



АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО МИРОВОГО УРОВНЯ АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ СИСТЕМ ЧПУ

В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов (МГТУ "СТАНКИН")

Представлен и проиллюстрирован анализ архитектуры систем ЧПУ. Предложена классификация, указывающая на существование на рынке ЧПУ пяти архитектурных вариантов. Показано, что в спектре архитектурных решений наиболее уверенные позиции занимает концепция PCNC. Самая значительная тенденция состоит в развитии и реализации идей открытой архитектуры ЧПУ, которая предоставляет конечному пользователю широкие возможности для внедрения в систему ЧПУ собственных функций. Обозначена тенденция включения систем ЧПУ в интегрированную среду соответственно стандарту STEP, что приведет как к новым системам программирования ЧПУ, так и к новым архитектурным решениям.

**Введение**

Выполненный нами анализ потребовал привлечения большого числа литературных источников, рекламных материалов, Internet-информации и сведений, полученных от компетентных зарубежных специалистов. Вся эта информация крайне неоднородна, и ее обобщение стало возможным лишь благодаря собственному научному опыту авторов. Прежде всего, была сделана попытка классифицировать архитектурные варианты в табличной форме (таблица), столбцы которой указывают на архитектурные варианты, а в строках представлены архитектурные компоненты.

Таким образом, установлены пять архитектурных вариантов, которые сосуществуют на рынке ЧПУ. Классические системы CNC (первый вариант) до сих пор выпускаются лишь фирмами с богатой традицией производства высококачественной собственной микроэлектронной аппаратуры. Но и эти фирмы под давлением конечных пользователей, желающих иметь гибкий интерфейс оператора, предлагают модификацию с ПК в качестве терминала (второй вариант). По многим причинам [1] первые системы типа PCNC относились к двухкомпьютерной архитектуре (третий вариант); они и сегодня очень популярны и наиболее широко распространены. Несколько позднее появились системы PCNC, ядро которых реализовано на отдельной плате, устанавливаемой в корпусе промышленного ПК (четвертый вариант). Наконец, по мере повышения мощности микропроцессоров, все большее распространение получает однокомпьютерный (пятый) вариант системы PCNC. Все варианты отражают суммарный опыт разработчиков систем ЧПУ и перспективные тенденции. В этой

связи их рассмотрение достаточно поучительно, в особенности для тех, кто занимается разработкой новых моделей у нас в стране.

В ближайшей перспективе можно предположить появление новых архитектурных решений, которые предполагают полную интеграцию систем ЧПУ в среду CAD-CAE-CAM соответственно стандарту STEP (Standard for Exchange of Product model data for NC). Важное значение для ЧПУ приобретает конечная фаза этого стандарта – STEP-NC (ISO-14649). Новейшим тенденциям посвящена заключительная часть статьи.

**Системы CNC и PCNC-1**

Архитектура систем CNC является мультимикро-процессорной. Эволюция привела к сближению систем CNC и PCNC-1, которые различаются главным образом способом реализации терминального моду-

Таблица. Классификация архитектурных решений систем ЧПУ

	CNC	PCNC-1	PCNC-2	PCNC-3	PCNC-4
ПК	-	Интерфейс оператора			Интерфейс оператора. Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики.
Встроенный одноплатный компьютер		-		Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики.	-
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.		Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики.		
Объекты управления	Локальные		Сетевые		

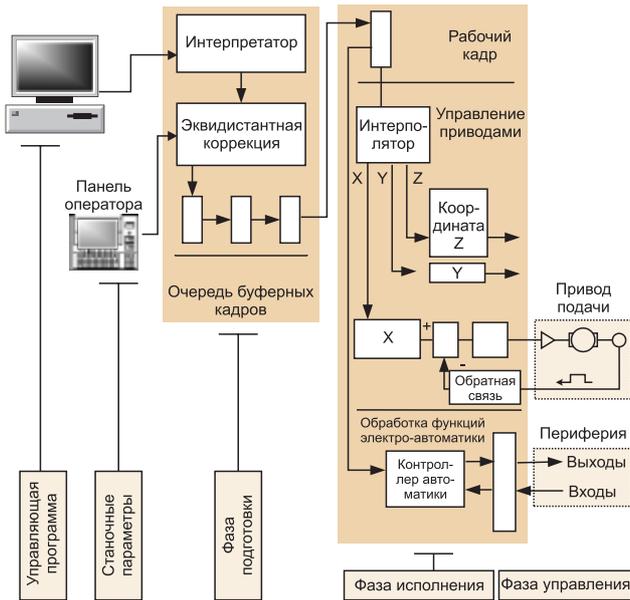


Рис. 1. Архитектура системы ЧПУ типа CNC фирмы NUM

ля – в виде специализированного вычислительного блока или ПК. Семейство NUM (Франция, в составе концерна Schneider, Германия) построено по принципу многопроцессорных CNC-систем, включающих процессоры: ЧПУ, ПЛК автоматики и графические (рис. 1).

Система компании NUM может быть оснащена микропроцессорным терминалом или промышленным компьютером с ОС Windows. Семейство представлено "компактными", а также и "модульными" версиями, которые различаются числом координат (и возможностью формировать независимые каналы ЧПУ из координатных групп), использованием аналоговых или автономных цифровых следящих при-

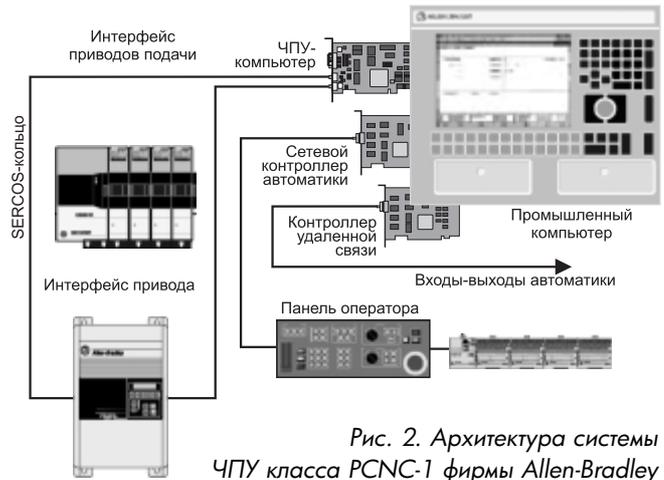


Рис. 2. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-1 фирмы Allen-Bradley

водов, подключенных к оптоволоконной сети, удаленных (сетевых) входов/выходов. Вычислительная мощность систем NUM исключительно высока, и этим объясняется широкий набор их функциональных возможностей. Так, предусмотрены: сплайновая и полиномиальная (до пятого порядка) интерполяция в пяти- и девятикоординатном пространстве, пятикоординатная коррекция инструмента, работа по двум различным управляющим программам, 3D-графика и др. В системах с терминальным компьютером возможна адаптация интерфейса оператора к запросам пользователей, диалоговое программирование с помощью инструментальных систем PROGRAM\_MILL и PROGRAM\_TURN.

Фирма Allen Bradley в составе концерна Rockwell (США) выпускает широкое семейство систем ЧПУ: от традиционной CNC (модель 9/440) к системе CNC с ПК в качестве терминала (модель 9/260(290)) и системе класса PCNC (модель 9/PC).

Модель на рис. 2 выполнена по классической схеме: специализированный промышленный компьютер с Windows NT и возможностью разрабатывать приложения пользователя на Visual Basic (функции прикладного интерфейса API опубликованы); PCI-одноплатный ЧПУ-компьютер, выполняющий все функции ядра, включая программно-реализованный контроллер электроавтоматики. Программирование и редактирование контроллера осуществляется через общий для системы терминал. ПЛК имеет собственную сеть.

### Системы типа PCNC-2

К этому классу относятся системы фирм ANDRON и BoschRexroth (Германия). Система ЧПУ фирмы ANDRON относится к полному двухкомпьютерному варианту. Ее структура представлена на рис. 3 в виде набора модулей: терминального компьютера, ЧПУ-компьютера, панели оператора и монитора, удаленных входов/выходов ПЛК, одной или нескольких групп цифровых (SERCOS) приводов подачи и главного привода. Аппаратура системы практически полностью состоит из покупных компонентов и плат.

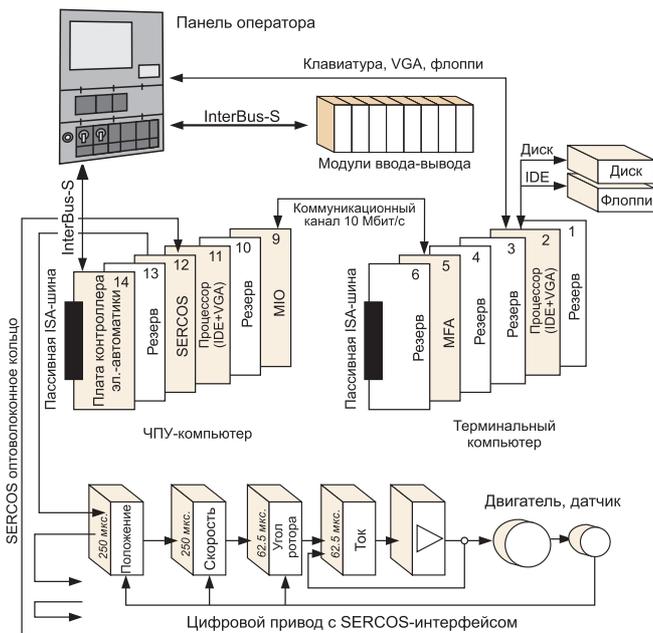


Рис. 3. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-2 фирмы ANDRON

В силу этого обстоятельства фирма ANDRON не скрывает деталей аппаратной реализации, и эта реализация весьма представительна для двухкомпьютерных версий систем ЧПУ и других фирм.

В составе терминального компьютера: материнская плата с Celeron-процессором и интегрированными контроллерами SCSI, VGA, TFT, IDE; многофункциональная интерфейсная плата MFA с памятью CMOS-ROM (связь с внешним модемом; транспьютерный контроллер коммуникационного канала, связывающего терминальный и ЧПУ-компьютеры). Все платы установлены на пассивной ISA-шине; причем предусмотрена установка дополнительных (по заказу) резервных плат: внутреннего модема, сетевой и SCSI-платы. Для специальных задач возможна установка PCI-плат.

В составе ЧПУ-компьютера: материнская плата с Celeron-процессором; плата MIO (Main Input-Output) поддержки коммуникационного интерфейса с терминальным компьютером (со скоростью 10 Мбит/с) и интерфейса маховичка ручного перемещения; плата ПЛК 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 платформе системы ЧПУ фирмы ANDRON аппаратный уровень накрыт ОС Windows NT в терминальном компьютере и оригинальной ОС PB – в ЧПУ-компьютере. На прикладном уровне терминальный компьютер открыт для разнообразных приложений и специальных диалогов конечного пользователя, которые можно назвать САМ-приложениями. Для построения САМ-приложений предусмотрен инструментальный язык ANLOG-C, обеспечивающий доступ к функциям ядра в ЧПУ-компьютере.

Система ЧПУ (Tur3.osa) фирмы BoschRexroth построена на основе двух высокопроизводительных компьютеров (классический двухкомпьютерный вариант) и обладает исключительно мощным набором функций (рис. 4).

Терминальный компьютер имеет ОС Windows NT, а ЧПУ-компьютер – ОС UNIX. Связь операционных сред осуществляется с помощью протоколов TCP/IP, что допускает удаленное размещение терминала и работу нескольких терминалов с одним ЧПУ-компьютером. В свою очередь, ЧПУ-компьютер предполагает многоканальную работу более чем с одной управляющей программой. Прикладное математическое обеспечение терминального компьютера и ядра ЧПУ в ЧПУ-компьютере окружены оболочкой из нескольких сот интерфейсных API-функций (Application Interface), которые предоставляют конечным пользо-

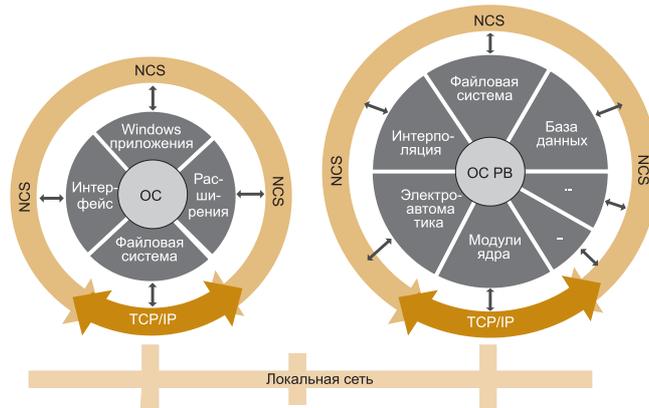


Рис. 4. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-2 фирмы BoschRexroth

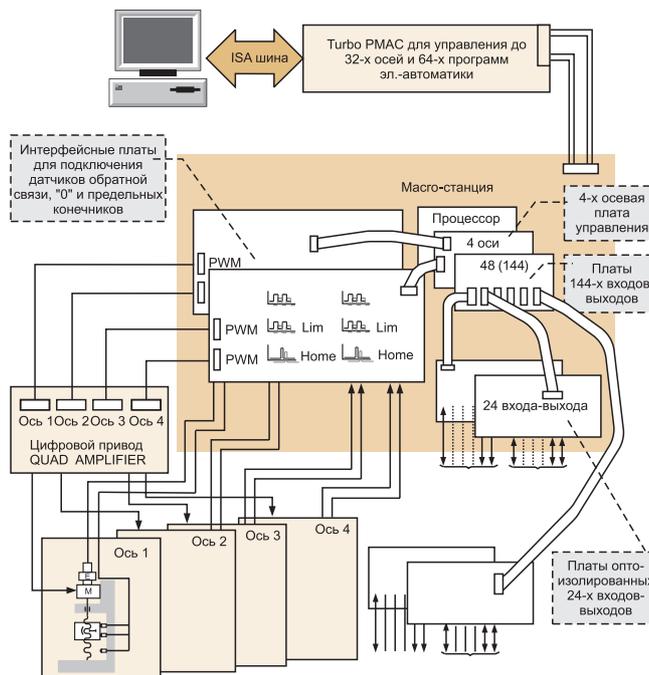


Рис. 5. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-3 фирмы DeltaTau,

где PWM – Pulse Width Modulation, широтно-импульсная модуляция; Lim (Limit) – ограничители; Home – нулевая точка

вателям возможность разрабатывать собственные приложения и расширения. В оболочку терминального компьютера включена мощная DLL-библиотека NCS (Numerical Control System) классов объектов, "покрывающая" API-функции, делающая разработку дополнительных приложений более простой и комфортной. В остальном состав прикладного математического обеспечения традиционен. Впрочем, можно отметить хорошо проработанный программно-реализованный контроллер электроавтоматики и несколько очень интересных приложений. Среди них: отладчик высокоуровневых управляющих программ; логический анализатор для удаленного контроля ПЛК; осциллограф для анализа динамики следящего привода, в том числе и с помощью рассчитываемых здесь же частотных характеристик.

*С исследованием систем ЧПУ дело обстоит как с музыкой: чем больше ее слушаешь, тем более тонких созвучий желаешь*

Журнал "Автоматизация в промышленности"

### Система типа PCNC-3

Типичным представителем системы типа PCNC-3 является DeltaTau (Великобритания). Эта система относится к двухкомпьютерному варианту, но такому, при котором ЧПУ-компьютер выполнен в виде отдельной платы PMAC (Programmable Multi-Axes Controller), устанавливаемой на ISA/PCI шине терминального ПК (рис. 5).

Терминальный компьютер с ОС Windows NT выполняет классические терминальные и функции интерпретатора управляющих программ. Одноплатный ЧПУ-компьютер PMAC (процессор Motorola 56300) решает геометрическую и логическую задачи [2, 3], выполняя функции интерполятора, контроллера управления приводами (подачи и шпинделя), программно-реализованного контроллера электроавтоматики.

Интерполятор обеспечивает все виды интерполяции (включая сплайновую), разгоны 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 способен управлять 32 координатными осями, сгруппированными в 16 координатных систем, он принимает сигналы позиционных датчиков обратной связи, замыкает позицион-

ные 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 для привода главного движения ( $\pm 10V$ ). Программно-реализованный контроллер электроавтоматики поддерживает параллельное управление 64 циклами электроавтоматики.

Выходные сигналы (для 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 Масгостанция (Motion and Control Ring Optical). Допустимо включение в кольцо нескольких таких терминалов. Терминал замыкает скоростные контуры восьми приводов и принимает сигналы ограничителей рабочей зоны и датчиков нулевых точек координатных систем (в блоках АСС), 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). Другая функция периферийного терминала — управление электроавтоматикой через модули оптоизолированных входов/выходов.

Набор модулей фирмы DeltaTau (PMAC и Macro) ориентирован на построение собственных систем ЧПУ у конечных пользователей, на долю которых остается разработка терминальной задачи и интерпретатора в среде промышленного ПК. Однако сами модули являются для конечного пользователя "черными ящиками", и их архитектура закрыта.

### Системы типа PCNC-4

Система ЧПУ фирмы Beckhoff (Германия) демонстрирует яркий пример чисто однокомпьютерной архитектуры PCNC, в рамках которой все задачи управления (геометрическая, логическая, терминальная) решены чисто программным путем, без какой-либо дополнительной аппаратной поддержки (рис. 6).

Внешний интерфейс выстроен на базе любой стандартной (по выбору) периферийной шины Fieldbus, 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. Выход к объектам осуществляется с помощью периферийных "терминалов" ввода/вывода.

Операционная среда представляет собой комбинацию Windows NT для поддержания процессов ма-

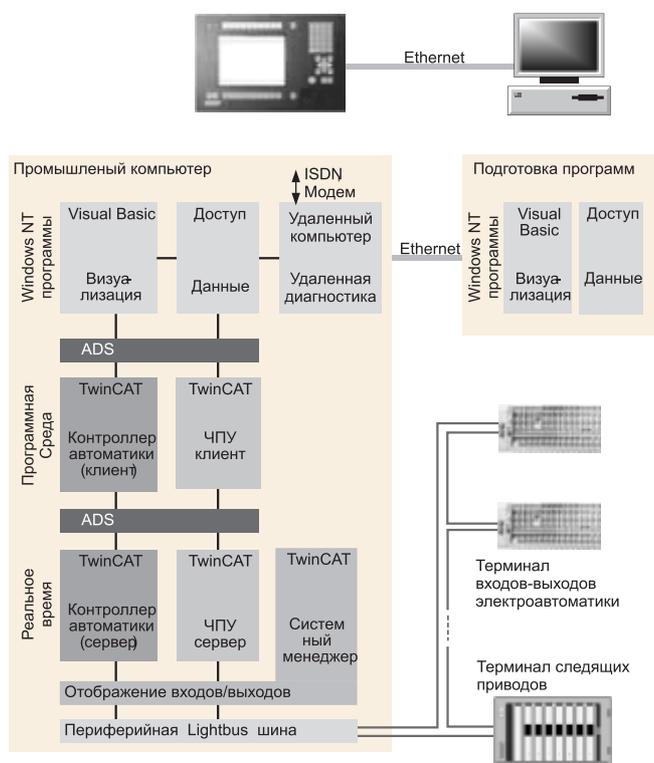


Рис. 6. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4 фирмы Beckhoff

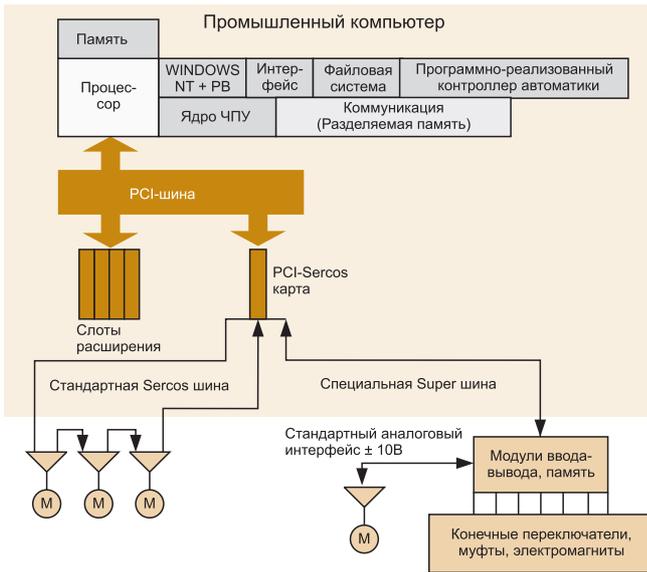


Рис. 7. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4 фирмы Power Automation, здесь PB – ядро PB

шинного времени, и системы TwinCat (Total Windows Control and Automation Technology). ОС TwinCat фирмы Beckhoff интегрирована в Windows NT, добавляет ей функции PB, не изменяя самой Windows NT. Перемещение данных и доступ к прикладным функциям API программных модулей осуществляется через программную шину ADS (Automation Device Specification). Системный менеджер, являющийся подсистемой 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 ПЛК, имеющие клиентскую часть (для подготовки данных) и серверную часть (для работы в PB). ЧПУ-клиент интерпретирует кадры управляющей программы в стандарте DIN 66025, а ЧПУ-сервер выполняет интерполяцию в "группах приводов", по три координаты в группе. Группы формируются системным менеджером. Для безэквидистантных программ можно обойтись без интерпретации, которую заменяет компилятор клиента контроллера автоматики. Одновременно работают до четырех контроллеров (являющихся виртуальными процессорами, работающими в стандарте IEC 1131-3), каждый из которых решает четыре задачи, имеющих свой приоритет и время цикла.

Система Power Automation (Германия) построена на основе промышленного ПК с PCI-шиной (рис. 7), ОС Windows NT и ядром PB (собственной разработки). Windows NT поддерживает работу интерфейса оператора, в том числе систему программирования ЧПУ и контроллера электроавтоматики, встроенную САМ-систему (опирающуюся на БД инструментов, материалов и технологических циклов), приложения конечного пользователя. Ядро PB син-

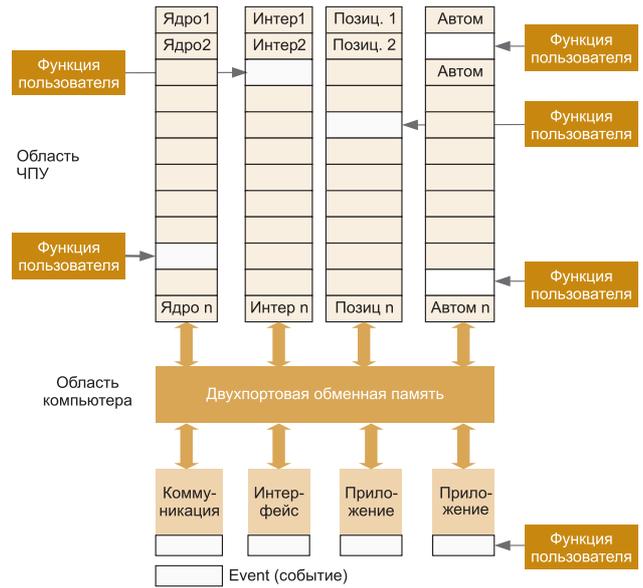


Рис. 8. Схема расширения функций ядра ЧПУ в системе фирмы Power Automation, где Ядро – модули ядра ЧПУ; Интер – модули интерполяции; Позиц – модули связи со следующими приводами подачи; Автом – модули управления электроавтоматикой

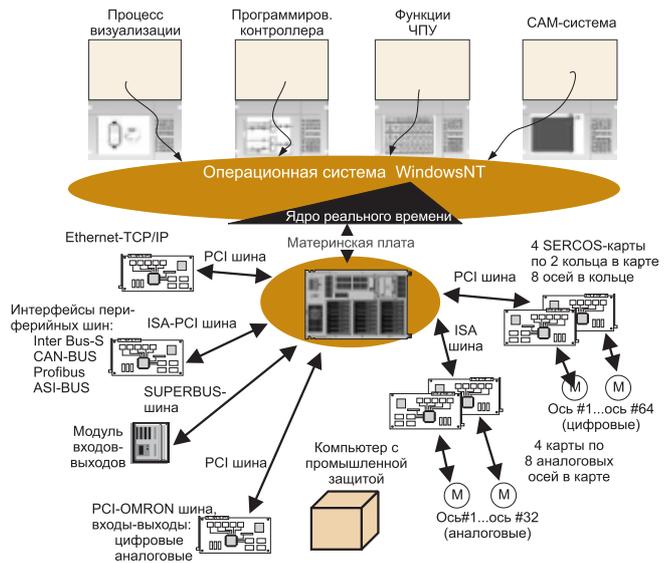


Рис. 9. Сетевое окружение системы ЧПУ фирмы Power Automation

хронизирует работу задач ЧПУ и электроавтоматики; диспетчирует работу интерпретатора, интерполатора и модуля управления следящими приводами.

Одновременно могут работать до восьми каналов ЧПУ, два программно-реализованных контроллера электроавтоматики с разными приоритетами. Система Power Automation имеет открытую архитектуру, которая допускает расширение функций ядра ЧПУ за счет специальных "compile cycles" (по терминологии Power Automation – скомпилированных циклов) (рис. 8) конечного пользователя.

Система имеет исключительно мощное сетевое окружение (рис. 9) как внешнее (Ethernet-TCP/IP,

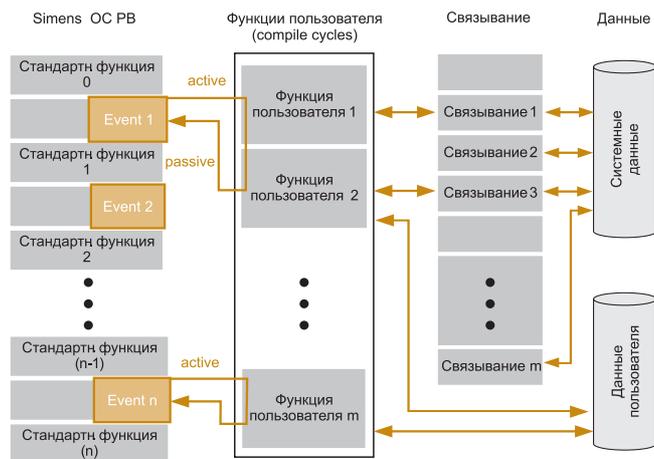


Рис. 10. Механизм поддержки открытой архитектуры в системе ЧПУ фирмы Siemens

Novell), так и периферийное (восемь оптоволоконных SERCOS-колец для 64-х следящих приводов, InterBus-S, Profibus DP, CAN-Bus, ASI-Bus). Кроме того, предусмотрены собственная периферийная шина SUPER-BUS для удаленных входов/выходов электроавтоматики, а также и удаленные входы/выходы фирмы OMRON (Япония) на PCI-шине. На шину SUPER-BUS могут быть установлены четыре интерфейсных платы для управления 32 аналоговыми приводами.

Фирма Siemens (Германия) не раскрывает особенностей своей архитектуры, и в этом плане можно лишь строить догадки. Однако обращает на себя внимание механизм поддержки открытой архитектуры, который абсолютно идентичен такому же механизму Power Automation. В этой связи, по-видимому, можно предположить и идентичность архитектур Siemens и Power Automation.

При разработке новой модели системы ЧПУ фирма Siemens сделала акцент на открытую архитектуру как со стороны интерфейса оператора, так и со стороны ядра системы (рис. 10). Интерфейс оператора работает в ОС Windows NT, поэтому включение в интерфейс Windows-приложений проблемы не составляет. Однако возможна и сравнительно глубокая реконфигурация интерфейса с помощью оригинальной инструментальной системы ProTool.

Для расширения функций ядра предложена схема, в соответствии с которой в процессы ядра включены своеобразные точки останова "break-out-points", называемые "events" (события). События инициируют фрагменты пользовательского кода на Visual C++, называемого здесь "compile cycles" (скомпилированные циклы). Скомпилированные циклы имеют унифицированный интерфейс OPI (OEM Program Interface), что обеспечивает им стандартный доступ к системным данным и функциям посредством механизма связывания "binding". С другой стороны, скомпилированные циклы могут использовать и собственные данные. Такой подход обеспечивает полную совместимость расширенного ПО системы ЧПУ.

Для сравнения обратимся вновь к архитектуре системы ЧПУ Power Automation. Даже беглое сопоставление и одинаковая терминология указывают на то, что в обоих случаях использованы одинаковые механизмы внедрения функций конечного пользователя, т.е. одинаковый подход к реализации открытой архитектуры.

### Влияние стандарта STEP-NC на перспективную архитектуру ЧПУ

Программирование современных систем ЧПУ подчиняется стандарту ISO 6983 (DIN 66025), которому уже более 50 лет и который явно тормозит развитие ЧПУ-технологии. Стандарт поддерживает простые команды для элементарных перемещений и логических операций, но не сложные геометрию и логику. Управляющие программы в стандарте ISO 6983 содержат ничтожное подмножество информации, полученной на уровне CAD-CAM систем. Однако более серьезным фактором является невозможность двухстороннего обмена информацией с этими системами. Это означает, что любые изменения в управляющей программе не могут быть отображены в восходящем информационном потоке к системам CAD-CAM [4] (рис. 11).

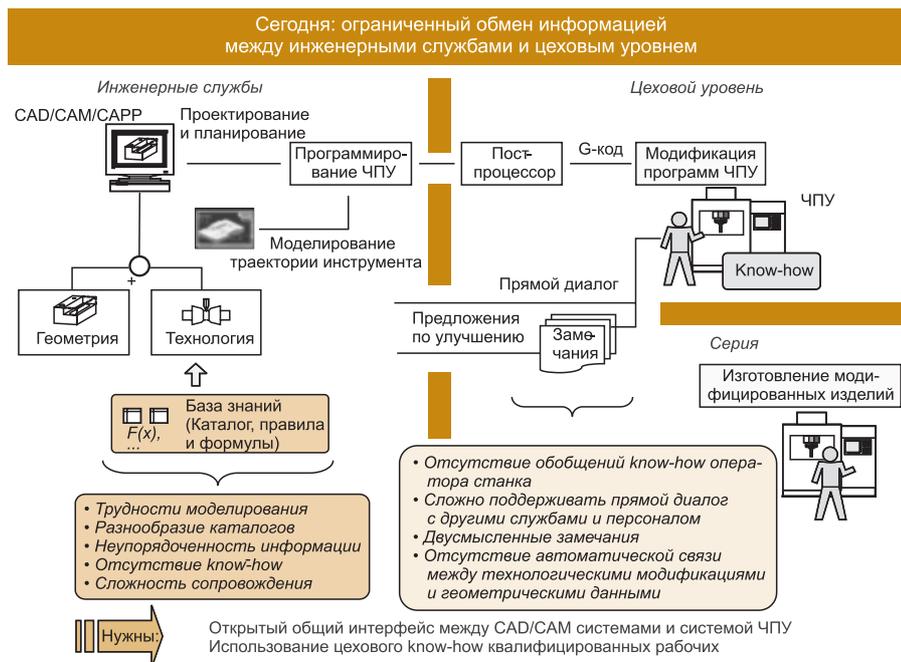


Рис. 11. Структура двустороннего потока информации между инженерными службами и цеховым уровнем

Новые языки программирования, соответствующие стандарту STEP-NC (стандарт ISO 14649), работают с технологическими задачами, привязанными к типовым формам (features).

Все операции, необходимые для перехода от заготовки к готовому изделию, могут быть описаны в терминах технологических задач. В этой связи, на цеховой уровень поступает огромный объем информации. Все модификации цехового уровня могут быть не только сохранены, но и без труда переданы обратно в отделы планирования. Поскольку геометрия и заготовки готового изделия описываются с использованием STEP-синтаксиса, возможен прямой обмен информацией между CAD/CAM/CNC системами. Геометрические данные могут быть непосредственно импортированы в систему ЧПУ, и только технологическая информация должна быть добавлена, чтобы сгенерировать управляющую программу.

Рассматривая структуру системы ЧПУ, ориентированной на использование STEP-NC, следует заметить, что в течение продолжительного времени будут существовать смешанные варианты, способные воспринимать управляющие программы в стандарте ISO 6983. В этот переходный период от ISO 14649 к ISO 6983 и САМ-системы, и системы ЧПУ будут вынуждены поддерживать оба стандарта (рис. 12). Стандарт STEP-NC будет иметь более высокий приоритет.

Представленный прототип системы ЧПУ воспринимает данные из нескольких источников: от CAD-CAM системы, из библиотеки, через графический интерфейс, посредством ручного ввода данных. Комбинации типовых форм и их геометрических описаний в совокупности с технологической информацией порождают шаги операции. Геометрическая модель изделия построена на основе стандарта ISO 10303 AP203. Производственные данные содержат описания типовых форм, технологий и инструмента в стандартах ISO 10303 AP224 и AP214. Эти данные служат базисом для выбора типовых форм и шагов операции, результатом работы которых становится готовое изделие. Последовательность шагов операции определяет специфику рабочего процесса, инициируемого системой ЧПУ.

#### Заключение

В спектре архитектурных решений наиболее уверенные позиции занимает концепция PCNC, при этом по мере роста вычислительной мощности процессоров все чаще предпочтение отдают однокомпьютерному варианту. В качестве ОС стандартом де-факто стала Windows NT с расширением PV [5]. ПЛК реализуют программным путем в рамках единой вычислительной среды для ядра ЧПУ, а терминал системы ЧПУ используют для

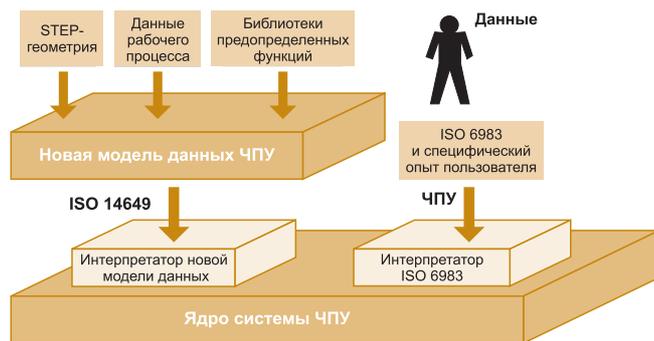


Рис. 12. Смешанная архитектура системы ЧПУ, поддерживающая стандарты ISO 14649 и ISO 6983

программирования электроавтоматики. Периферия систем ЧПУ становится сетевой; причем все чаще единая сеть используется как для приводов подачи, так и для системы управления электроавтоматикой. Наиболее значительная тенденция состоит в развитии идей открытой архитектуры [6], предоставляющей конечному пользователю широкие возможности для реализации собственных функций. Перспективной архитектурой, контуры которой сегодня едва обозначены, можно считать ту, которая сможет удовлетворить всем требованиям стандарта STEP-NC [7].

#### Список литературы

1. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Концепция числового программного управления мехатронными системами: архитектура систем типа PCNC // Мехатроника. 2000. №1.
2. Мартинов Г.М., Сосонкин В.Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: реализация геометрической задачи. // Там же. 2001. №1.
3. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Концепция числового программного управления мехатронными системами: реализация логической задачи // Там же. 2001. №2.
4. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Концепция числового программного управления мехатронными системами: интеграция на основе комплекса производственных стандартов STEP (Standard for the Exchange of Product model data) Информационные технологии в проектировании и производстве. М.: ВИМИ 2003. №2. (См. также [www.ncsystems.ru](http://www.ncsystems.ru)).
5. Мартинов Г.М., Сосонкин В.Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: проблема реального времени // Там же. 2000. №3.
6. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Концепция систем ЧПУ типа PCNC с открытой архитектурой // СТИН. 1998. №5.
7. Weck M., Wolf J. Introduction to STEP-NC, A standard providing data for modern NC machining enabling enhanced functionality. // Laboratory for Machine Tools and Production Engineering Aachen University of Technology. Aachen: 2003, February 12.

**Сосонкин Владимир Лазаревич** — д-р техн. наук, проф.,  
**Мартинов Георгий Мартинов** — д-р техн. наук Московского государственного  
технологического университета "СТАНКИН".

Контактный телефон (095) 972-94-40, факс 972-18-73.  
[Http://www.ncsystems.ru](http://www.ncsystems.ru)