

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. каф. ЭПЭО ТПУ  
доц., канд. техн. наук  
\_\_\_\_\_ Ю.Н. Дементьев  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006 г.

**ИЗУЧЕНИЕ ЦИФРОВЫХ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НА БАЗЕ PCNC**

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу  
“Комплексная автоматизация технологических процессов” для студентов спе-  
циальности 140604 “Электропривод и автоматика промышленных установок  
и технологических комплексов”

Томск 2006

УДК 621

Изучение цифровых электромеханических систем на базе PCNC. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу “Комплексная автоматизация технологических процессов” для студентов специальности 140604 “Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов” – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 25 с.

Составитель: аспирант Гусев Н.В., инженер Коваленко М.В.

Рецензент: д.т.н., профессор Букреев В.Г.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры электропривода «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г.

Зав. каф. ЭПЭО доц., к.т.н. \_\_\_\_\_ Ю.Н. Дементьев

Цель работы:

1. изучение принципов построения многокоординатных цифроаналоговых электроприводов построенных на базе PCNC;
2. изучение элементной базы цифровой системы управления двухкоординатного стола;
3. экспериментальное исследование работы алгоритмов линейной интерполяции.

## **1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О СОВРЕМЕННЫХ КОНЦЕПЦИЯХ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Разработчики современных систем числового программного управления выделяют 5 основных архитектурных вариантов, которые существуют на рынке. Первый вариант – это классические системы CNC (Computer Numerical Control). Такие системы выпускаются фирмами с богатой традицией производства высококачественной собственной микроэлектронной аппаратуры. Однако эти фирмы под влиянием пользователей технологического оборудования, желающих иметь гибкий интерфейс оператора, предлагают модификацию PCNC-1 с персональным компьютером в качестве терминала (второй вариант). Следующим шагом в развитии систем с ЧПУ стала реализация двухкомпьютерного варианта PCNC-2 (третий вариант). Несколько позднее появились системы PCNC-3, ядро которых реализовано на отдельной плате, устанавливаемой в корпусе промышленного персонального компьютера (четвертый вариант). С бурным развитием микропроцессорной техники и повышением производительности микропроцессоров все большее распространение получает однокompьютерный (пятый) вариант системы PCNC-4. Наиболее наглядно классификация архитектурных решений систем ЧПУ приведена в табл. 1.

### **Системы типа CNC и PCNC-1**

К этим типам относится семейство NUM (концерн Schneider, Германия) (рис. 1.1), построенное по принципу многопроцессорных CNC-систем: с ЧПУ-процессором, процессором программируемого контроллера автоматки и графическим процессором. Система NUM оснащается пассивным терминалом или промышленным компьютером с операционной системой Windows-98.

Таблица 1.1

Вычислительное устройство	Наименование архитектурных решений				
	CNC	PCNC-1	PCNC-2	PCNC-3	PCNC-4
Персональный компьютер		Интерфейс оператора	Интерфейс оператора	Интерфейс оператора	Интерфейс оператора. Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики
Встроенный одноплатный компьютер				Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики	
Интерфейс		Коммуникационный интерфейс	Коммуникационный интерфейс		
Второй компьютер			Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики		
Специальный процессорный модуль	Интерфейс оператора. Ядро ЧПУ. Внешний контроллер электроавтоматики	Ядро ЧПУ. Одноплатный контроллер электроавтоматики			
Интерфейс	Управление приводами и электроавтоматикой	Управление приводами и электроавтоматикой	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики
	Объекты управления	Объекты управления	Автономные объекты управления	Автономные объекты управления	Автономные объекты управления

Семейство представлено компактными и модульными версиями, которые различаются числом координат и возможностью формировать независимые каналы ЧПУ из координатных групп, а также использованием традиционных аналоговых или автономных цифровых следящих приводов, подключенных к оптоволоконной сети.

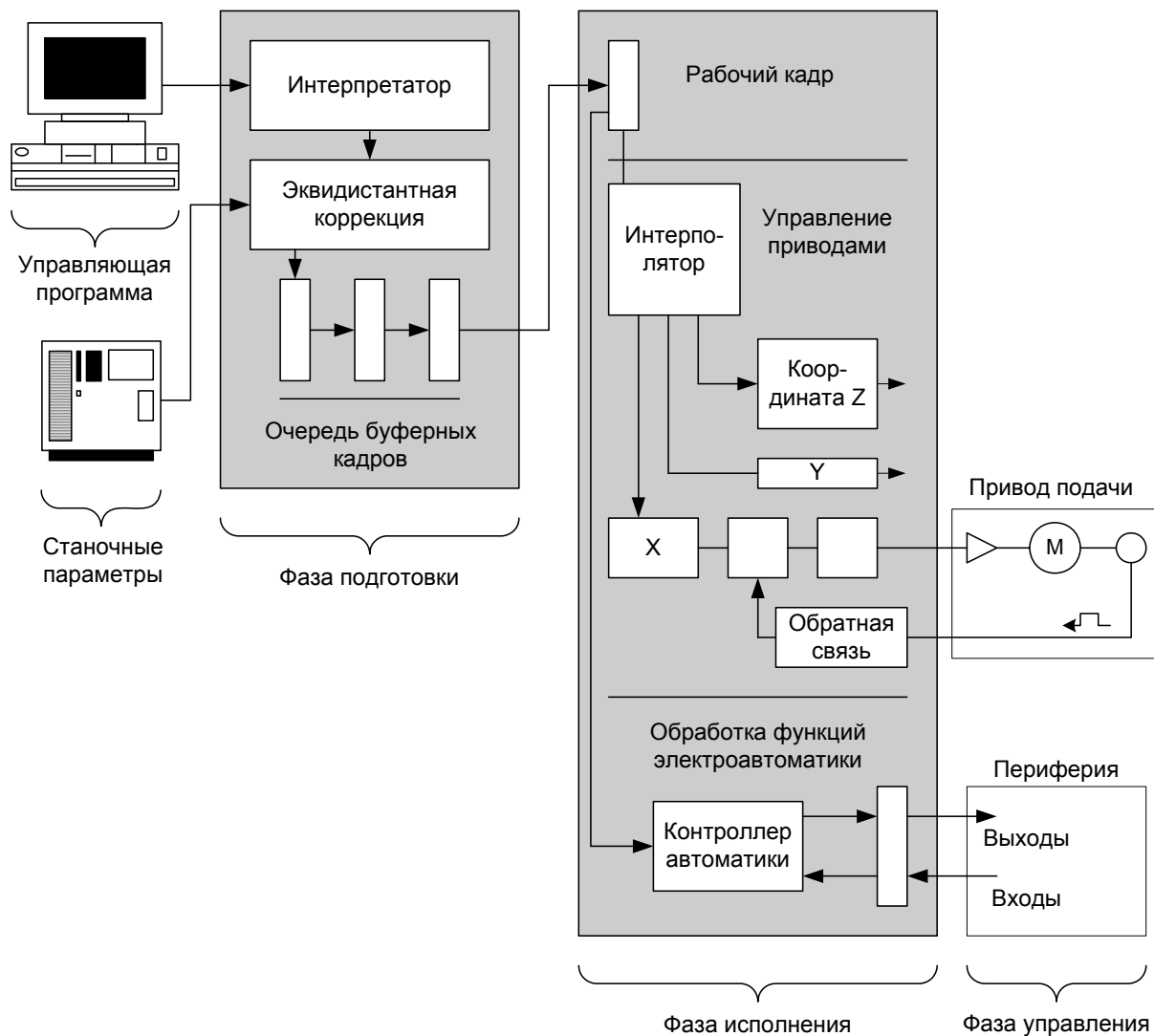


Рис. 1.1. Архитектура системы ЧПУ типа CNC фирмы NUM

В зависимости от требований устанавливается различное число входов-выходов электроавтоматики. Вычислительная мощность систем NUM достаточно высока, и этим объясняется широкий набор их функциональных возможностей. Так, предусмотрены сплайновый и полиномиальный (до пятого порядка) алгоритмы интерполяции, пяти-, девятикоординатная интерполяция, пятикоординатная коррекция инструмента, одновременная работа по двум различным управляющим программам, 3D-графика. В системах с терминальным компьютером возможна адаптация интерфейса оператора к запросам конечных пользователей, диалоговое программирование.

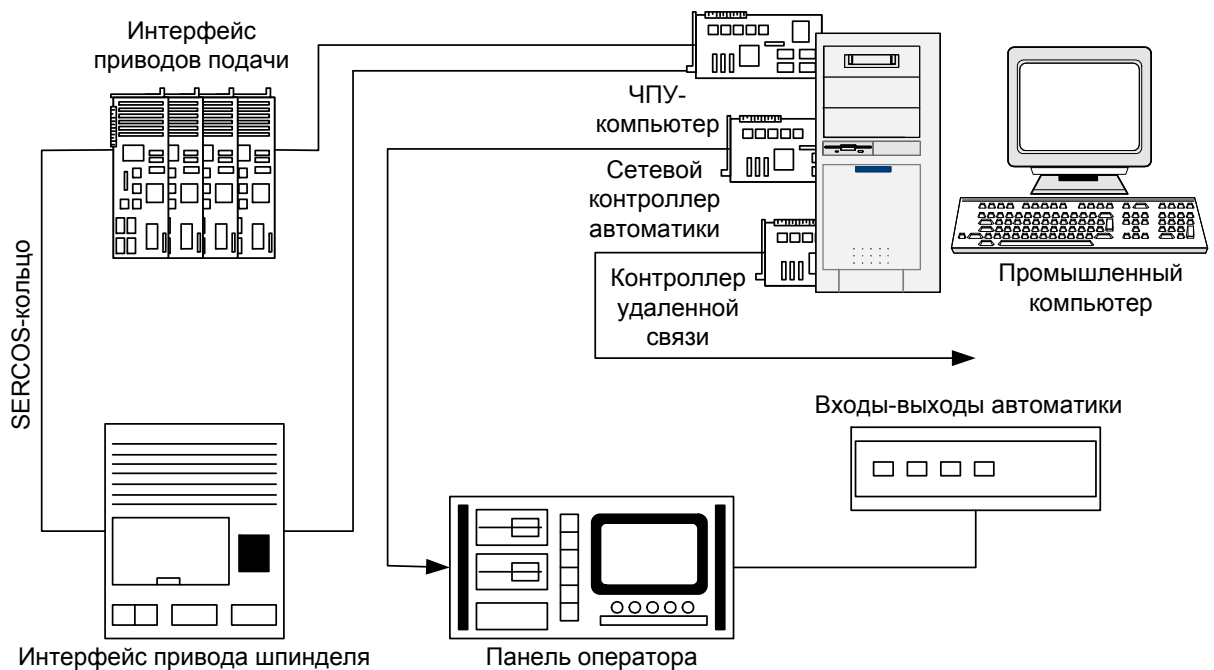


Рис. 1.2. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-1 фирмы Allen-Bradley

Фирма Allen Bradley выпускает широкое семейство систем ЧПУ: от традиционной CNC до системы CNC с персональным компьютером в качестве терминала и системы класса PCNC. Последняя модель (рис. 1.2) выполнена по классической схеме: специализированный промышленный компьютер с операционной системой Windows NT и возможностью разрабатывать пользовательские приложения на Visual Basic, PCI-одноплатный ЧПУ-компьютер, выполняющий все функции ядра, включая программно-реализованный контроллер электроавтоматики. С помощью общего для всей системы терминала осуществляется программирование и редактирование контроллера.

## 1.2. Системы типа PCNC-2

Представителями этого класса являются системы фирм ANDRON, BoschRexroth. Система ЧПУ фирмы ANDRON (Германия) представляет собой полный двухкомпьютерный вариант. Ее структура представляет набор модулей (рис. 1.3): терминального компьютера, ЧПУ-компьютера, панели оператора и монитора, удаленных входов-выходов программируемого контроллера, одной или нескольких групп цифровых (SERCOS) приводов подачи и главного привода.

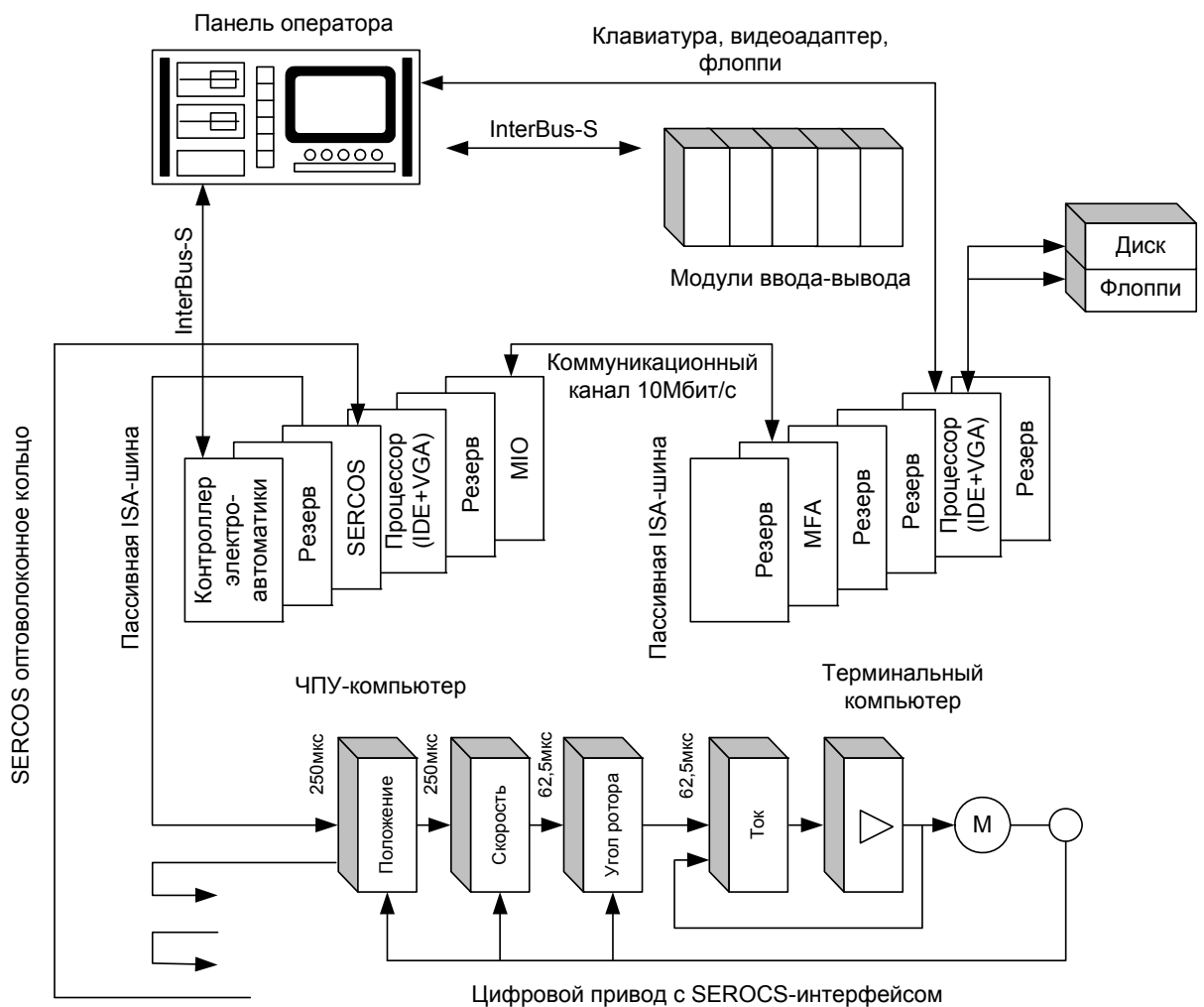


Рис. 1.3. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-2 фирмы FNDRON

Аппаратная часть системы практически полностью состоит из компонент других фирм-производителей.

В состав терминального компьютера входят: материнская плата с процессором Intel Celeron и интегрированными контроллерами SCSI, VGA, TFT, IDE; многофункциональная интерфейсная плата MFA с памятью CMOS-ROM; контроллер коммуникационного канала, связывающего терминальный и ЧПУ-компьютеры. Все платы установлены на пассивной ISA-шине. При этом предусмотрена возможность установки дополнительных резервных плат: внутреннего модема, сетевой платы, SCSI-платы. Для специальных задач возможна установка PC1-плат.

В составе ЧПУ-компьютера имеются: материнская плата с процессором Intel Celeron; плата MIO (Main Input-Output) поддержки как коммуникационного интерфейса с терминальным компьютером (со скоростью 10 Мбит/с), так и интерфейса ручного перемещения; плата программируемого контроллера с интерфейсом InterBus-S (с циклом 4 мс для 1024 входов-выходов); одна или несколько плат SERCOS-интерфейса (с микросхемой SERCON410-B). Все платы установлены на пассивной ISA-шине. Каждый SERCOS-интерфейс обслуживает (с периодичностью 0,5 мс) одну группу из трех автономных приводов подачи и одного привода шпинделя. Приводы одной группы включены в кольцевую оптоволоконную сеть.

В подобных платформах систем ЧПУ терминальный компьютер обычно работает под управлением операционной системы Windows NT а ЧПУ-компьютер оснащается операционной системой жесткого реального времени. На прикладном уровне терминальный компьютер открыт для разнообразных приложений и специальных диалогов конечного пользователя.

Система ЧПУ фирмы BoschRexroth (Германия) построена на основе двух высокопроизводительных компьютеров и обладает исключительно мощным набором функций. Терминальный компьютер оснащен операционной системой Windows NT, а ЧПУ-компьютер – операционной системой UNIX. Связь операционных сред осуществляется с помощью протоколов TCP/IP, что позволяет осуществить удаленное администрирование и работу нескольких терминалов с одним ЧПУ-компьютером. В свою очередь, ЧПУ-компьютер обеспечивает многоканальную работу более чем с одной управляющей программой. Прикладное программное обеспечение терминального компьютера и ядра ЧПУ в ЧПУ-компьютере окружены оболочкой из нескольких сот интерфейсных API-функций (Application Interface), которые предоставляют пользователям возможность разрабатывать собственные приложения и расширения. В оболочку терминального компьютера включена мощная DLL-библиотека NCS (Numerical Control System) классов объектов, делающая разработку дополнительных приложений более простой и комфортной. Помимо этого программно реализован контроллер электроавтоматики и цифровой осциллограф для анализа динамики следящего привода,

### **1.3. Системы типа PCNC-3**

Типичным представителем PCNC-3 является система фирмы DeltaTau (Великобритания). Архитектура такой системы предполагает наличие 2-х компьютеров. В отличие от предыдущего типа систем ЧПУ-компьютер выполнен в виде отдельной платы PMAC (Programmable Multi-Axes Controller), устанавливаемой на ISA или PCI шине терминального персонального компьютера (рис. 1.4). Терминальный компьютер с операционной системой Windows NT выполняет классические функции терминальной задачи и функции интерпретатора управляющих программ.



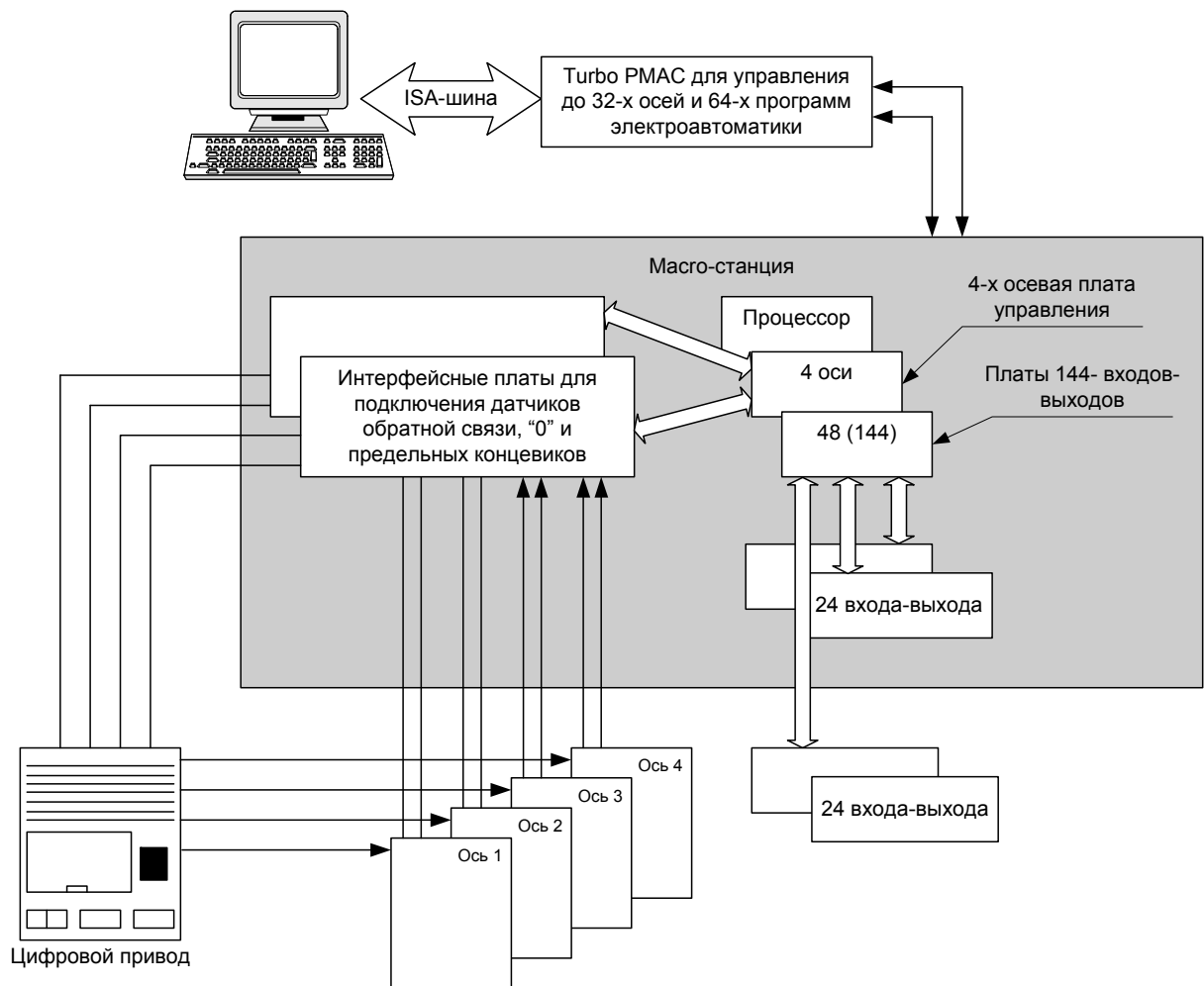


Рис. 1.4. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-3 фирмы DeltaTau

Одноплатный ЧПУ-компьютер PMAC построенный на процессоре Motorola 56300 решает геометрическую и логическую задачи, выполняя функции интерполятора, контроллера управления приводами, программно-реализованного контроллера электроавтоматики. Интерполятор обеспечивает все виды интерполяции (включая сплайн-интерполяцию), алгоритмы разгона и торможения, опережающий просмотр кадров Look Ahead, циклическое формирование управляющих воздействий с периодом 440 мкс (в этом же периоде в фоновом режиме работает и контроллер электроавтоматики). Контроллер приводов поддерживает управление 32 координатными осями, сгруппированными в 16 координатных систем. Помимо этого он принимает и обрабатывает сигналы обратной связи от датчиков положения, замыкает позиционные контуры, выполняет функции ПИД-регулятора, имитирует в цифровом виде сигналы обратной связи по скорости, вырабатывает (в цифровом виде) широтно-импульсный сигнал для приводов подачи и сигнал задания (в пределах  $\pm 10\text{В}$ ) для привода главного движения. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики поддерживает параллельное управление 64 циклами электроавтоматики.

Сигналы управления приводами и электроавтоматикой поступают в кольцевой оптоволоконный канал (со скоростью передачи данных 125 Мбит/с) для дистанционного управления своими объектами. Принимающим устройством служит интеллектуальный периферийный терминал Масго-

станция (Motion and Control Ring Optical). Допустимо включение в кольцо нескольких таких терминалов. Терминал замыкает скоростные контуры восьми приводов и принимает сигналы от конечных выключателей и датчиков нулевых точек координатных систем, формирует сигналы управления двигателями любого типа (асинхронными, постоянного тока и др.) с помощью блока Quad Amplifier (для управления четырьмя двигателями общей мощностью до 25 кВт). Периферийный терминал также поддерживает управление электроавтоматикой через модули оптоизолированных входов-выходов.

Концепция такого типа систем ориентированна на построение собственных систем ЧПУ. Конечному пользователю остается только разработка терминальной задачи и интерпретатора в среде промышленного персонального компьютера. Однако при этом следует отметить, что архитектура самих модулей закрыта и недоступна для внесения каких-либо изменений.

#### 1.4. Системы типа PCNC-4

Концепция системы ЧПУ фирмы Beckhoff (Германия) является ярким примером однокомпьютерной архитектуры PCNC. Отличительная особенность заключается в том, что все задачи управления (геометрическая, логическая, терминальная) решены программным путем, без какой-либо дополнительной аппаратной поддержки (рис. 1.5). Внешний интерфейс такой системы строится на базе любой стандартной периферийной шины, в частности, на базе шины LightBus фирмы Beckhoff. Эта шина представляет собой кольцевой канал для передачи сигналов управления автономными следящими приводами, а также и для передачи сигналов электроавтоматики. Доступ к объектам осуществляется с помощью периферийных "терминалов" ввода-вывода.

Операционная среда представляет собой комбинацию Windows NT для поддержания процессов машинного времени и системы TwinCat (Total Windows Control and Automation Technology). Операционная система Twin-Cat фирмы Beckhoff интегрированная в Windows NT, добавляет ей функции реального времени, не изменяя самой Windows NT. Обмен данными и доступ к прикладным функциям API программных модулей осуществляется через программную шину ADS (Automation Device Specification). Система TwinCat служит центром системной конфигурации, поддерживающим синхронное или асинхронное взаимодействие всех процессов, а также и ввод-вывод сигналов управления. На прикладном уровне в потоках управления работают программные модули ЧПУ и программируемые контроллеры, имеющие клиентскую часть (для подготовки данных) и серверную часть (для работы в реальном времени). ЧПУ-клиент интерпретирует кадры управляющей программы в стандарте DIN 66025, а ЧПУ-сервер выполняет интерполяцию в "группах приводов" (по три координаты в группе).

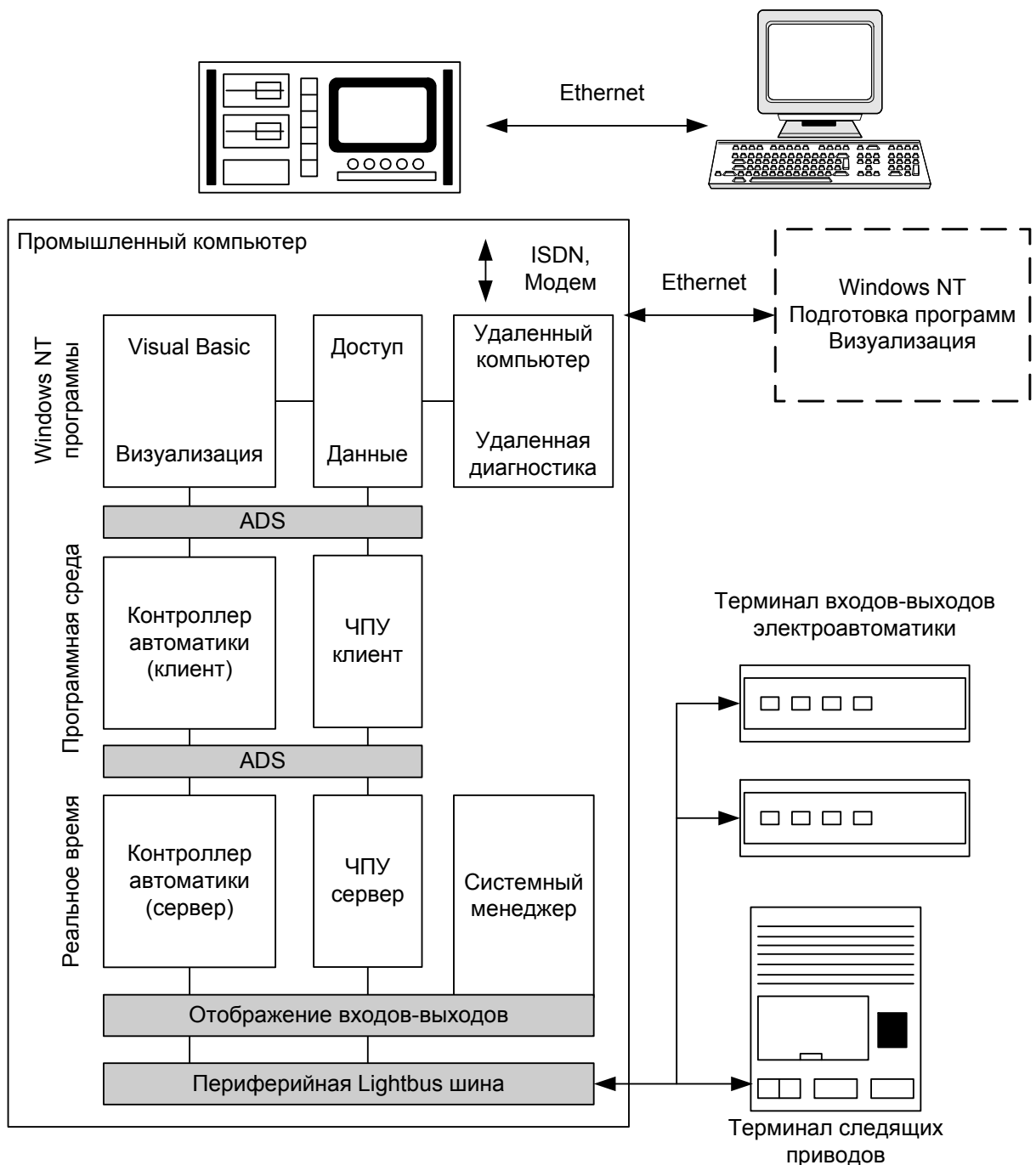


Рис. 1.5. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4

Группы в свою очередь формируются с помощью системы TwinCat. Одновременно работают до четырех контроллеров (являющихся виртуальными процессорами, работающими в стандарте IEC 1131-3), каждый из которых решает четыре задачи, имеющие свой приоритет и время цикла.

Рассмотрим еще один пример построения системы ЧПУ типа PCNC-4. Система Power Automation (Германия) построена на основе промышленного персонального компьютера с PCI-шиной (рис. 1.6), с операционной системой Windows NT и ядром реального времени. Операционная система Windows NT обеспечивает работу интерфейса оператора, системы программирования ЧПУ и контроллера электроавтоматики, встроенную САМ-систему, приложения пользователя. Ядро реального времени синхронизирует работу задач ЧПУ и электроавтоматики, выполняет диспетчерские функции в отношении

интерпретатора, интерполятора и модуля управления следящими приводами. Одновременно могут работать до восьми каналов ЧПУ и два программно-реализованных контроллера электроавтоматики с разными приоритетами.

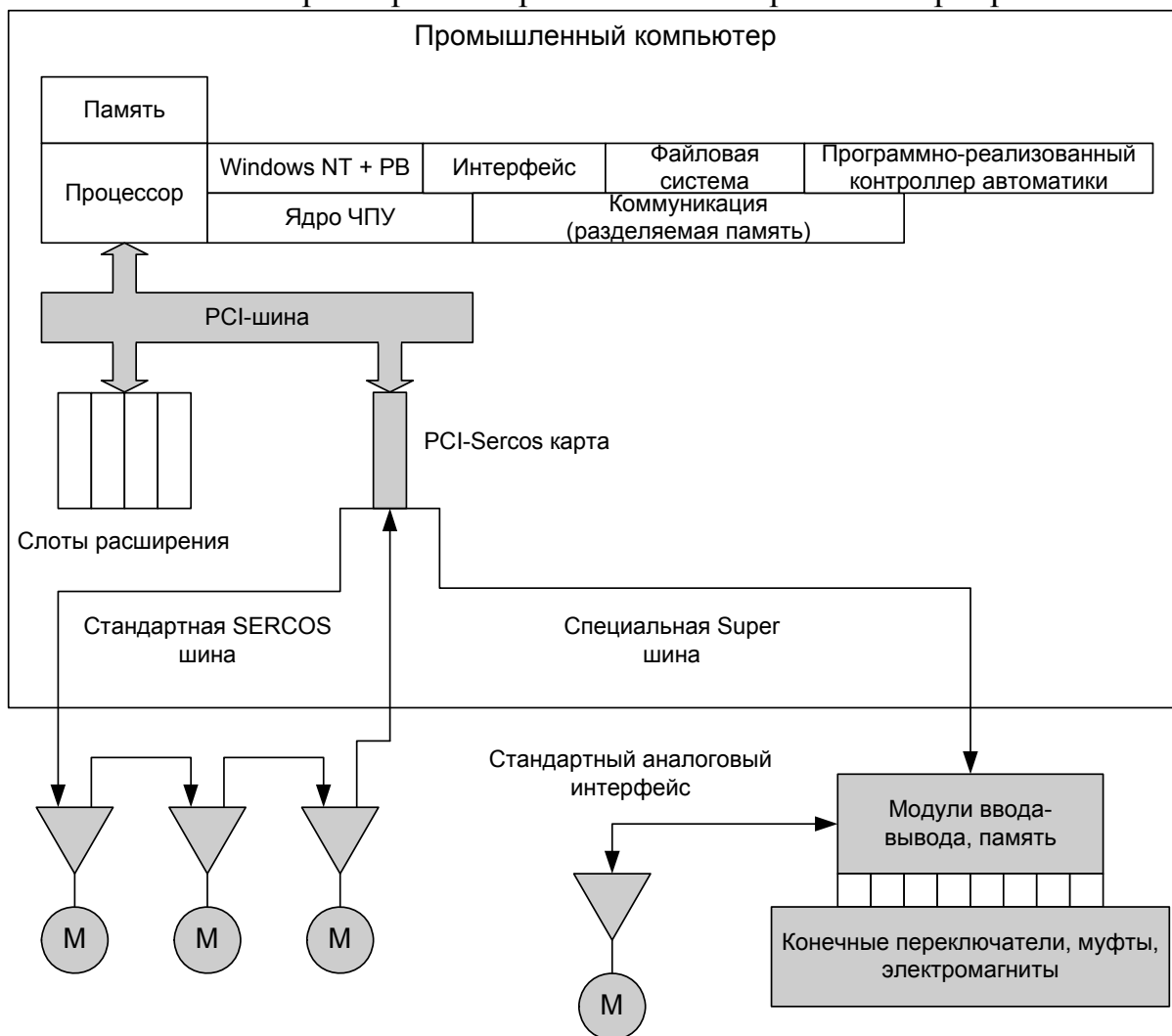


Рис. 1.6. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4 фирмы Power Automation Система Power Automation имеет открытую архитектуру, которая допускает расширение функций ядра ЧПУ. Система имеет мощное сетевое окружение как внешнее (Ethernet-TCP/IP, Novell), так и периферийное (восемь оптоволоконных SERCOS-колец для 64 следящих приводов, InterBus-S, Profibus DP, CAN-Bus, ASI-Bus).

### 1.5. Тенденции в развитии современных персональных систем с ЧПУ

Из рассмотренного выше обзора современных концепций можно сделать вывод, что очередная смена поколений радикально меняет потребительские свойства, структуру, архитектуру и программное обеспечение систем ЧПУ. Опыт, накопленный в области создания систем ЧПУ к настоящему времени, в значительной мере пересматривается под мощным давлением пользователей и станкостроителей. В борьбе за рынок производители систем ЧПУ уходят от простой эволюции традиционных решений к системам с от-

крытой архитектурой. Причины подобной ситуации заключаются в повышении доли специального технологического оборудования, ориентированного на определенную или групповую технологию, а также в росте популярности систем ЧПУ с интерфейсом управления как у обычного персонального компьютера.

Одним из наиболее значимых признаков системы ЧПУ нового поколения является открытая архитектура, которая предполагает следующие:

- конфигурирование системы у станкостроителя и конечного пользователя;
- интеграцию программных продуктов иных производителей;
- модернизацию системы в независимости от изменений базовой платформы;
- доступ к диагностической информации аппаратуры приводов и объекта;
- доступ системы в сетевую коммуникационную среду.

Под конфигурированием системы понимается выбор пользователем собственного диалога с системой, настройку системы на любую версию управляющих программ, добавление новых алгоритмов интерполяции, включение системы в локальную сеть.

Традиционная структура персональных системы ЧПУ обусловлена такими задачами как: геометрическая, логическая, технологическая, диспетчерская, терминальная. В общем виде структура системы ЧПУ представленная совокупностью базовых модулей (обведены сплошными линиями) и дополнительных модулей (обведены пунктирными линиями) приведена на рис. 1.7. К дополнительным модулям отнесены покупные программные средства. Каждый из модулей системы закреплен за определенной задачей управления и является вложенным объектом, то есть обладает алгоритмической структурой и структурой данных, а также интерфейсной оболочкой.

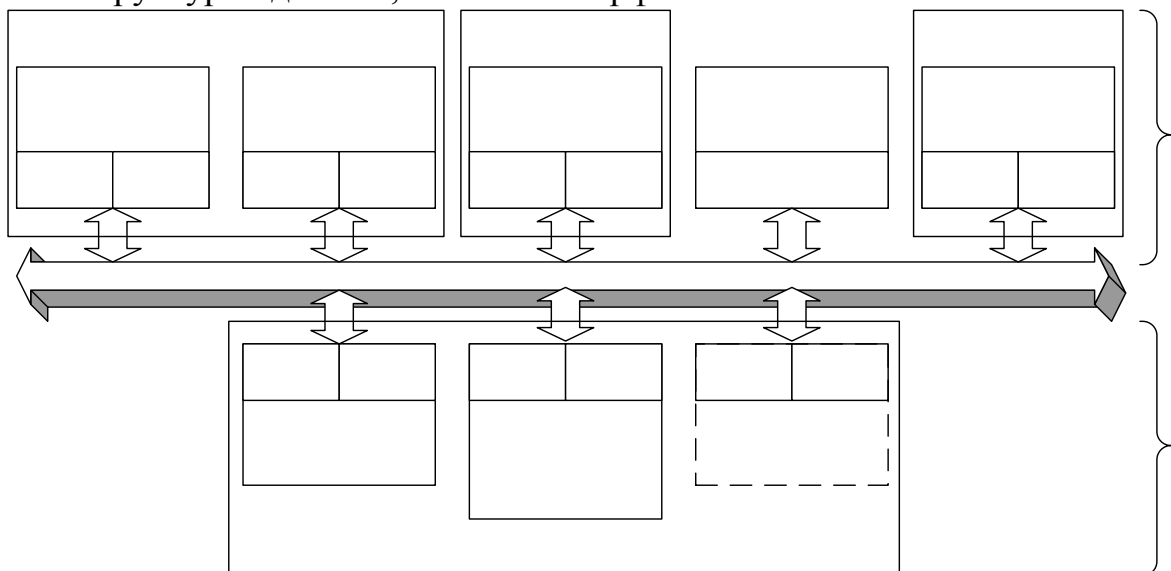


Рис. 1.7. Модульная архитектура системы ЧПУ типа PCNC

Приведенная структура разделяется на 2-е подсистемы – NC-подсистему и PC-подсистему. NC-подсистема являясь ведущей формирует среду функционирования в реальном времени ЧПУ-ориентированных модулей: интерпрета-

тора (ISO-процессора), интерполятора, встроенного программируемого контроллера, базы данных реального времени. PC-подсистема образует среду Windows-подобного интерфейса пользователя, включая инструментальную систему подготовки и тестирования управляющих программ, а также всевозможные пользовательские приложения.

Взаимодействие модулей осуществляется посредством объектно-ориентированной магистрали (ООС – Object Oriented Channel), которая не только поддерживает программно-аппаратные коммуникационные протоколы, но и выполняет прикладные серверные функции благодаря специальной объектной оболочке. Это значит, что объектно-ориентированная магистраль служит единым механизмом предоставления модулям информационных услуг. Такая возможность отражена и в самих интерфейсах модулей: они могут предоставлять данные либо запрашивать их.

В отличие от приведенной структуры на рис. 1.7 открытая архитектура позволяет строить более гибкие и сложные системы ЧПУ типа PCNC. Такие системы ориентируются на многокоординатную, многостаночную, высокоскоростную и высокоточную обработку. Современные системы с открытой архитектурой выполняются согласно двухкомпьютерной архитектуре приведенной на рис. 1.8.

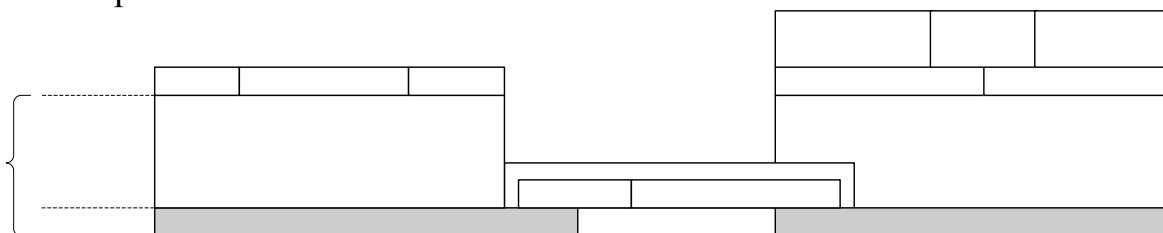


Рис. 1.8. Двухкомпьютерная модель системы PCNC

Из приведенной структуры видно, что PC-подсистема располагается на обычном персональном компьютере, а NC-подсистема на другом NC-компьютере. В роли второго NC-компьютера может выступать традиционный компьютер, оснащенный дополнительными специальными устройствами, или компьютер на базе RISC-процессора. Базовой операционной системой на первом компьютере выступает операционная система, построенная на основе Windows NT. Характерной особенностью данной архитектуры является наличие человеко-машинного интерфейса (Man Machine Interface) и инструмента разработки и верификации управляющих программ (NC\_PDT – NC Program Data Tool) расположенных на PC-подсистеме. Инструментальная среда NC\_PDT обеспечивает создание и редактирование файлов управляющих программ, осуществляет полный синтаксический контроль кадров управляющей программы, эмулирует отработку управляющей программы. На втором компьютере располагается UNIX-подобная операционная система. Она может обеспечить требуемое гарантированное минимальное время отклика. Обмен между двумя операционными системами поддерживается посредством коммуникационного протокола TCP/IP. Включение в эту среду прикладного уровня с функциями доступа к интерфейсам модулей создает виртуальную шину, оказывающую низкоуровневые услуги доступа. Объект-программы MMU PC-приложения NC\_PDT

форма

Операционная система

Windows NT

ная надстройка над этой шиной формирует сервер представляющий единую для обеих подсистем объектно-ориентированную магистраль.

Дальнейшее развитие этой архитектуры представляется в виде однокомпьютерной модели предполагающей наличие только одного РС-компьютера, оснащенного специальными устройствами в виде плат-контроллеров (рис. 1.9). В качестве этих плат могут быть использованы контроллер приводов подачи, программируемый контроллер PCL (Programmable Logic Controller), различные устройства управления технологическим процессом.

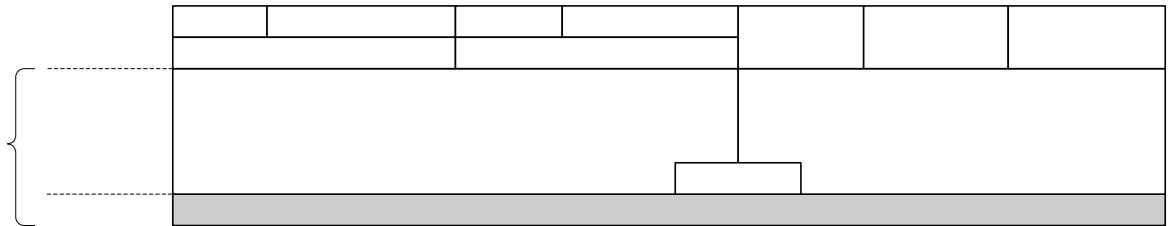


Рис. 1.9. Однокомпьютерная модель системы PCNC

Переход от двухкомпьютерной модели к однокомпьютерной осуществляется формальным переносом программного обеспечения РС-подсистемы в NC-подсистему на уровне задач. Приведенные архитектурные варианты, дают возможность четкого разграничения между системными, прикладными и коммуникационными компонентами, возможность независимого развития любого из этих компонент, как на основе оригинальных разработок, так и путем встраивания программных продуктов иных производителей.

В заключении следует отметить, что наибольшее распространение получают системы ЧПУ, построенные на основе концепции PCNC, нежели чем системы, построенные по концепции CNC. Это, прежде всего, обусловлено возросшим спросом на системы с PCNC и гибкостью адаптации оборудования к конкретным задачам. С ростом производительности современных микропроцессоров разработчики все большее предпочтение отдают однокомпьютерному варианту построения системы с открытой архитектурой. Это дает возможность пользователю программно реализовывать необходимые ему геометрические, логические и терминальные задачи, что в итоге позволяет разработать необходимую систему без значительных капиталовложений. В качестве операционной системы в настоящее время наиболее часто применяют операционные системы, построенные на базе Windows NT и UNIX. Однако Windows NT в связи с большей распространенностью находит большее применение.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Функциональная схема цифро-аналогового следящего электропривода (ЦАСЭП) состоит из двух основных частей (рис.2.1):

1. серийно выпускаемого промышленностью реверсивного регулируемого электропривода (РЭП) «КЕМЕК».

2. устройства числового программного управления (PCNC – Personal Computer Numerical Control), которое реализовано на базе персонального компьютера и двух модулей ввода-вывода дискретной и аналоговой информации UNIO 96-5, AI16-5A-1 фирмы Fastwel.

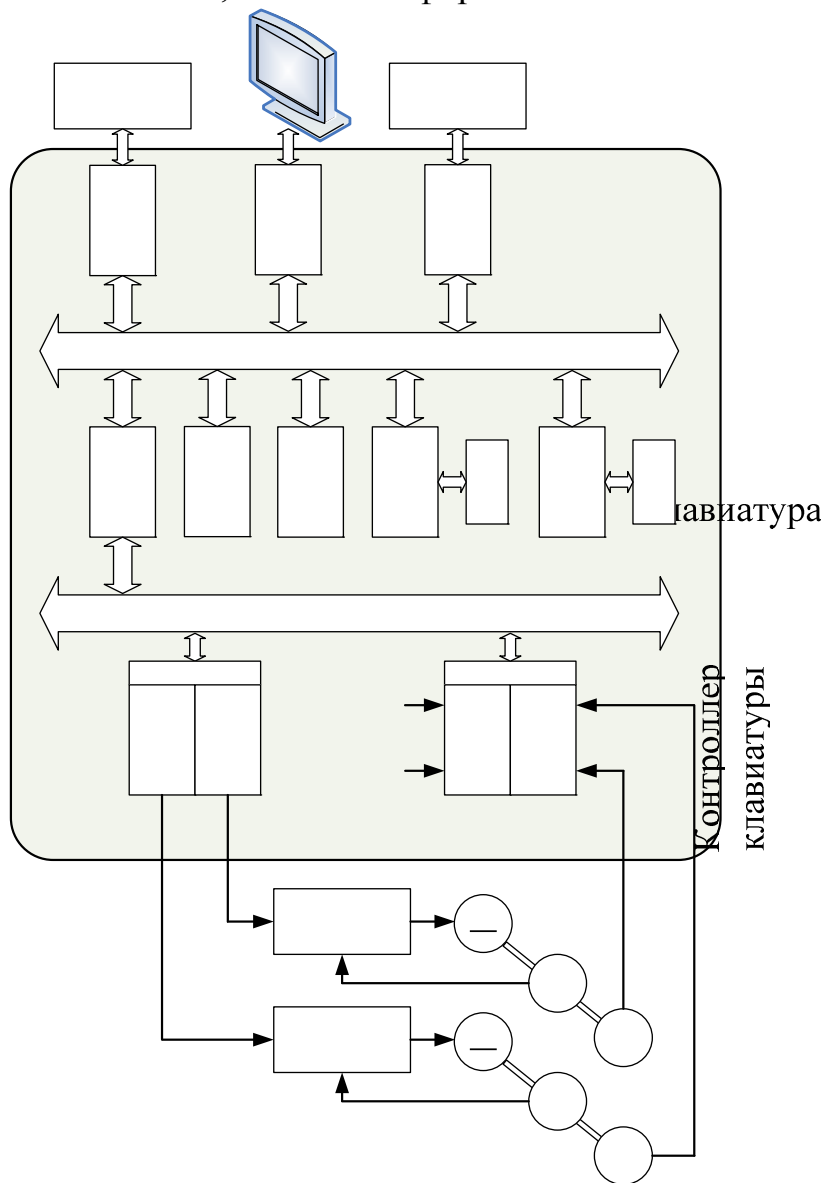


Рис. 2.1. Функциональная схема экспериментальной установки: ЦП – центральный процессор; HDD – жесткий диск; РЭП, РЭП2 – регулируемые электроприводы; M1, M2 – электродвигатели; BR1, BR2 – тахогенераторы; BQ1, BQ2 – датчики положения;  $U_{3C1}$ ,  $U_{3C2}$  – управляющие сигналы на РЭП;  $U_{TГ1}$ ,  $U_{TГ2}$  – сигналы обратной связи с тахогенераторов.

РЭП «КЕМЕК» предназначен для реверсивных быстродействующих широкорегулируемых приводов с однозонным регулированием скорости механизмов подачи станков, промышленных роботов и других механизмов. Данный РЭП выполнен по двухконтурной структуре (контур тока + контур скорости) подчиненного регулирования с реверсивным шестиимпульсным тиристорным преобразователем (ТП) с отдельным управлением группами вентилях типа 2РЕВ16. Диапазон регулирования скорости не менее 2000:1.

В комплект привода входят:



- шестипульсный реверсивный тиристорный преобразователь типа 2РЕВ16;
- высокомоментные двигатели серии 1ПИ с встроенными тахогенераторами;
- силовой трансформатор типа Т1ЕВ.

Следящая часть приводов механизмов станков и роботов управляется часто от устройств ЧПУ и реализуется, поэтому как аппаратными, так и программными способами. Аппаратным способом реализуются устройства питания, цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) и аналого-цифровые (АЦП) преобразователи. Программно в нашем случае реализуется регулятор положения (РП) и обработка информации с фотоимпульсных датчиков положения.

Реализованная таким образом система с числовым программным управлением относится к классу РСНС-4, поскольку интерфейс оператора, ядро ЧПУ, контроллер электроавтоматики реализованы программно на одном персональном компьютере.

Таблица 2.1

Параметры экспериментальной установки

Параметр	Значение
Разрядность ЦАП	$N = 12$
Коэффициент передачи ЦАП	$K_{DAC} = 409,6B/диск$
Коэффициент передачи датчика положения	$K_C = 0,2мкм / диск$
Коэффициент усиления регулятора положения	$K_{РП} = 0,029B/мкм$
Коэффициент передачи механизма	$79,57мкм/рад$
Шаг винта	$t_B = 6мм$
Передаточное число редуктора	$i_p = 12$

### Параметры преобразователя угловых перемещений ЛИР-128А

Преобразователь ЛИР-128А предназначен для преобразования углового перемещения в последовательность электрических сигналов, содержащих информацию о величине и направлении этих перемещений и пригодных для последующей обработки в устройствах числового программного управления или устройствах цифровой индикации.

Преобразователи могут применяться в измерительных системах и системах программного управления станков и механизмов при определении угловых размеров, перемещений на поворотных рабочих столах, делительных устройствах, антеннах и прочем оборудовании.

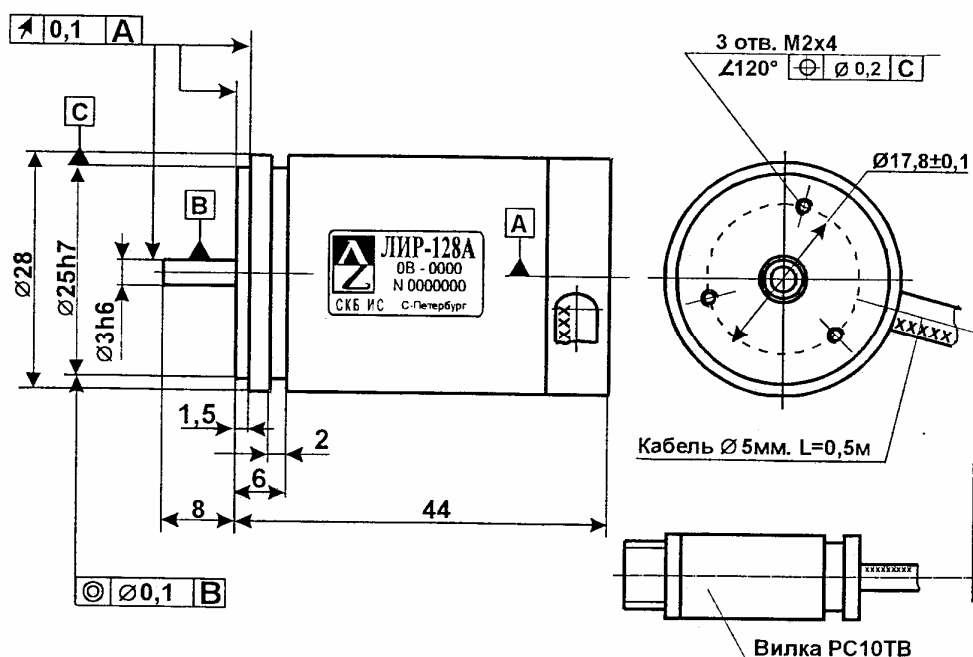


Рис. 2.2. Внешний вид преобразователя ЛИР-128А

Основные технические данные и характеристики преобразователя приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Число штрихов измерительного лимба	2500
Точность	300"
Максимальная скорость вращения вала	10000об/мин
Момент трогания ротора	Не более 0,001Нм
Момент инерции ротора	$6,8 \cdot 10^{-8}$ кг·м <sup>2</sup>
Допустимая нагрузка на вал	Не более 5Н
Масса	Не более 0,06кг
Степень защиты	IP64
Интервал рабочих температур	0...70°C
Ударные ускорения	$\leq 300$ м/сек <sup>2</sup>
Напряжение питания	5В±5%
Ток потребления	Не более 90мА
Число импульсов	2500
Дискретность отсчета	1296"
Максимальная частота выходного сигнала	160кГц
Число оборотов вала соответствующее максимальной выходной частоте	3800Об/мин
Форма импульсов	Прямоугольная

В основе работы преобразователя лежит принцип фотоэлектронного сканирования штриховых растров. В качестве осветителей используются инфракрасные светодиоды, а приемниками излучения служат кремниевые фотодиоды. Входное напряжение на датчик – постоянное (напряжение питания), а выходное зависит от положения в зависимости от направления вращения. Диаграммы, поясняющие работу, приведены ниже на рис. 2.3.

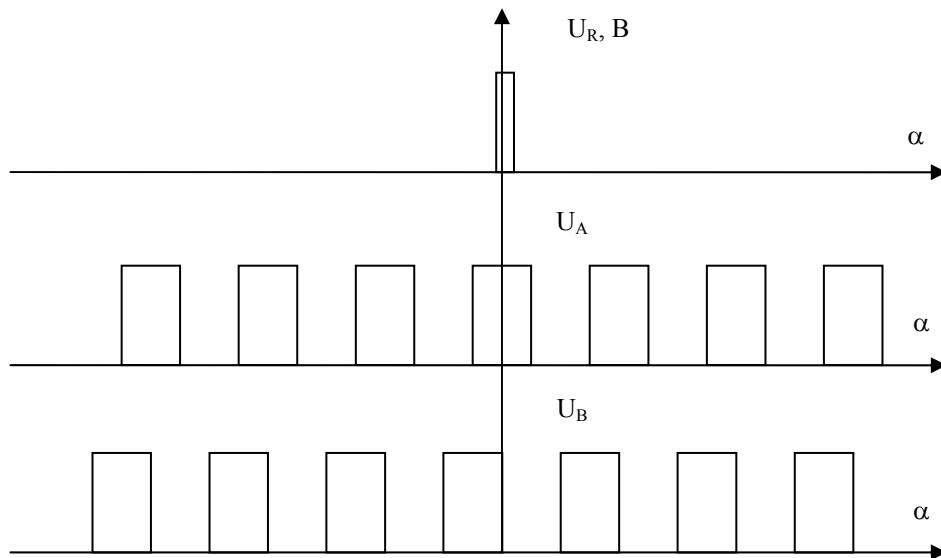


Рис. 2.3. Внешний вид преобразователя ЛИР-128А

Во время вращения датчика происходит чередование импульсов и в зависимости от того, какая последовательность опережает, определяется направление вращения. Также ведётся счёт импульсов, при известном количестве импульсов на один оборот датчика (его разрешающая способность), можно определить угол поворота. В данной установке использовались две последовательности  $U_A$  и  $U_B$ . У датчика ЛИР 128А возможно использование до пяти последовательностей:  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $неU_A$ ,  $неU_B$ ,  $U_R$ . Последовательности  $неU_A$ ,  $неU_B$  такие же, как и  $U_A$ ,  $U_B$ , но смещены на половину периода и могут использоваться для контроля.  $U_R$  последовательность позволяет производить только счёт оборотов (один импульс на оборот).

### Модуль дискретного ввода/вывода UNIO96-5

Выбор программируемого модуля UNIO96-5 был определен необходимостью обработки дискретных сигналов от концевых выключателей и двух датчиков положения. Кроме этого применение этого модуля для обработки датчиков положения позволяет снизить нагрузку на центральный процессор персонального компьютера, так как благодаря технологии перепрограммируемых матриц (FPGA) отсутствует необходимость постоянно подсчитывать импульсы, поступающие в систему и определять направление вращения вала двигателя. Изменение варианта загружаемой схемы в перепрограммируемую матрицу, а следовательно, и способа обработки сигналов осуществляется перепрограммированием EEPROM непосредственно в рабочей системе. Данный вариант загрузки матриц стал возможным благодаря использованию технологии ISP (In System Programmable).

Микросхемы FPGA обладают повышенной нагрузочной способностью, что позволяет подключать к UNIO96-5 светодиодные индикаторы и любые опто-модули Grayhill, Opto-22. Модули серии UNIOxx-5 имеют 5 разделяемых линий прерываний (возможно использование одной линии несколькими

модулями), разделяемый канал прямого доступа к памяти (DMA), формирователь сигнала IOCHRDY и светодиод обращения к плате.

Основные области применения модуля:

- управление опто-модулями Grayhill, Opto-22;
- прием и выдача дискретных сигналов;
- измерение частоты (длительности), фаз сигналов;
- счетно-таймерные операции;
- выдача частотных и ШИМ-сигналов;
- формирование временных диаграмм без использования ресурсов системы;
- преобразование кодов;
- ускорение логических или арифметических операций.



Рис. 2.4. Внешний вид модуля дискретного ввода-вывода UNIO96-5

Задачу обработки информации поступающей от датчиков положения выполняет стандартная прошивка «X32» представляющая собой два 32-разрядных счетчика импульсов энкодера.

Функциональная схема (рис. 2.5) прошивки «X32» состоит из функциональных блоков:

- интерфейс шины ISA (CB);
- выходной регистр (RG);
- 32-разрядные счетчики импульсов (СТ0, СТ1);
- формирование прерываний при переполнении счетчиков СТ0, СТ1;
- входной буфер (BUF)

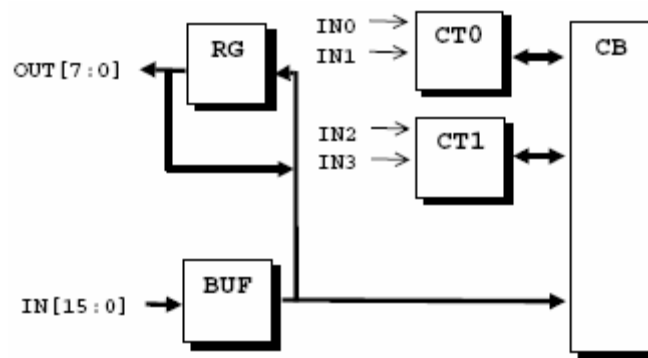


Рис. 2.5. Блок-схема прошивки X32.

Управление и конфигурация осуществляется с помощью соответствующих контрольных регистров доступных по чтению и записи. Режим записи необходим для обнуления содержания 32-разрядных счетчиков импульсов.

### Модуль аналогового ввода/вывода AI16-5A-1

Модуль аналогового ввода-вывода AI16-5A-1 (рис. 2.6) выполнен в стандарте MicroPC и предназначен для преобразования 16-ти аналоговых сигналов напряжения или 8-ми сигналов тока в 14-ти разрядный цифровой код.

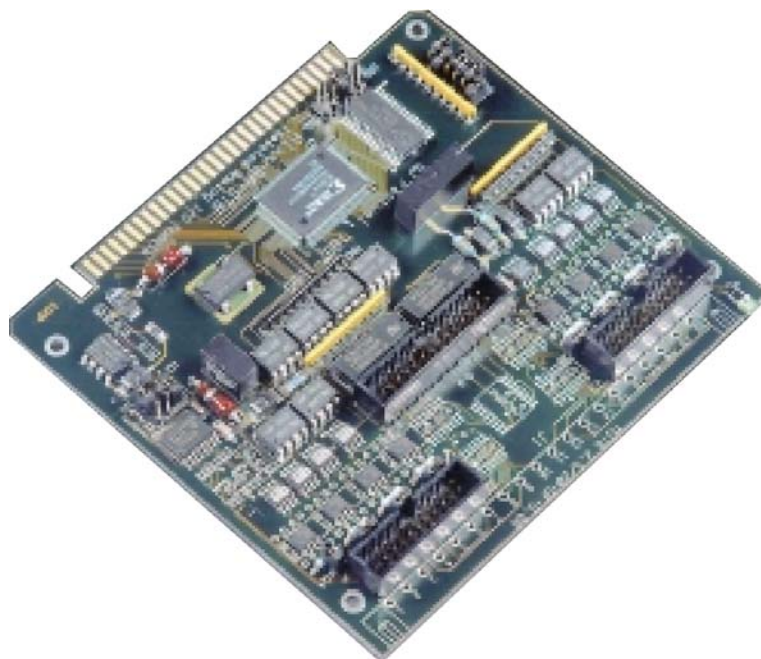


Рис. 2.6. Внешний вид платы аналогового ввода-вывода

Все входы-выходы платы гальванически изолированы от системы (групповая изоляция), а аналоговые входы имеют защиту от перенапряжения. Наиболее полно структуру модуля поясняет блок-схема, приведенная на рис. 2.7.

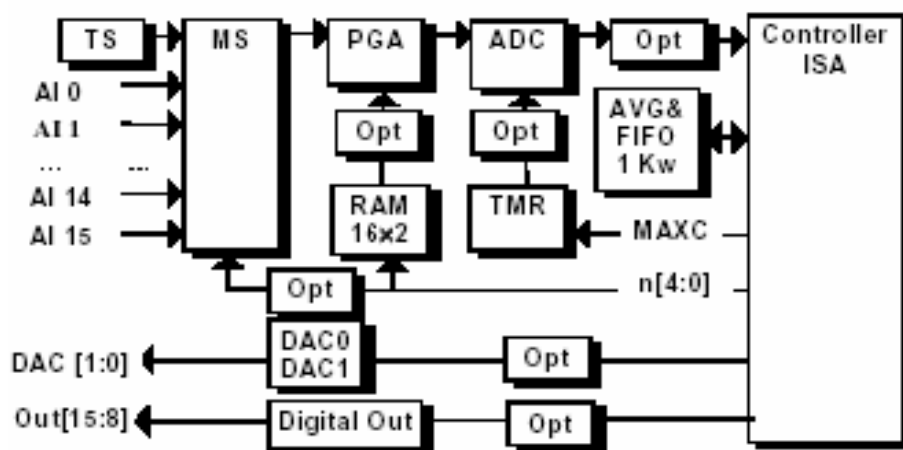


Рис. 2.7. Блок-схема модуля AI16-5A

На рис. 2.7 приняты следующие обозначения:

- Controller ISA – контролер шины ISA;
- MS – мультиплексор входных сигналов;
- PGA – программируемый усилитель;
- RAM 16x2 – ОЗУ коэффициентов усиления для всех входов;
- AVG / FIFO – Блок усреднения и FIFO выборок;
- ADC – аналого-цифровой преобразователь;
- DACO, DAC1 – цифро-аналоговые преобразователи;
- Opt – блоки оптической развязки;
- TMR – таймер;
- TS – источник тестовых сигналов;
- Digital Out – порт цифровых выходов.

Аналоговые входы:

- 16 однопроводных или 8 дифференциальных входов (программируемый тип подключения входов);
- 14-разрядный АЦП (AD7894-10);
- программируемый коэффициент усиления по любому входу (хранится в регистре): 1, 2, 4, 8;
- диапазоны входных напряжений/ токов (с учетом усиления):
- $\pm 10\text{В}$ ;  $\pm 5\text{В}$ ;  $\pm 2.5\text{В}$ ;  $\pm 1.25\text{В}$ ;
- $\pm 80\text{мА}$ ;  $\pm 40\text{мА}$ ;  $\pm 20\text{мА}$ ;  $\pm 10\text{мА}$ .
- защита от перенапряжения:  $-35/+50\text{В}$ ;
- пропускная способность (по DMA или при работе с FIFO): 100000 выборок в сек. (для диапазонов 1); 40000 / 33000 / 7500 / 800 выборок в сек. (для диапазона 2);
- входное сопротивление:  $>10\text{МОм}$  (напряжение);  $125\text{Ом}$  (ток);
- аппаратное усреднение 2, 4, 8, 16 выборок;
- случайная погрешность измерения без усреднения:  $\pm 2\text{МЗР}$ ;
- случайная погрешность измерения с усреднением:  $\pm 0.5\text{МЗР}$ ;
- FIFO (CY7C429): 1Кслов (программируемая верхняя граница);
- авто-сканирование входов;

- 2 однопроводных выхода (AD7249 + AD6941), 12-разрядная точность;
- Диапазон (установка переключками): 0-5В; ±5В; 0-10В; 0-20мА; 4-20мА;

Дополнительно:

- таймер: 16-бит (1μs или 10μs);
- цифровые выходы: 8 (время установки 1.6μs);
- разделяемые линии прерываний (5) и каналы DMA (2);
- напряжение изоляции: 1000В (все входы-выходы от системы).

Режимы работы:

- старт АЦП: программный; аппаратный (от таймера);
- считывание из АЦП: опрос (ADC ready, FIFO/SRAM full);
- по прерыванию (ADC ready, FIFO/SRAM full); по каналу DMA (ADC ready).

В системе управления следящими электроприводами данный модуль ввода/вывода предназначен для управления двумя регулируемым электроприводами «КЕМЕК» с помощью установленных на нем цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Основные параметры ЦАП приведены в табл. 2.1. Работа с ЦАП осуществляется с помощью регистров управления выделенных в адресном пространстве шины ISA, которые жестко установлены относительно базового адреса модуля. Рабочий диапазон значений ЦАП лежит в пределах от 0 до 4096. Значению 0 соответствует величина выходного напряжения равная -5В. Значению 4096 соответствует величина выходного напряжения равная +5В. Характеристику ЦАП поясняет рис. 2.5, из которого следует, что для выдачи сигнала управления на РЭП необходимо учесть смещение на величину 2048.

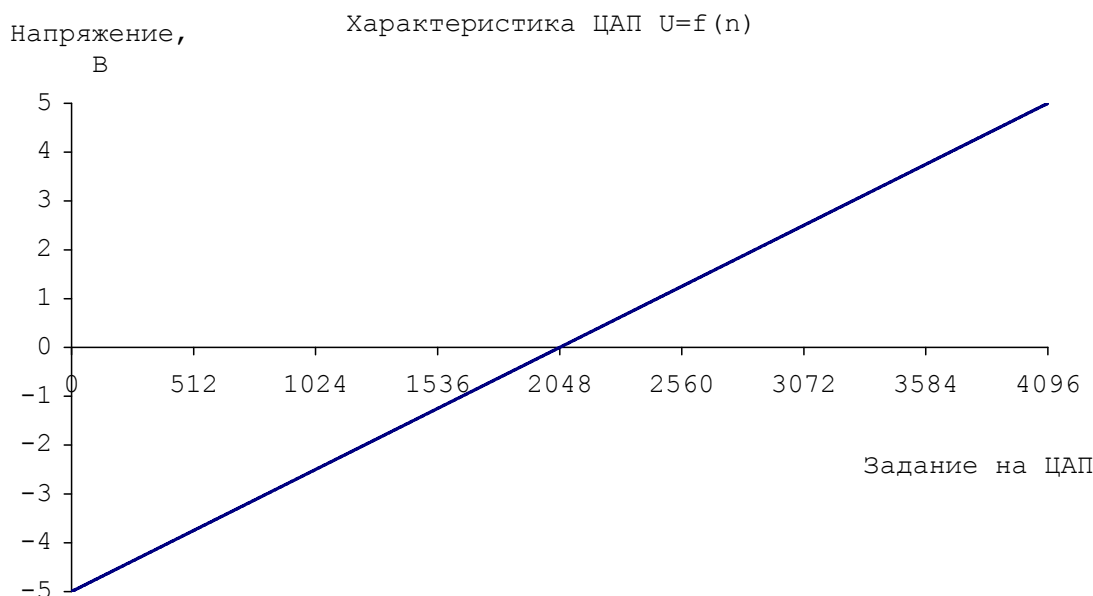


Рис. 2.8. Характеристика ЦАП

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

В системах с числовым программным управлением задание по соответствующим координатам формируется в соответствии с заданной траекторией движения по средствам интерполятора. В данном случае мы рассматриваем линейную интерполяцию.

#### *Движение с постоянной контурной скоростью*

Формулы, описывающие расчет задания при движении с постоянной контурной скоростью  $V_c = 0$  приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} dV_X &= V_2 \cdot \Delta T \cdot (X_1 - X_2) / L; \\ dV_Y &= V_2 \cdot \Delta T \cdot (Y_1 - Y_2) / L, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} TaskX_i &= TaskX_{i-1} + dV_X; \\ TaskY_i &= TaskY_{i-1} + dV_Y; \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

где  $i = 1 \dots k$  – текущий такт расчета задания;

$k = (X_2 - X_1) / dV_X = (Y_2 - Y_1) / dV_Y$  – число тактов расчета задания;

$dV_X, dV_Y$  – приращение пути на каждом такте по координатам  $X, Y$  с учетом того, что контурное ускорение равно 0;

$\Delta T$  – период квантования по времени;

$X_1, X_2, Y_1, Y_2$  – координаты начальной и конечной точки заданного отрезка;

$L$  – длина отрезка или, иначе говоря, контурный путь, пройденный от начальной точки до конечной точки;

$TaskX_i, TaskY_i$  – задание на РЭП по соответствующим координатам на  $i$ -м такте интерполяции.

#### *Разгон с постоянным контурным ускорением*

Выражения, описывающие движение с разгоном от заданной скорости  $V_1$  до  $V_2$  при постоянном контурном ускорении  $a_c \neq 0$  приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} V_{Ci} &= V_{Ci-1} + a_c \cdot \Delta T \cdot (V_2 - V_1); \\ TaskX_i &= TaskX_{i-1} + V_{Ci} \cdot \Delta T \cdot (X_1 - X_2) / L; \\ TaskY_i &= TaskY_{i-1} + V_{Ci} \cdot \Delta T \cdot (Y_1 - Y_2) / L, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где  $i = 1 \dots k$  – текущий такт расчета задания;

$k = (V_2 - V_1) / (a_c \cdot \Delta T)$  – число тактов расчета задания;

$V_{Ci}$  – контурная скорость на  $i$ -м такте интерполяции;

$a_c$  – контурное ускорение, задается по абсолютной величине;

$V_1, V_2$  – контурная скорость в начале и конце заданного отрезка.

Особенностью использования формул 3 является тот факт, что при разгоне с заданным ускорением РЭП может выйти на заданный уровень скорости раньше, чем исполнительный механизм выйдет на заданную точку в конце отрезка. Поэтому помимо участка разгона на заданном отрезке может появ-



вителься участок движения с постоянной контурной скоростью, движение по которому описывается выражениями 3.1, 3.2.

### **Торможение с постоянным контурным ускорением**

Аналогично, как и при разгоне в случае торможения может быть участок движения с постоянной контурной скоростью. Длина этого участка определяется разностью между длиной заданного отрезка и длиной участка торможения.

Выражения, описывающие движение с торможением от заданной скорости  $V_1$  до  $V_2$  при постоянном контурном ускорении  $a_c \neq 0$  приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} V_{Ci} &= V_{Ci-1} + a_c \cdot \Delta T \cdot (V_2 - V_1) \cdot \text{sign}(V_2 - V_1); \\ TaskX_i &= TaskX_{i-1} + V_{Ci} \cdot \Delta T \cdot (X_1 - X_2) / L; \\ TaskY_i &= TaskY_{i-1} + V_{Ci} \cdot \Delta T \cdot (Y_1 - Y_2) / L, \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Функция  $\text{sign}(V_2 - V_1)$  учитывает факт торможения. Т.е. на каждом такте  $V_{Ci}$  уменьшается.

Геометрически участки разгона, движения с постоянной контурной скоростью, торможения представлены на рис. 3.1.

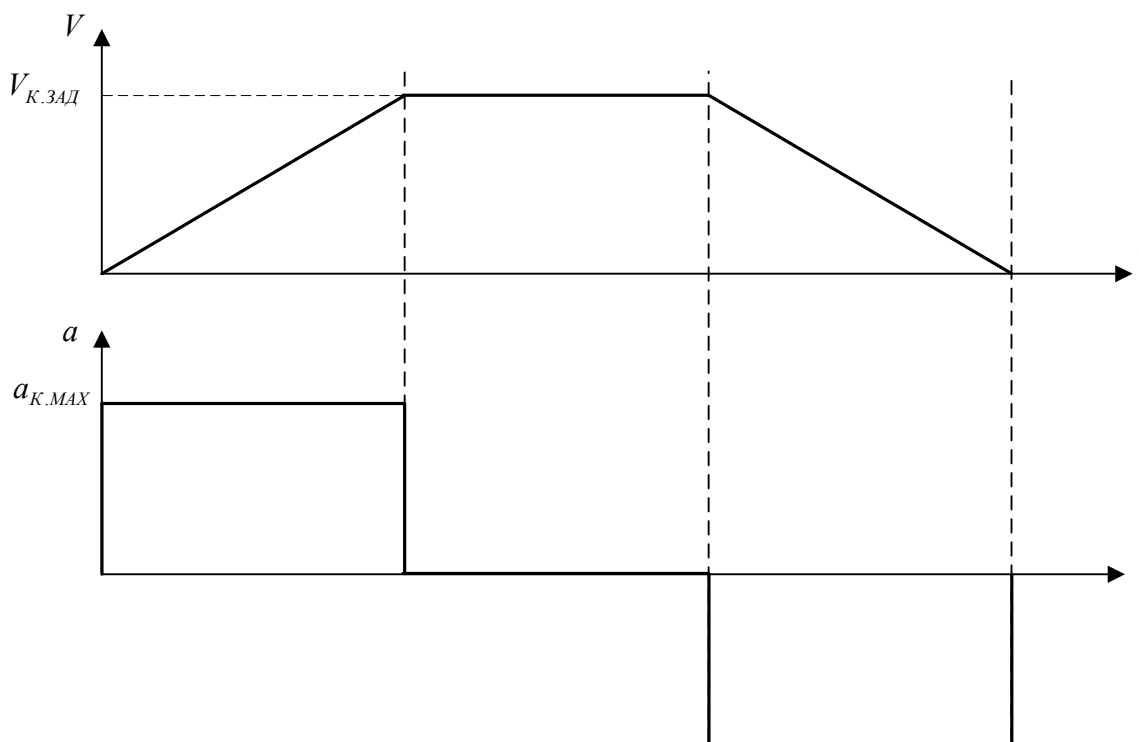


Рис. 3.1. Изменение контурной скорости и ускорения при разгоне, движении с постоянной скоростью и торможении

#### 4. КОНТУРНЫЕ ОШИБКИ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ

Ошибка воспроизведения заданной траектории движения оценивается с помощью векторной и контурной ошибок. На рис. 4.1 пунктирной линией показана заданная траектория движения, сплошной линией отработанная.

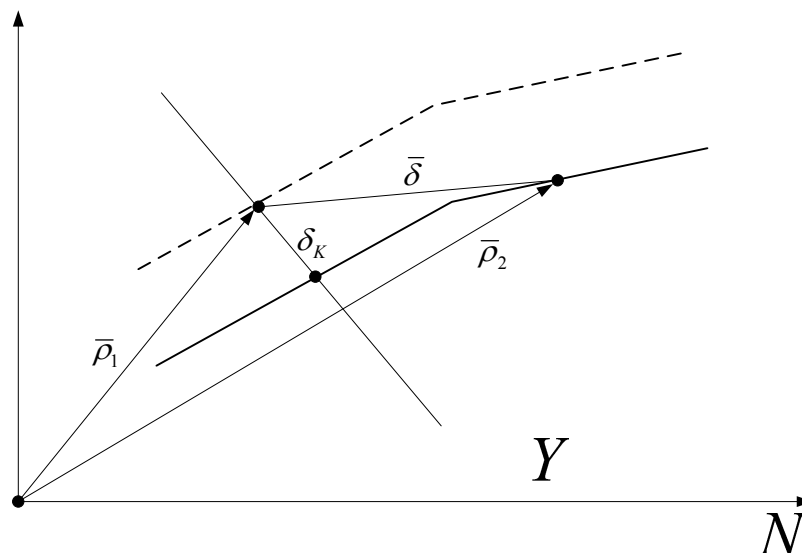


Рис. 4.1. Заданная и отработанная траектории движения

Приняв точку  $B$  (характеризующуюся вектором  $\bar{\rho}_2$ ) за текущее положение механизма на отрабатываемой траектории движения, а точку  $A$  (характеризующуюся вектором  $\bar{\rho}_1$ ) за заданное положение механизма в этот момент времени, то векторную ошибку можно будет определить по выражению

$$\bar{\delta} = \bar{\rho}_1 - \bar{\rho}_2. \quad (4.1)$$

Векторная ошибка на плоскости  $XU$  может быть также определена через координатные ошибки

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}, \quad (4.2)$$

где  $\delta_x = X_3 - X_0$ ,  $\delta_y = Y_3 - Y_0$  – координатные ошибки по осям  $X, Y$  определяются как разность между заданной координатой и отработанной.

Координатные ошибки в свою очередь разделяются на статические (при останове привода) и динамические (при движении привода).

Основными составляющими суммарной статической ошибки являются:

1. ошибка датчика положения и измерительной схемы;
2. ошибка кинематической схемы;
3. моментная ошибка;
4. ошибка от дрейфа нуля усилительного канала;
5. ошибка от наличия нелинейностей;
6. ошибка от упругости рабочих органов.

- Ошибка датчика положения и измерительной схемы определяется дискретностью датчика положения, т.е. его разрешающей способностью и наличием помех в канале измерения положения.

- Ошибка кинематической схемы определяется наличием зазоров в кинематической цепи механизма, упругостью механической части системы.
- Моментная ошибка в общем случае определяется выражением

$$\delta_M = \frac{\Delta V_C}{V} \cdot \delta_V, \quad (4.3)$$

где  $V$  – линейная скорость;  $\Delta V_C = \Delta \omega_C \cdot K_M$  – изменение линейной скорости под действием момента нагрузки  $M_C$ ;  $\delta_V$  – скоростная ошибка;  $\Delta \omega_C$  – изменение угловой скорости под действием момента нагрузки  $M_C$ ,  $K_M$  – коэффициент передачи механизма.

Выражение (4.3) показывает, что при работе привода на высоких скоростях моментная ошибка значительно меньше скоростной. Поэтому ее учет нужно вести при низких скоростях и в зоне позиционирования.

- Ошибка от дрейфа нуля усилительного канала обусловлена наличием температурной нестабильности аналоговых элементов регулируемого привода, а также наличием нестабильностей в канале ЦАП.
- Ошибка от наличия нелинейностей в основном обусловлена нелинейностью в механической части системы (зазор).
- Ошибка от упругости рабочих органов обусловлена эффектом скручивания вала в механической части системы под действием момента сопротивления.

С практической точки зрения интерес представляет контурная ошибка, которая есть величина отклонения по нормали между заданной и отработанной траекторией движения. На рис. 4.1 на нормали  $NI$  отрезок  $AD = \delta_K$  характеризует значение контурной ошибки в текущий момент времени. Однозначной связи между контурной и координатной ошибками не существует. Контурная ошибка может быть вычислена только при определенных входных воздействиях. Однако при этом справедливо следующее: чем меньше координатные ошибки, тем меньше и векторная, и контурная ошибки. Поэтому необходимо стремиться к достижению минимума координатных ошибок.

Пример расчета контурной ошибки при воспроизведении типовой (линейной) траектории движения описан ниже. На рис. 4.2 пунктиром показана заданная прямая, сплошной линией показана фактическая (отработанная). В установившемся режиме обе траектории параллельны, так как привод имеет астатизм первого порядка.

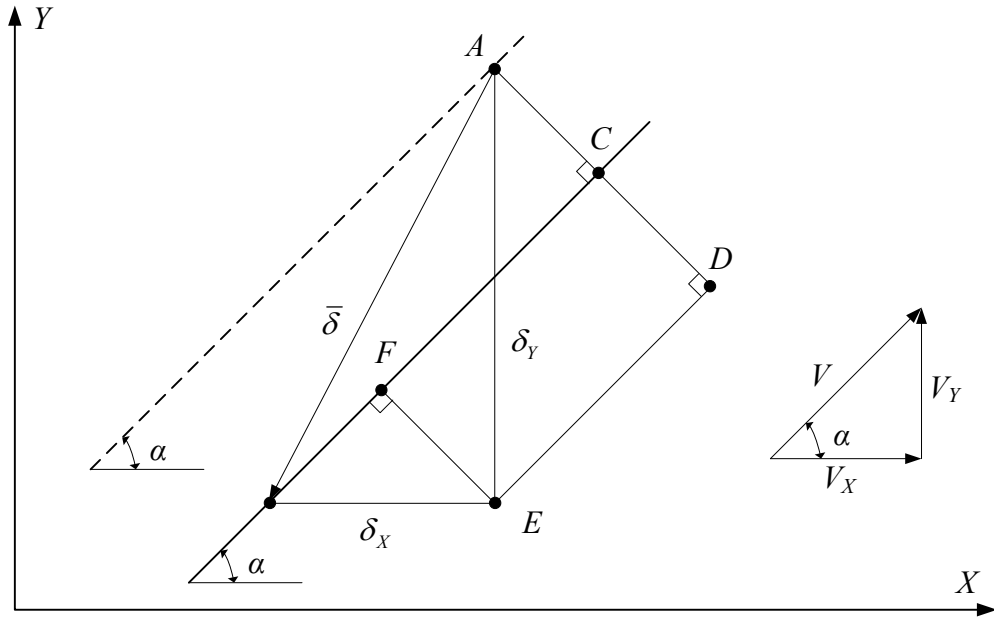


Рис. 4.2. Воспроизведение прямой

Контурная ошибка определяется выражением

$$\delta_k = AC = AD - CD. \quad (4.4)$$

Рассмотрев треугольники  $\triangle ADE$  и  $\triangle BEF$  соответственно получаем:

$$\left. \begin{aligned} AD &= \delta_Y \cdot \cos \alpha; \\ CD &= \delta_X \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

В режиме движения с постоянной скоростью каждый координатный привод имеет только скоростную ошибку:

$$\left. \begin{aligned} \delta_X &= \frac{V_X}{K_X}; \\ \delta_Y &= \frac{V_Y}{K_Y}. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

где  $K_X, K_Y$  соответственно добротность по скорости привода, работающего по координате  $X$  и  $Y$ .

С учетом выражений 4.4-4.6 и используя соотношение  $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$ , окончательно получаем

$$\delta_k = \frac{K_X - K_Y}{2K_X \cdot K_Y} \cdot V \cdot \sin 2\alpha. \quad (4.7)$$

Полученное выражение показывает, что контурная ошибка при воспроизведении прямой будет только при неидентичных приводах, когда  $K_X \neq K_Y$ . Поэтому всегда следует стремиться обеспечить идентичность приводов по координатам.

## 5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение на верхнем уровне разработано в среде Delphi 7 и работает под управлением операционной среды Windows XP. Интерфейс пользователя разработанной программы изображен на рис. 5.1.

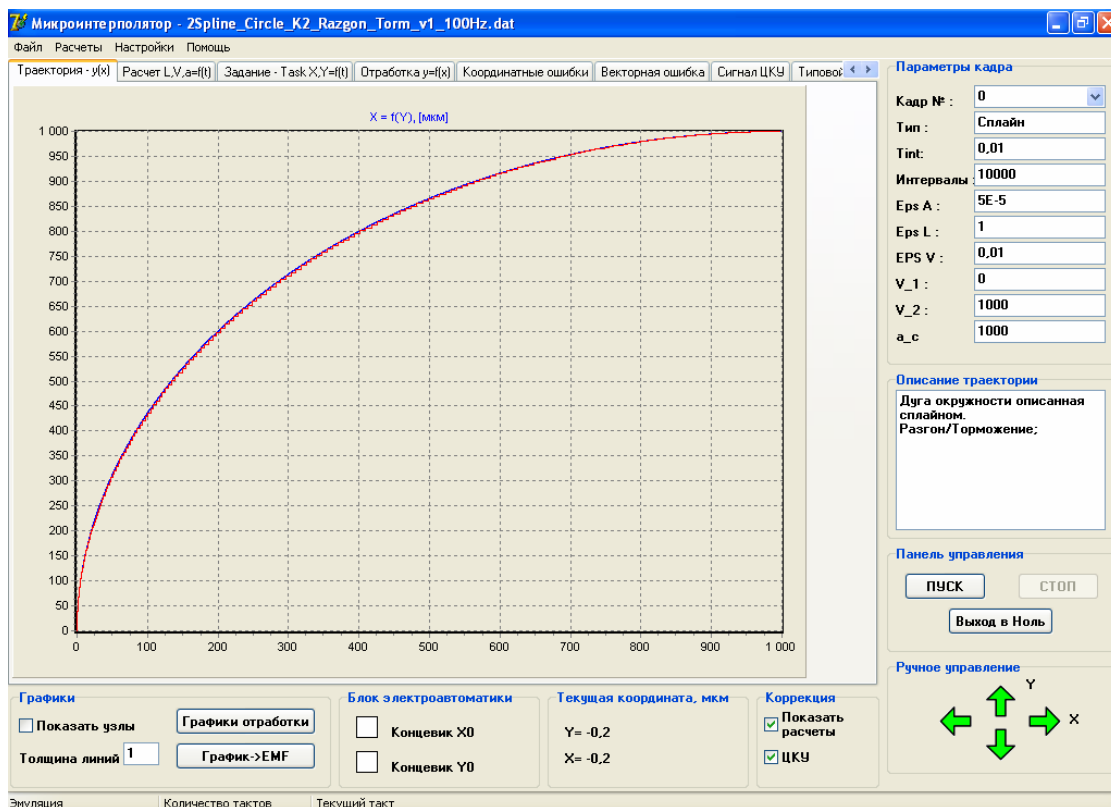


Рис. 5.1. Интерфейс пользователя

Функциональные возможности программного обеспечения системы управления:

1. Создание библиотек траекторий движения электроприводов;
2. Сохранение и отображение результатов эксперимента – массивы заданий и отработки по положению, скоростей, координатных и векторных ошибок, сигналов цифровой коррекции;
3. Возможность проведения типовых экспериментов – скачкообразное и линейное изменение управляющего воздействия;
4. Режим ручного управления – перемещение в пределах рабочей зоны с помощью кнопок ручного управления;
5. Отображение состояния конечных выключателей и текущей координаты;
6. Исследование влияния параметров цифрового контура положения на координатные и контурные ошибки системы (коэффициентов регуляторов положения по обеим осям, частоты квантования по времени и уровню в контуре положения, коэффициентов цифрового корректирующего устройства);

## 7. Изменение адресного пространства ввода-вывода модулей AI16-5A-1 и UNIO96-5.

Особенностью программного обеспечения функционирующего под управлением многозадачной операционной системой является отсутствие гарантированного срабатывания программы в заданный момент времени. Поэтому подобную систему управления, построенную по такому принципу можно лишь с натяжкой назвать системой «мягкого реального времени», т.е. системой иногда допускающей запаздывание реакции на какое-либо внешнее воздействие.

### Работа с программой:

- Загрузка заданной траектории движения: меню «Файл» подменю «Загрузить траекторию»;
- Сохранение результатов эксперимента: меню «Файл» подменю «Сохранить результат эксперимента»;
- Расчет траектории движения: меню «Расчеты» подменю «Расчет кадров»;
- Изменение параметров цифрового контура положения: меню «Настройки» подменю «Параметры оборудования»;
- Ручное управление осуществляется с помощью нажатия левой клавиши мыши на соответствующую зеленую стрелку, расположенную справа в низу рабочего поля программы;
- Запуск и останов отработки заданной траектории осуществляется нажатием на кнопки «ПУСК» и «СТОП». При запуске программы следует обратить внимание на то, что после нажатия кнопки «ПУСК» текущая координата принимается равной нулю по обеим осям.

**Результаты эксперимента**, сохраненные в текстовый файл содержат 10 столбцов. Описание каждого столбца приведено в таблице 5.1.

Таблица 5.1

№ столбца	Описание
1	Текущее время
2	Задание по оси X
3	Задание по оси Y
4	Сигнал обратной связи по оси X
5	Сигнал обратной связи по оси Y
6	Координатная ошибка по оси X
7	Координатная ошибка по оси Y
8	Векторная ошибка
9	Сигнал ЦКУ по оси X
10	Сигнал ЦКУ по оси Y

## 6. ОБОЗНАЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ

Особенности управления экспериментальной установкой поясняют обозначения, нанесенные на стойку с электроприводами (см. табл. 6.1.)

Таблица 6.1

Обозначение	Описание
<b>РУЧН</b>	Ручной режим управления
<b>ПК</b>	Режим управления от персонального компьютера
<b>X→</b>	Движение по оси X вправо (Ручной режим)
<b>←X</b>	Движение по оси X влево (Ручной режим)
<b>Y→</b>	Движение по оси Y вправо (Ручной режим)
<b>←Y</b>	Движение по оси Y влево (Ручной режим)
<b>X↔</b>	Съезд с «аварийного» концевого выключателя по оси X
<b>Y↔</b>	Съезд с «аварийного» концевого выключателя по оси Y

## 7. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Задать траекторию движения на плоскости содержащую в себе участки разгона, движения с постоянной контурной скоростью, торможение. Пример задания участка разгона приведен в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Формат файла траектории движения

Параметр	Описание
<b>POSITION CONTOUR</b>	Заголовок файла
<b>Description=</b> Линейная интерполяция;	Описание траектории
<b>LINE</b>	Признак начала задания отрезка
<b>T_int=0,01</b>	Период квантования по времени, с
<b>V_1=0</b>	Скорость в начальной точке движения по отрезку, мкм/с
<b>V_2=5000</b>	Скорость в конечной точке движения по отрезку, мкм/с
<b>a_c=1000</b>	Допустимое контурное ускорение
<b>a_type=step</b>	Функция изменения ускорения при разгоне (в нашем случае скачек ускорения)
0,0 0,0	Координата начальной точки отрезка
50000,0 50000,0	Координата конечной точки отрезка
<b>END</b>	Признак окончания файла

2. Аналогичным образом, варьируя заданной контурной скоростью ( $V_1$ ,  $V_2$ ) и ускорением ( $a_c$ ) сформировать еще несколько траекторий движения.

3. Сравнить полученные зависимости  $X=f(Y)$  по датчику положения и по расчету задания. Вычислить контурную ошибку.
4. Найти и сравнить первую и вторую производные от сигнала задания и от массива точек полученных по датчику положения.
5. Проанализировать влияние частоты квантования сигнала на качество отработки траектории движения ( $f=100, 80, 60, 40, 20$  Гц).
6. Оценить влияние коэффициента регулятора положения  $K_{PI}$  на качество и производительность отработки траектории.

## 8. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

1. Привести краткое описание функциональной схемы установки.
2. Описать основные элементы цифровой части системы управления (модуль дискретного ввода-вывода, модуль аналогового ввода-вывода, датчик положения). Привести функции, которые выполняет каждый модуль.
3. Привести полученные графики заданной и отработанной траектории движения на плоскости  $XU$ . Построить графики первой и второй производной от заданной и отработанной траектории движения во времени.
4. Показать графики задания и отработки траектории движения при разных частотах квантования сигнала  $f=100, 80, 60, 40, 20$  Гц.
5. Оценить координатные, контурные и векторные ошибки, полученные при отработке заданной траектории движения.
6. Выводы по полученным результатам эксперимента.