность при обработке окружности

$$\delta_H = R[1 - M(\omega)] \omega = S / R$$

Методы инженерного анализа динамических систем на базе теории автоматического

управления в основном эффективны лишь при исследовании линейных систем. Кроме того, анализ качества даже линейных систем высокого порядка очень трудоемок и практически невозможен без применения персонального компьютера.

Экспериментально проверка динамических характеристик станка регламентирована стандартом ISO 230-4 теста окружности [12].

При проведении теста производятся замеры заданного и фактического положения при интерполяции окружностей соответственно по часовой и против часовой стрелки (рис. 9).

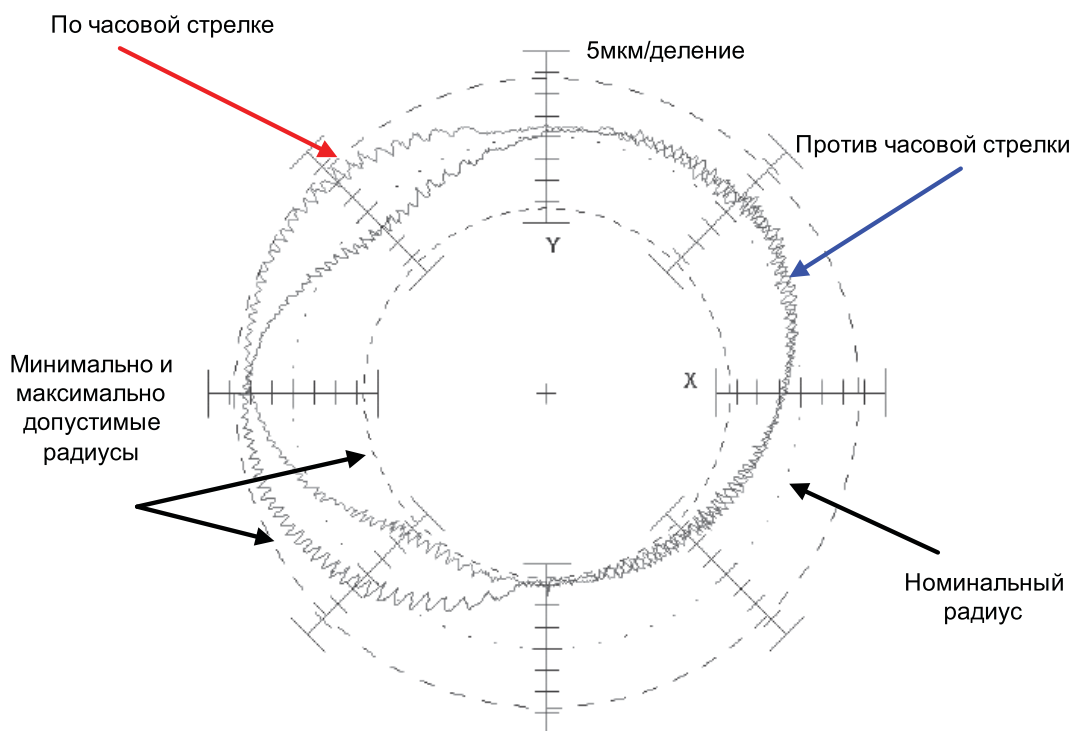


Рис. 9. Тест окружности

По результатам измерений прибегают к дополнительным настройкам приводов или алгоритмов управления в системе ЧПУ.

Кроме того, стенд позволяет контролировать такие параметров системы, как радиальное и круговое отклонение, накопленную ошибку и прочие характеристики.

Заключение

Изложенные выше идеи по архитектурной организации и обеспечению открытости уже реализованы в системе в ЧПУ WinPCNC [13]. Идет разработка драйверов и осуществляется переход на стандарт SERCOS-II. Проект находится в активной стадии формирования модели испытательного стенда для последующих проведения динамических испытаний и оптимизации алгоритмов интерполяции.

Библиографический список

1. Мартинов Г.М., Сосонкин В.Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: проблема реального времени // Мехатроника, автоматизация, управление. 2000. №3. С. 37-40.
2. Мартинов Г.М., Трофимов Е.С. Модульная компоновка и построение прикладных приложений диагностики систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. №7. С. 44-50.

3. 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. С. 19-24.

4. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Разработка пользовательских токарных циклов в системе ЧПУ WinPCNC // Объединенный научный журнал. 2007. №6. С. 48–50.

5. А.Н. Любашин, Первое знакомство: краткий обзор промышленных сетей по материалам конференции FieldComms 95 // Мир Компьютерной Автоматизации, №1, 1996.

6. Richard W. Hamming. Error Detecting and Error Correcting Codes, Bell System Technical Journal 26(2):147-160, 1950.

7. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Архитектоника цифровых следящих приводов подач технологических машин // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №10. С. 24-30.

8. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления: Учеб. пособие. – М.: Логос, 2005. – 296с.

9. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Программирование систем числового программного управления: Учеб. Пособие. – М.: Логос; Университетская книга; 2008. – 344с. + 1 компакт диск.

10. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: справочник – М.: Машиностроение, 2006. – 448с.

11. Васильев Г.Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1987. – 280с.

12. HEIDENHEIN User's Manual ACCOM 6/2003.

13. Мартинов Г.М. Университетская система ЧПУ WinPCNC для обучения и производства // Стружка. 2008. №1. С. 29-30.

References

1. G M Martinov, V L Sosonkin. Mechatronic systems numerical control concept: real-time problems. // Mechatronika, avtomatizacija, upravljenie. 2000. №3. Pp 37-40.

2. G M Martinov, E S Trofimov. Modular compound and building of diagnostic applications of numerical controls // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika. 2008. №7. Pp. 44-50.

3. G M Martinov, R L Pushkov. Designing the debugging tools for CNC part programs in numerical control systems implemented by high-level language // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika. 2008. №11. Pp. 19-24.

4. G M Martinov, A S Grigoriev. Turning cycles development for WinPCNC numerical control // Ob'edinennyj nauchnyj zhurnal. 2007. №6. Pp. 48–50.

5. A N Ljubashin. First view: Abstract of manufacturing networks using FieldComms 95 conference articles // Mir Kompjuternoj Avtomatizacii, №1, 1996.

6. W Richard. Hamming. Error Detecting and Error Correcting Codes, Bell System Technical Journal 26(2):147-160, 1950.

7. V L Sosonkin, G M Martinov. Architectonics of digital tracking feed drives for technological machines // Mechatronika, avtomatizacija, upravljenie. 2005. №10. Pp. 24-30.

8. V L Sosonkin, G M Martinov. Computer-aided control systems: Tutorial. – М.: Logos, 2005. – 296p.

9. V L Sosonkin, G M Martinov. Programming of computer-aided control systems: Tutorial – М.: Logos; Universitetskaja kniga; 2008. – 344p. + 1 CD-ROM.

10. V V Bushuev. Machines designing practice: handbook – М.: Mashinostroenie, 2006. – 448p.

11. G N Vasiliev. Automatisation of machine-tools designing . – М.: Machinostroenie, 1987. – 280p.

12. HEIDENHEIN User's Manual ACCOM 6/2003.

13. G M Martinov. University CNC system WinPCNC for teaching and manufacturing // Struzhka. 2008. №1. Pp. 29-30.

Мартинов Георги Мартинов, заведующей кафедрой «Компьютерные системы управления» ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», доктор технических наук, профессор.

E-mail: book@ncsystems.ru

Пушков Роман Львович, преподаватель кафедры «Компьютерные системы управления» ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН».

E-mail: pushkov@ncsystems.ru

Евстафиева Светлана Владимировна, преподаватель кафедры «Станки» ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН».

E-mail: svetlana.evstafieva@gmail.com

Martinov Georgi, chief of department «Computer-Architecture Control Systems» MSTU «STANKIN», Doctor of Technical Science, professor.

E-mail: book@ncsystems.ru

Pushkov Roman, teacher of department «Computer-Architecture Control Systems» MSTU «STANKIN».

E-mail: pushkov@ncsystems.ru

Evstafieva Svetlana, teacher of department «Machine Tools» MSTU «STANKIN».

E-mail: svetlana.evstafieva@gmail.com

УДК 621.311

В.В. Филатов, Д.А. Чумаев
V V Filatov, D A Chumaev

Анализ управляемости трёхфазного асинхронного электродвигателя

Analysis of controllability of asynchronous motor

Рассмотрены вопросы анализа управляемости электромеханического преобразователя. Приведена процедура построения области регулирования выходных параметров трёхфазного асинхронного двигателя. Разработан математический алгоритм определения вектора управляющих воздействий для заданных значений выходных переменных электродвигателя.

The analysis of controllability of transformation of the electric energy into mechanic motion is viewed. The adjustment area of output parameters of three-phase asynchronous motor defining procedure is described. Mathematical algorithm is developed to obtain the steering impact vector for given values of output asynchronous motor variables.

Ключевые слова: электродвигатель асинхронный, алгоритм математический, управляемость, моделирование.

Key words: an asynchronous motor, the mathematical algorithm, the adjustment area.

В течение последних трех десятилетий системы автоматического проектирования (САПР) стали неотъемлемой частью проектирования, как на схемотехническом, так и на системном уровне. Повышенный спрос на САПР обусловлен необходимостью сокращения циклов проектирования электромеханического оборудования, а также его возрастающей сложностью. Появление технологий цифровой связи, накладывающих специфические требования на схемные и системные решения, в еще большей степени обострило актуальность сквозного моделирования, как отдельных фрагментов схем, так и системы в целом. При сквозном моделировании электромеханических систем одной из основных трудностей заключается в