



РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДИАГНОСТИКИ И НАСТРОЙКИ СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

С.Н. Григорьев, Г.М. Мартинов, С.В. Соколов, Н.В. Козак (ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»)

Представлен подход для создания инструментария диагностики и настройки следящих приводов, позволяющий собирать и анализировать данные от оборудования различных производителей с разными промышленными протоколами связи. Рассмотрены особенности практического применения инструментария диагностики и настройки на примере фрезерного станка с приводами, управляемыми по протоколам SERCOS III и EtherCAT. Представлены результаты обработки тестовой детали¹.

Ключевые слова: диагностика приводов, измерение параметров движения, настройка системы ЧПУ, модель сбора данных, мультипротокольная система, управление в гетерогенном окружении.

Введение

В процессе создания опытных образцов станков, модернизации, разработки специальных модификаций или при ретрофитинге в составе исходной системы оставляют часть ранее установленных компонентов, заменяя которые нерационально [1, 2]. В этом случае система ЧПУ должна иметь возможность мультипротокольного управления. Возникающая при этом проблема настройки разнородного оборудования так же

требует решения. Современные следящие приводы обычно имеют встроенные механизмы записи и анализа диагностических данных, но они предназначены для оборудования одного производителя и не могут быть использованы для анализа в составе гетерогенной системы. Одна из сложнейших задач заключается в настройке и синхронной интерполяции следящих приводов, управляемых по разным полевым шинам для обеспечения технологической точности станка.

Производители технологического оборудования поставляют собственные программные инструменты для диагностики и настройки следящих приводов и удаленных модулей ввода/вывода электроавтоматики, такие как цифровой осциллограф или логический анализатор, которые могут быть использованы только с оборудованием этого производителя [3, 4]. На станках с мультипротокольным управлением [5] и разнородными исполнительными устройствами эти программные комплексы не применимы для настройки совместной работы нескольких устройств, управляемых по разным протоколам.

Использование в процессе пуско-наладки станков внешних контрольно-измерительных приборов (осциллографов, булбаров, лазерных интерферометров и трекеров движения) дает возможность оценить параметры работы отдельных частей технологической системы [6]. В то же время эти приборы не дают возможность сопоставить полученные данные с внутренними данными системы ЧПУ, что бывает критически важно в процессе разработки и отладки алгоритмов и принципов управления.



Рис. 1. Архитектурная модель инструментария диагностики и настройки параметров

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (№ 2.1237.2017/ПЧ).

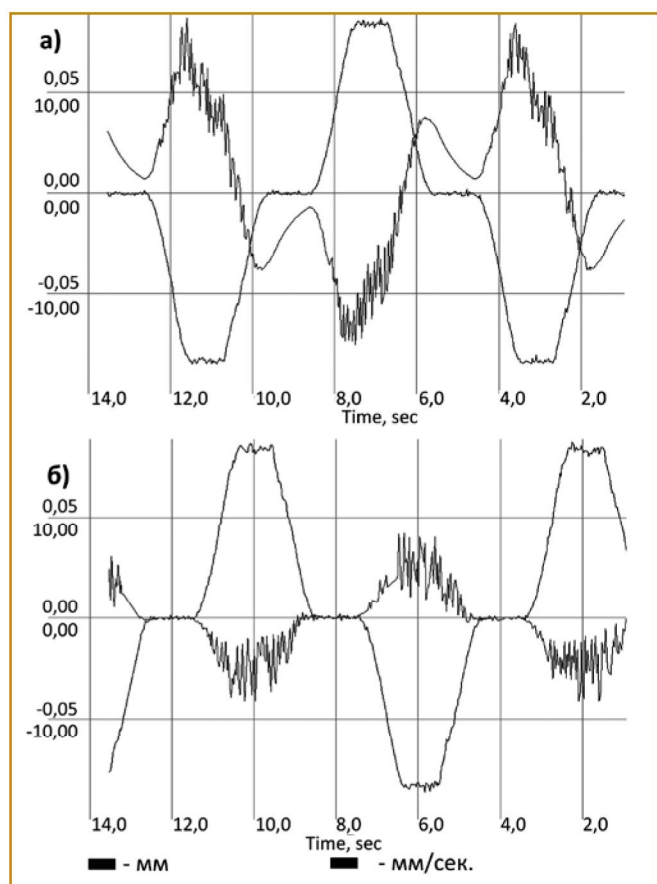


Рис. 2. Режим непрерывного отображения сигналов
 а) неоптимальные настройки контура положения;
 б) реакция на настройку контура положения

Следовательно, со стороны системы ЧПУ необходима поддержка мультипротокольного управления и возможности настройки и отладки разнородного оборудования в составе станка. Рассмотрим систему настройки и синхронизации привода шпинделя, работающего по протоколу SERCOS III, и приводов подачи EtherCAT на четырехкоординатном фрезерном станке.

Архитектурная модель системы сбора данных

Ядро системы ЧПУ обладает необходимой информацией о состоянии и параметрах движения следящего привода для диагностики и настройки параметров контуров регулирования. Если для анализа необходимы дополнительные данные привода, не относящиеся к управлению движением, они могут быть добавлены в списки параметров циклического обмена между приводом и ядром системы ЧПУ [7, 8]. Промышленные протоколы, например SERCOS III, имеют специальные механизмы передачи значений дополнительных списков параметров в циклических данных. Они могут добавляться налету во время работы без необходимости переводить устройство в режим параметризации.

Для сконфигурированных пользователем точек измерения реализован механизм, позволяющий регистрировать в реальном времени значения практически любой области памяти SoftPLC контроллера и ядра системы ЧПУ (рис. 1). Это предоставляет раз-

работчику системы ЧПУ мощный инструмент поддержки разработки и отладки взаимодействия между различными модулями ядра системы управления.

Сбор данных измерения в диагностической подсистеме происходит в контексте главного потока ядра ЧПУ. Работа в режиме жесткого реального времени накладывает соответствующие ограничения на применяемые на этом уровне программные и архитектурные решения.

Для предотвращения негативных эффектов блокировки потоков запись значений производится в переключаемый двойной буфер, представляющий собой два массива точек измерения. На каждом такте ядра ЧПУ один из массивов используется для записи новых значений точек сигналов, а другой в это время должен быть считан и сохранен менее приоритетным потоком, обслуживающим хранилище измерения.

Все действия по обслуживанию измерения производятся в потоке жесткого реального времени не зависимо от того, запущено ли в данный момент измерение. Это позволяет избежать скачков вычислительной нагрузки в главном потоке ядра ЧПУ. Управление измерением: запуск, остановка, формирование и отсылка данных в пользовательские приложения диагностики осуществляются в программных компонентах хранилища измерения, функционирующих в режиме мягкого реального времени.

Применение описанных методик при создании программного ядра диагностической подсистемы увеличило вычислительную нагрузку на главный поток ЧПУ на 3...5% в зависимости от используемой аппаратной платформы.

В программных компонентах хранилища данных измерения сигналы накапливаются в буфере, длина которого может быть настроена в пределах 10...100 МБ, позволяя непрерывно записывать довольно большой временной интервал работы системы ЧПУ (вплоть до 10 мин при движении только одной оси) с частотой дискретизации 1 мс. Для каждой из осей системы ЧПУ сохраняются около 30 сигналов и до 128 конфигурируемых пользователем точек измерения.

Применение инструментария диагностики и настройки для станка Quaser 184P

Опытный образец фрезерного обрабатывающего центра Quaser является гетерогенной технологической системой. Сам станок изготавливается по лицензии, отдельные его компоненты, включая систему управления, локализируются и заменяются отечественными.

Некоторое оборудование станка, например, двигатель и сервопривод фрезерного шпинделя с протоколом SERCOS III [10, 11], линейные измерительные системы с протоколом EnDat 2.2 и механизм смены инструмента на данном этапе локализации заменить без глубокой модернизации не представляется возможным. Используемая в проекте мультипротокольная система ЧПУ «АксиОМА Контроль» поддерживает одновременное управление исполнительными устрой-

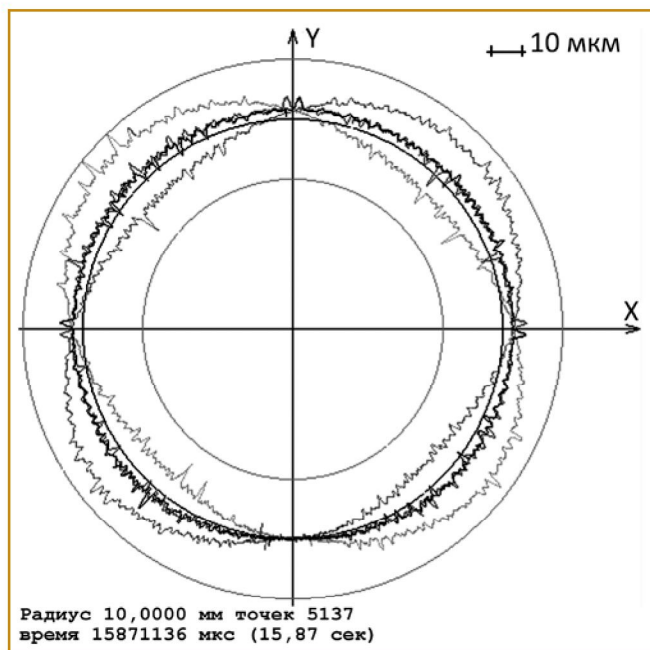


Рис. 3. Инструмент теста окружности – компенсация динамического рассогласования приводов

ствами по разным промышленным шинам. На основе конфигурации машинных параметров система ЧПУ управляет шпинделем по протоколу SERCOS III, а следящими приводами подачи — по протоколу EtherCAT с тактом интерполяции 1 мс. Это обеспечивает выполнение технологических операций, использующих управление приводами по обоим протоколам одновременно. Например, нарезание резьбы метчиком (без компенсационного патрона) или резцом, когда шпиндель переключается в режим круговой оси и интерполируется совместно с приводами подачи.

На основе предложенного инструментария диагностики и настройки разработаны программные приложения «Цифровой осциллограф» и «Тест окружности» для ускорения процесса пуско-наладки станков с системой ЧПУ.

Приложение «Цифровой осциллограф» измеряет и визуализирует значения сигналов во времени для анализа протекания переходных процессов в приводной системе. Благодаря тому, что регистрация данных величин производится в ядре системы ЧПУ, для анализа доступны не только управляющие воздействия и текущие координаты привода, но и внутренние величины системы ЧПУ, используемые при расчете алгоритма управления движением.

Приложение предоставляет функциональность масштабирования, курсоры для просмотра точных значений измеренных сигналов, возможность объединения сигналов позиции нескольких осей для визуализации траектории движения в пространстве.

Кроме основного режима работы, подразумевающего запись значений сигналов на определенном временном отрезке и последующий их анализ, «Цифровой осциллограф» позволяет оценивать реакцию системы на изменение параметров процесса управле-

ния в режиме непрерывного отображения значений. Измеренные данные при этом собираются с меньшей частотой дискретизации, чем в режиме записи измерения, число отображаемых сигналов также ограничено. Внутри ядра системы ЧПУ регистрируются только значения выбранных для отображения параметров. Собранные данные объединяются в небольшие пакеты общей длительностью до 100 мс и отправляются в пользовательское приложение, что позволяет снизить трафик канала связи между ядром системы ЧПУ и терминалом. Для диагностического приложения подобная задержка не является критической и никак не влияет на восприятие информации оператором.

На рис. 2 (а, б) продемонстрировано использование цифрового осциллографа в режиме непрерывного отображения сигналов для настройки пропорционального коэффициента регулятора контура положения SERCOS III привода фрезерного шпинделя для использования его в режиме позиционно-управления, например, в процессе выполнения измерительных циклов. Рассогласование между командным и текущим положением оси уменьшилось в 2...3 раза в процессе настройки параметра.

Тест окружности регламентируется стандартом ГОСТ ISO 230-4 и применяется при настройке приводов с целью минимизации контурной ошибки движения осей по окружности и путем выравнивания их динамических характеристик. Приложение «Тест окружности» инструментария диагностики использует тот же способ записи сигналов в ядре системы управления, что и «Цифровой осциллограф», но реализует свои специфические алгоритмы для анализа и представления данных.

Для проведения теста окружности используется управляющая программа системы ЧПУ, осуществляющая вход и выход из траектории, движение по окружности заданного радиуса, а также запуск и останов процесса измерения путем активации триггеров. Приложение «Тест окружности» предоставляет следующие возможности анализа круговых диаграмм: масштабирование представления ошибки, фильтрация диаграмм для сглаживания шумов, автоматическое определение направления движения по/против часовой стрелки, сохранение и загрузку результатов измерения, механизмы сравнения нескольких диаграмм для оценки влияния изменения настроек на характер происходящих процессов. Отметим, что в отличие от использования внешних измерительных приборов, предлагаемый инструментарий позволяет проанализировать не только качество реального позиционирования осей, но и генерируемую интерполятором траекторию движения, что предоставляет разработчику системы ЧПУ важную обратную связь при реализации в системе новых алгоритмов управления движением [11, 12].

На рис. 3 показан пример использования приложения «Теста окружности» в процессе настройки пары линейных осей X и Y крестового стола станка с приводами по протоколу EtherCAT. В плоскости XY

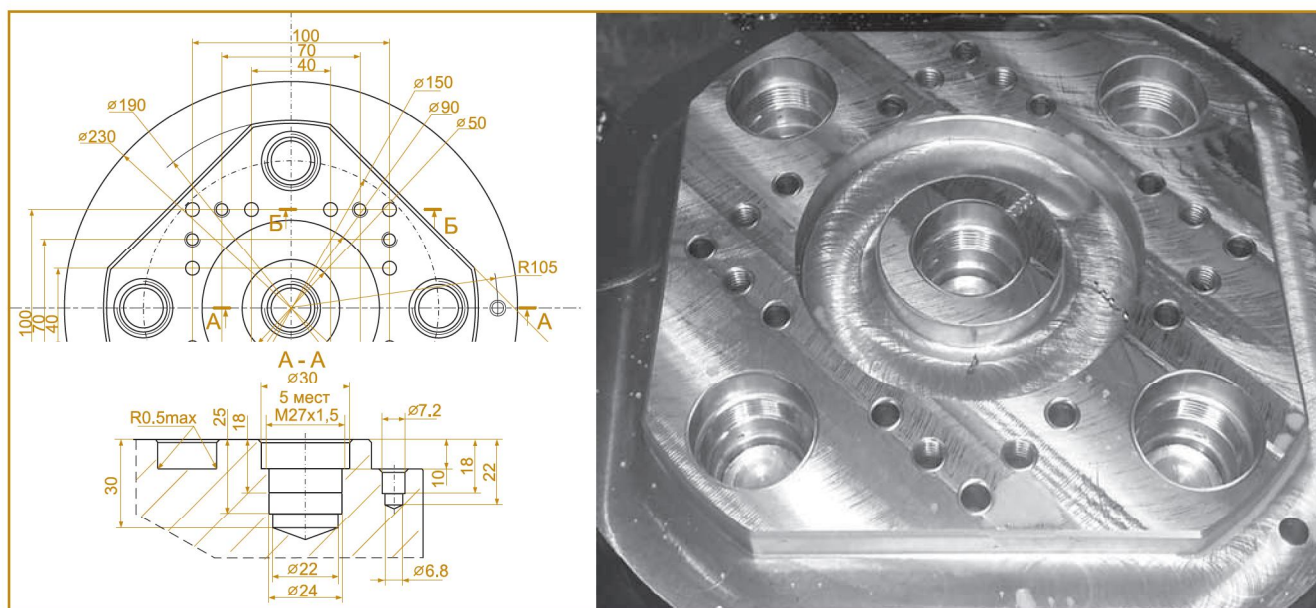


Рис. 4. Исходные данные и внешний вид тестовой детали для проверки настройки сервоприводов

совершались круговые движения радиусом 10 мм с подачей 1000 мм/мин. Ось Y данного станка является более нагруженной, так как несет на себе массу стола и механической системы оси X. При начальном измерении (показано на диаграмме полупрозрачными линиями) была выявлена динамическая ошибка отработки контура вплоть до 10 мкм, связанная с недостаточностью динамической отзывчивости привода оси Y. После дополнительного увеличения коэффициентов контуров скорости и тока в приводе динамические характеристики осей были выровнены, и ошибка вдоль траектории уменьшилась до 2 мкм.

Проведение испытаний и обработка тестовой детали на станке Quaser 184P, анализ результатов

Для проверки корректности настройки сервоприводов осей подач и шпинделя фрезерного обрабатывающего центра Quaser MV184P была проделана обработка тестовой детали, содержащей все основные технологические операции. Обработка тестовой детали позволяет сделать вывод о правильности настройки каждого сервопривода и их синхронной работе (рис. 4).

Для изготовления подобной детали выполняется большое число технологических операций, включая: фрезерование по контуру (как линейному, так и по окружности), обработку плоской поверхности, точение канавки, а также операции сверления и растачивания отверстий. Наиболее сложной из них являются операция нарезания резьбы, требующая синхронизации вращения шпинделя и перемещения линейных осей, которые в данном обрабатывающем центре управляются по разным протоколам связи. Нарезание резьбы метчиком на данном станке реали-

зовано посредством синхронизации вращения шпинделя, работающего в режиме круговой интерполируемой оси, и движения вертикальной оси Z. Нарезание резьбы больших диаметров выполняется специальным инструментом, требующим синхронизации движения всех осей, включая линейные оси X и Y.

Система ЧПУ «АксиОМА Контрол» поддерживает набор специальных циклов в управляющих программах для реализации всех перечисленных технологических операций. Для проверки достоверности полученных результатов были проведены метрологические измерения обработанной тестовой детали (рис. 4) в лаборатории и сравнение соответствия ее размеров заданным нормам и отклонениям (таблица).

Таким образом, настройка гетерогенного оборудования от различных производителей, установленного на фрезерном обрабатывающем центре Quaser MV184P, была выполнена корректно. Результаты проделанных испытаний и измерений подтверждают целесообразность применения предлагаемого в работе подхода, позволяющего производить сбор и анализ данных от различного технологического оборудования.

Таблица. Результаты измерения тестовой детали

Тип отклонения	Номинальный размер, мм	Допустимое отклонение, мкм	Результат измерения, мм
Отклонение от круга	Ш 150	± 10	150,006
	Ш 90	± 12	90,011
	Ш 30	± 10	30,010
	Ш 27	± 10	27,009
	Ш 8	± 10	8,006
Линейный размер между центрами отверстий	40 (ось X)	± 9	39,995...40,007
	100 (ось X)	± 12	99,991...100,008
	40 (ось Y)	± 9	39,993...40,002
	100 (ось Y)	± 12	99,994...100,003
Шаг резьбы	1,5	± 7	1,498...1,505
	1,25	± 5	1,248...1,252

Заключение

Формализация базовых понятий инструментария диагностики и настройки сервоприводов, правильно выбранная структура программного обеспечения и открытость, заложенная в архитектуру системы ЧПУ, позволяют создавать программные решения, непривязанные к конкретным производителям технологического оборудования. С помощью такого инструментария возможна настройка параметров узлов станка по отдельности, а также отладка их совместной работы. Применение инструментария для диагностики и измерений параметров движения следящих приводов в гетерогенных системах управления не исключает использования внешних инструментов для окончательной настройки параметров системы управления для станка.

Список литературы

1. Григорьев С.Н., Мартинов Г.М. Управление и диагностика цифровых приводов станков с ЧПУ // Контроль. Диагностика. 2012. №12. С. 54-60.
2. Martinov GM, Martinova LI. Trends in the numerical control of machine-tool systems // Russian Engineering Research. 2010. №30(10). pp. 1041-1045.
3. Martinov GM, Obuhov AI, Martinova LI, Grigoriev AS. An Approach to Building Specialized CNC Systems for Non-traditional Processes // Procedia CIRP. 2014. №14. pp. 511-516.
4. Martinov GM, Lyubimov AB, Bondarenko AI, Sorokoumov AE, Kovalev IA. An Approach to Building a Multiprotocol CNC System // Automation and remote control. 2015. № 72(10). pp. 345-351.
5. Grigoriev S.N, Martinov G.M. Scalable Open Cross-Platform Kernel of PCNC System for Multi-Axis Machine Tool // Procedia CIRP. 2012. №1. pp. 238-243.
6. Grigoriev S.N, Martinov G.M. Research and Development of a Cross-platform CNC Kernel for Multi-axis Machine Tool // Procedia CIRP. 2014. № 14. pp. 517-522.
7. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. Формирование базовой вычислительной платформы ЧПУ для построения специализированных систем управления // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. №1(24). с. 92-97.
8. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Никишечкин П.А. Специфика построения редактора управляющих программ электроавтоматики стандарта МЭК 61131 // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 4 (31). С. 127-132.
9. Martinov GM., Kozak NV. Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMA control system // Russian Engineering Research. 2015. №35(7). pp. 534-538.
10. Martinov GM, Nezhmetdinov RA. Modular design of specialized numerical control systems for inclined machining centers // Russian Engineering Research. 2015. №35(5). pp. 389-393.
11. Martinova L.I., Pushkov R.L., Kozak N.V., Trofimov E.S. Solution to the problems of axle synchronization and exact positioning in a numerical control system // Automation and Remote Control. 2014. №75(1). pp. 129-138.
12. Григорьев А.С. Инструментарий системы ЧПУ для диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени при токарной обработке // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. №1. С. 74-79.

Григорьев Сергей Николаевич – д-р техн. наук, ректор, **Мартинов Георгий Мартинович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, **Соколов Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, **Козак Николай Владимирович** – канд. техн. наук, доцент **ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»**.
Контактный телефон (499)972-94-40.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Л.И. Мартинова, А.В. Стась, А.С. Григорьев, М.С. Бабин (ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»)

Определены задачи автоматизированного контроля, выполняемого на станках с ЧПУ. Выявлена структура формирования размерных связей при переходе от системы координат станка к системе координат детали. Представлены математические модели и алгоритмы циклов для автоматического контроля положения заготовок на станке. Продемонстрировано использование результатов цикла в управляющей программе¹.

Ключевые слова: система ЧПУ, операционный контроль, измерительные циклы, контроль положения заготовок, геометрические параметры детали.

Обеспечение точности обработки является первоочередной задачей механообрабатывающих комплексов. Современное производство, ориентированное на использование малолюдных и безлюдных технологий, организуется на базе цифровой инфраструктуры, позволяющей в автоматическом режиме выполнять большой комплекс задач, в том числе и задачи измерений, контроля точности, а также внесения коррекций в работу технологического оборудования [1]. При обработке заготовок на станках с ЧПУ возникает ряд погрешностей, связанных с работой технологического комплекса и спецификой систем ЧПУ. В условиях автоматизиро-

ванного выполнения технологических процессов актуальным становится превентивное выявление причин формирования погрешностей обработки и принятие решений по их исключению или сокращению [2]. Оборудование с ЧПУ позволяет частично или полностью автоматизировать процесс контроля, а также сократить влияние ряда погрешностей за счет использования методов и механизмов компенсации геометрических, кинематических и других отклонений [3, 4].

Основные виды контроля, выполняемого на станках с ЧПУ (рис. 1), связаны с такими задачами, как: 1) калибровка измерительного устройства; 2) контроль

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (№ 2.1237.2017/ПЧ).