

Современные тенденции в области числового программного управления станочными комплексами

д.т.н. Г. М. Мартинов, к.т.н. Л. И. Мартинова // МГУ «Станкин», г. Москва

По типу архитектуры выделяют пять классов систем числового программного управления (ЧПУ) уровня Hi-End. Первый из них — класс систем CNC — не предусматривает использования персонального компьютера. У второго класса систем PCNC-1 (Personal Computer Numerical Control) компьютер применяют только для решения задачи работы терминала.

Третий класс систем — PCNC-2 — предполагает использование двух компьютеров: на первом располагается ядро системы ЧПУ, работающее в режиме реального времени, а на втором — терминальная часть. К этому классу относят современные системы ЧПУ, обладающие самыми мощными вычислительными ресурсами, такие как SINUMERIK 840D (Siemens), Тур3-osa (Bosch), PA8000 (Power Automation), Andronic 2000 (Andron) (все фирмы из Германии).

Четвертый класс систем — PCNC-3 — реализован на базе компьютера, работающего в режиме реального времени, и имеет вид одноплатного контроллера, встраиваемого в терминальную часть, например, по стандартной шине PCI. К этому классу относят следующие системы ЧПУ: PMAC (Delta Tau) (Великобритания), PNC (Bosch) и MTX (Indramat) (Германия).

Использование Intel-архитектуры предполагает минимальные затраты при переходе систем с предыдущего класса на следующий. Например, с класса PCNC-2 на класс PCNC-3, а также появление системы PNC на базе системы Тур3-osa. Но если компьютер реального времени сделан на базе RISK-архитектуры, например в системах SINUMERIK 840D и PA8000, то переход с системы PCNC-2 на PCNC-3 затруднен в связи с необходимостью создания собственного схемотехнического решения.

Пятый класс систем — PCNC-4 — реализует и ядро системы ЧПУ (работающее в режиме реального времени) и терминальную часть на одном компьютере. Хотя они способны выполнить более 70 % задач, возлагаемых на системы управления, их развитие сдерживает недостаточная для многокоординатной обработки сложных поверхностей вычислительная мощность процессора. Использование интеллектуального контроллера, который будет осуществлять более мелкое дробление временных интервалов и самостоятельное автономное управление — это шаг назад, к

системам четвертого класса. Другим решением может стать использование многоядерных процессоров, в которых задачи реального времени и терминальная размещены в разных ядрах, с перспективой в будущем выделить задачу электроавтоматики в отдельное ядро.

В последние годы появилось еще одно направление — использование системы SoftCNC. Его перспективность обусловлена открытостью программного обеспечения (распространяется на компакт-диске и предполагает использование стандартной PC-аппаратуры) и сложившейся тенденцией использования готовых аппаратных решений.

Анализ современного рынка станочного оборудования с ЧПУ [1] показывает, что системы ЧПУ уровня Hi-End имеют архитектуру классов PCNC-2 или PCNC-3. Уровень Hi-End обусловлен реализацией в системах ЧПУ следующих возможностей.

1. Открытость. Предоставление станкостроителю и конечному пользователю возможности реализации собственных технологий и встраивания прикладного программного обеспечения в систему ЧПУ.

2. Многоканальность. Параллельное выполнение нескольких управляющих программ, используя одну систему ЧПУ. Чаще всего эту функциональность применяют при многошпиндельной обработке или при совместном управлении станком и погрузчиком.

3. Высокоскоростная обработка. Для системы ЧПУ это означает короткий такт интерполяции и высокие скорости обработки кадра управляющей программы.

4. Наноинтерполяция. Интерполяция с дискретностью вычислений, исчисляемой в нанометрах.

5. Алгоритм предсмотра look-ahead. Алгоритм предсмотра кадров, позволяющий обрабатывать контур с максимально возможной подачей и заблаговременно снижать скорость в критической ситуации во избежание непредвиденных осложнений.

6. Сплайновая интерполяция. Реализация алгоритмов кубического сплайна, Акима-сплайна, NURBS-сплайна, полиномов и других интерполяций в комбинации с алгоритмом предсмотра кадров.

7. Компрессия кадров. Сглаживание контура обработки в управляющих программах путем конвертирования линейных кадров в NURBS-контур в процессе отработки управляющих программ.

8. Удаленное управление. Предполагает построение удаленных терминалов оператора и реализацию функций удаленной диагностики и настройки системы ЧПУ.

9. Сетевые функции. Позволяют интегрировать систему ЧПУ в процесс управления производством и оборудованием. Ведется учет произведенной продукции, контролируется время простоя, отслеживаются плановые ремонты и техобслуживание оборудования.

10. Моделирование процесса обработки. 3D-моделирование процесса резания для предварительного просмотра результатов выполнения управляющих программ, выявления неточностей и сокращения времени обработки.

11. Диагностические функции. Логический анализатор (Logic Analyzer) входов (выходов) электроавтоматики, осциллограф для настройки приводов подачи, анализатор частотных диаграмм, тест окружности (Circle Test) по стандарту ISO 230-4 и др.

12. Язык программирования высокого уровня и инструментарий разработки и отладки управляющих программ. Функциональность применяют при разработке стандартных циклов и групповых технологий.

13. Приложения цехового программирования. CAD/CAM системы цехового уровня, позволяющие создавать управляющие программы на самой системе ЧПУ, параллельно с обработкой другой детали. Они, как правило, ориентированы на 2,5D обработку.

14. Применение технологии искусственного интеллекта для адаптивного управления, компенсации динамических ошибок на станке и прогнозирования износа инструмента.

Фирмы-производители систем управления стремятся поставить на рынок не разрозненные компоненты, а комплексные технологические решения «под ключ», которые реализуются во многом благодаря применению перспективных технологий разработки программного обеспечения систем управления (см. рисунок).

Фактическим стандартом разработки ядра систем ЧПУ в настоящее время является язык C++, и только в редких случаях остался язык C. При разработке терминальной части используют языки C++, VB, редко — Delphi и довольно часто — смешанное решение, созданное на базе нескольких языков. В пользовательском интерфейсе, построенном на независимой платформе, прослеживается отход от Java-решений в пользу .NET, а доминирующим языком разработки стал язык C#.

Довольно активно используют компонентный подход COM (Component Object Model), позволяющий маскировать аппаратные особенности при создании программного обеспечения и реализовать распараллеливание процесса разработки [2].



Перспективные технологии разработки

При организации машинных параметров систем управления применяют технологию XML (eXtensible Markup Language), которая позволяет использовать готовый программный инструментарий для работы с данными. При этом для работы с большим числом данных применяют быстродействующие разборщики, такие как MSXML Parser, LibXML (Open Source), или разборщик, встроенный в .NET.

Технологию XSLT используют для генерации отчетов о состоянии машинных параметров или от сигналов проведенных диагностических измерений и настройках привода. С помощью XSLT также осуществляют конвертирование данных с одного формата в другой.

Web-технологии используют для построения удаленных терминалов систем управления. При этом с помощью скрипта и встроенного Internet-сервера в ядре генерируют экраны пользовательского интерфейса в стандартных браузерах.

Применение регулярных выражений в системах управления позволяет унифицировать решение таких задач, как проверка на корректность и фильтрация пользовательского ввода значения, автоматическая генерация имен, поиск с использованием wildcards [3].

С помощью нечеткой логики и нейронных сетей сегодня решают задачи адаптивного управления и прогнозирования надежности инструмента.

Системы ЧПУ уровня Hi-End от мировых лидеров

Развитие этих систем, характерное, в частности, лидеру в области ЧПУ фирме FANUC (Япония), направлено на все более широкое применение функций

искусственного интеллекта, которые позиционируют как «умные решения». Эти решения, в первую очередь, направлены на повышение точности обработки заготовок. Так «умная» прецизионная система контурного и наноконтурного управления реализует управление разгоном и торможением, которое осуществляется при предварительном считывании 40 блоков данных в режиме контурного управления и 180 блоков в режиме наноконтурного управления, что обеспечивает высокоскоростную прецизионную обработку.

При управлении разгоном и торможением с использованием RISC-карты предварительно считывается до 600 блоков программных данных. Это обеспечивает высокоскоростную прецизионную обработку вследствие поддержания высокой стабильной скорости подачи даже для программ обработки, состоящих из сверхмелких линейных сегментов. Для получения деталей с высокой степенью чистоты поверхности, при которой финишная обработка практически не требуется, программа контурной обработки может быть дополнена функцией наноинтерполяции.

«Умная» система компенсации температурной деформации осуществляет поправку на температурную деформацию шпинделя по оси Z (уровень точности поправки зависит от конкретных рабочих условий).

На базе элементов искусственного интеллекта построена система автоматического контроля состояния (износа) инструмента — система регулирования жизненного цикла инструмента — она следит за длительностью и частотой эксплуатации и автоматически заменяет его в случае превышения эксплуатационных параметров. Встроенная система учета износа инструмента определяет его фактическую нагрузку посредством соответствующей нагрузки на сервопривод шпинделя, что позволяет оптимизировать срок службы этого инструмента.

Большую эффективность перечисленных «умных» решений обеспечивает параллельное использование системы компенсации ударных и вибрационных возмущений, которая осуществляет автоматическое управление подачей при обработке углов, когда особо проявляются ударные возмущения.

В системах FANUC применено удачное сочетание новейшей технологии HRV в области систем цифрового управления сервоприводом шпинделя и функции виртуального предварительного прогона цикла обработки, что позволяет снизить ошибку запаздывания сервопривода и обеспечивает максимально точное управление траекторией режущего инструмента.

Системы ЧПУ FANUC серии 30i/31i/32i-MODEL A осуществляют управление десятью каналами, 32 осями и восемью шпинделями. Максимальное число интерполируемых осей 24.

Флагманская система SINUMERIK 840D/Di sl (Solution Line), лидера в области промышленной ав-

томатизации фирмы Siemens, имеет расширенную открытую архитектуру, оснащена функциональностями сплайн-интерполяции и компрессии кадров, располагает системами поддержки цехового программирования ShopMill и ShopTurn, позволяющими осуществлять симуляцию процесса обработки на станке. Кроме того, она дополнена утилитой пуско-наладки для начального этапа работы и системой Motion Control Information System, предназначенной для координации планирования, размещения, исполнения, сокращения подготовительно-заключительного времени, сокращения простоев, упрощения анализа неполадок и обеспечивающей оптимальную интеграцию станка в систему электронной обработки данных.

В системах ЧПУ 840D/Di sl число управляемых осей достигает 64.

Системы ЧПУ фирмы Heidenhain (Германия) ориентированы на поддержку технологического процесса, чему служит мощный набор станочных циклов и инструментарий CicleDesign для их разработки.

Функция предосмотра Expanded look-ahead с буфером до 1024 кадров своевременно распознает изменения в направлении движения инструмента для последующей коррекции разгона и торможения. Функция адаптивного управления подачей AFC (Advanced Feed Control) регулирует контурную скорость перемещения по траектории в зависимости от используемого процента мощности шпинделя. С помощью утилит DriveDiag, TNCopt диагностируют составные элементы приводов и инициализируют цифровые контуры регулирования.

Системы ЧПУ Heidenhain позволяют значительно расширить возможности станочных комплексов посредством: инструментария удаленной диагностики, контроля и управления системой ЧПУ (TeleService); утилиты передачи данных между ЧПУ и ПК (TNCremoPlus); комплекта средств разработки (RemoToolSDK) на базе COM и ActiveX-технологии для доступа к ядру системы ЧПУ; компоненты управления виртуальными станками (VirtualTNC), используемыми для моделирования работы станков; 3D-функции мониторинга столкновения и выявления неточностей при отработке управляющей программы DCM (Dynamic Collision Monitoring) на станке.

ЧПУ Heidenhain уровня Hi-End серии iTNC-530, ориентированная на обработку поверхностей свободной формы, позволяет управлять 13-ю осями при времени обработки кадра до 0,5 мс. В ней предоставляется опция использования системы ЧПУ с двумя процессорами и операционной системой WindowsXP.

Наиболее распространенная система ЧПУ MTX Advanced фирмы Bosch Rexroth имеет 64 управляемые оси, 12 каналов управления (и до 8 интерполируемых осей в канале); оснащена функциональностью вычисления и интерполяции с нанометрической

точностью (Nanometer resolution); функциональностью IndraWorks view 3D трехмерной визуализации процесса обработки управляющей программы и выявления изменений; функциональностью IndraWorks machine simulator симуляции периферии станка, подключенную по шине PROFIBUS.

Система имеет масштабируемую коммуникационную платформу, обеспечивающую доступ к открытой архитектуре системы; использует Паскаль-образный CPL (Custom Programming Language) язык программирования высокого уровня и снабжена инструментарием разработки и отладки управляющих программ на этом языке. Удобный инструмент анализа временных циклов в системе управления Cycle time analyzer, осуществляет запись потока команд ЧПУ, событий с ПЛС, сигналов с приводов и сигналов с периферии станка; результаты представляются в виде графической временной диаграммы.

Система ЧПУ CNC 8070 позиционирует как Hi-End модель фирмы FAGOR. Она реализует интерполяцию с нанометрической точностью, высокую скорость обработки кадра и команд PLC, предназначена, в том числе, и для высокоскоростной обработки на токарных и фрезерных станках. Применение постинтерполяционных фильтров позволяет получать поверхности любой геометрии, чистоты и точности. Специальные алгоритмы для высокоскоростной обработки оптимизируют обработку для получения максимальной скорости, обеспечивают гладкий контур и наилучшую чистоту обработки.

Система обладает открытой архитектурой, совместимой с персональным компьютером и интерфейсом оператора на базе Windows XP, что позволяет полностью настраивать и адаптировать пользовательский интерфейс под конкретные технологические задачи. Обеспечивает управление до 28 интерполируемых осей и соответственно до четырех шпинделей, инструментальных магазинов и каналов выполнения. Позволяет объединять несколько систем ЧПУ 8070 в сложные комплексы на базе Ethernet.

Система оснащена: языком программирования высокого уровня; сплайн-интерполятором (Spline, ASPLINE); редактором стандартных циклов (Cycle Editor); системой трехмерной симуляции управляющей программы (Solid graphics simulation); функцией удаленной диагностики (теледиагностики) для профилактического обслуживания оборудования; функцией оценки времени обработки (Execution time estimation); инструментарием настройки и запуска в эксплуатацию с функциями осциллографа, body-программы, теста окружности, логического анализатора.

Двухкомпьютерная модель M750 фирмы Mitsubishi (Япония) создана на базе компьютера с RISC-процессором (для задач реального времени) и интерфейсного компьютера с операционной системой Windows XP,

связанных по Ethernet. Система поддерживает технологию наноуправления — функция Complete Nano Control с дискретностью выполняемых интерполяционных расчетов 1 нм и обеспечивает высокоскоростную обработку. В зависимости от конкретной модификации она реализует до четырех каналов управления и использует до 16 управляемых осей, восемь из которых одновременно интерполируемые. Сервоприводы управляются по высокоскоростной оптической сети. Система обеспечивает обработку до 151 000 кадров в минуту при чистовых технологических операциях. Платформа iQ Platform, основанная на гигабитном Ethernet, позволяет объединять в единую систему управления отдельные контроллеры, выступая в качестве интегрирующей внутренней шины.

Функция управления качеством SSS-control (Super Smooth Surface) и обеспечения постоянства обработки независимо от геометрии формы реализована на базе алгоритмов: оптимизации разгона и торможения; компенсации люфта и неравномерности ходового винта; сплайновой интерполяции (кубический сплайн и NURBS); автоматического распознавания углов.

Функция OMR-control (Optimum Machine Response) осуществляет: коррекцию ошибок, связанных с деформацией координаты; синхронизацию движения сервопривода и шпинделя путем учета сетевой задержки команд; минимизацию влияния вибраций.

Функция предотвращения столкновений в процессе обработки (5 Axis Machining Control) учитывает модель станка, относительное положение детали и траекторию движения инструмента. В случае выявления опасности столкновения привод останавливается, а в 3D-модели подсвечивается предполагаемое место.

Система оснащена: функцией расчета времени цикла без запуска станка (Machining time calculation); инструментарием (NC Configurator) настройки машинных параметров системы ЧПУ, параметров инструментов и глобальных переменных; пакетом создания экранов пользовательского интерфейса (NC-Designer); удаленным терминалом (NC Monitor) на PC, позволяющим управлять системой ЧПУ через Ethernet; инструментарием создания фрезерных и токарных управляющих программ (NAVI MILL, NAVI LATHE) на программной PC-станции.

Автоматическая настройка приводов ЧПУ посредством MS Configurator, предполагает построение body-диаграмм, настройку петли замыкания по скорости и ускорению, настройку фильтра резонансных частот, построение теста окружности и осциллограммы сигналов сервоприводов. Подключение к системе ЧПУ через Ethernet и передачу технологических программ осуществляет NC-Explorer. Решение Factory Automation Solution осуществляет интеграцию в сетях цехового уровня, а также в MES (Manufacturing Execution System)-системе планирования производ-

ства и в ERP (Enterprise Resource Planning System)-системе планирования ресурсов предприятия.

Несмотря на отсутствие отечественных систем ЧПУ уровня Hi-End, у российских производителей, в последнее время явно прослеживается стремление вывести разработки на современный уровень. Успешность в значительной степени будет зависеть от правильности выбора архитектурной концепции и используемых технологий.

Российские разработчики «Балт-Систем» и «Модмаш-Софт» жестко конкурируют на рынке недорогих универсальных систем. Системы FlexNC (ООО «Станкоцентр») и IntNC (НТЦ «ИНЕЛСИ») построены на базе контроллера движения (motion control) DeltaTau [4], что не позволяет осуществлять контроль над функциями ядра.

Система ЧПУ WinPCNC [5] (МГТУ «Станкин»), реализует полный набор сплайновой интерполяции (кубический, Akima и NURBS-сплайны), но отсутствие многоканальности ограничивает возможности ее применения.

В заключение отметим, что ценовой диапазон импортных систем ЧПУ уровня Hi-End начинается от 15 000 € при минимальной базовой конфигурации и может достигать 40 000—70 000 € в зависимости от конкретной конфигурации, при этом стоимость приводов не входит в эту сумму. Такая цена неудивительна, если учесть, что средний европейский производитель систем управления располагает отделом разработки численностью 70 человек и инвестирует в систему ЧПУ каждый год 300 человеко-лет, включая результаты работ смежных отделов и соисполнителей.

Большинство из рассмотренных систем эволюционируют более 10—15 лет, что и определяет полноту предлагаемых на рынке решений.

Успешность создания отечественной системы уровня Hi-End определяется: 1) правильностью разработки архитектурной концепции; 2) удачным выбором технологии разработки. Задача такого масштаба выходит за рамки одной компании и может быть решена только в рамках совместных проектов с привлечением ученых передовых университетов и высококвалифицированных технических специалистов промышленности.

Работа выполнена по Госконтракту № 02.740.11.0488 на проведение НИР в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы.

Список литературы

1. **Мartiнов Г. М., Martинова Л. И.** Анализ систем ЧПУ, представленных на международной выставке «Металлообработка-Технофорум-2009», их новизна и особенности // Автоматизация в промышленности. — 2009. — № 12. — С. 19—24.
2. **Сосонкин В. Л., Martинов Г. М.** Системы числового программного управления: Учеб. пособие. — М.: Логос, 2005. — 296 с.
3. **Мartiнов Г. М., Сосонкин В. Л.** Перспективные технологии разработки математического обеспечения систем управления: использование регулярных выражений // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2006. — № 2. — С. 40—46.
4. **Красильникьянц Е. В., Бурков А. П., Иванков В. А.** Применение контроллеров движения для систем управления электромеханическими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2008. — № 2. — С. 45—50.
5. **Мartiнов Г. М.** Университетская система ЧПУ WinPCNC для обучения и производства // Стружка. — 2008. — № 1. — С. 29—30.

РОБОТОТЕХНИКА

Метод формирования статорных токов при моделировании вентильного электропривода в составе технологического робота

к.т.н. А. Г. Андреев, к.т.н. М. М. Стебулянин // МГТУ «Станкин», г. Москва

При построении электроприводов современных технологических роботов широкое применение находят вентильные машины малой и средней мощности, что прежде всего объясняется их высокими регулировочными характеристиками и глубоким динамическим диапазоном, а также большой перегрузочной

способностью по моменту. Эти свойства позволяют удовлетворить повышенные требования к качеству переходных процессов и запасам устойчивости движения, предъявляемым к приводам роботов, выполняющих технологические операции в промышленном производстве.