

Применение инструментария компенсаций погрешностей для повышения точности обработки на вертикально-фрезерных станках с ЧПУ*

д.т.н. Г. М. Мартинов, к.т.н. А. И. Обухов, к.т.н. Н. В. Козак

// ФГБОУ ВО «МГУ «СТАНКИН», г. Москва. E-mail: kozak@ncsystems.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы обеспечения нормативной погрешности обработки на металлорежущих станках (МС), возникающие в процессе ввода в эксплуатацию системы ЧПУ. Представлен механизм повышения точности управления движением на основе предложенной структуры модулей в ядре системы ЧПУ. Представлены результаты применения разработанного механизма при интеграции системы ЧПУ "АксиОМА Контроль" со станком серии Quaser MV184 производства ОАО «КЭМЗ». **Ключевые слова:** система ЧПУ, управление движением, интерполяция, погрешность обработки, табличные компенсации, ограничение рывка, отклонение от контура.

Abstract. The paper discusses problems of holding down processing errors in normative limits for metal-cutting machine. Such errors appear during the commissioning of a complete CNC system. A mechanism for improving the accuracy of motion control based on the proposed structure of modules in the core of the CNC system was offered. The results of using the developed mechanism for the integration of the control system AxiOMA Control with a machine of the Quaser MV184 series produced by «KEMZ» Ltd. are presented. **Keywords:** CNC system, motion control, interpolation, processing error, compensation's table, jerk limitation, deviation from contour.

Проблемы обеспечения нормативной точности обработки при вводе в эксплуатацию станочного оборудования с ЧПУ. Развитие аппаратных средств вычислительной техники на текущий момент помогло устранить ряд проблем, стоявших долгое время перед разработчиками программного обеспечения систем ЧПУ [1]. Прежде для обеспечения субмикронной точности вычисления командных сигналов нужно было идти на ряд усложнений алгоритмов управления. В частности, для разных видов контуров применяли узкоспециализированные алгоритмы расчета профилей разгона и торможения. Ресурсы современной аппаратной базы позволяют серьезно упростить задачу формирования сигналов управления приводами (серво-усилителями), используя линеаризацию контура и конвейерную обработку элементарных сегментов траектории [2]. Такой подход реализован в системе ЧПУ «АксиОМАКонтроль» [3 и 4].

Проблема генерации «идеальных» сигналов положений и скоростей решена даже для точностей

порядка нанометра. В настоящее время не достаточно передавать приводам только расчетные командные значения, чтобы обеспечить высокую фактическую точность обработки изделий на станке. Погрешности изготовления и сборки механики МС, изменения условий окружающей среды, энергетические ограничения мощности приводов и инерционность их контуров обратной связи — определяющие факторы для достижения точности обработки.

При разработке мер по повышению точности МС с ЧПУ выделены два этапа работ.

1. Обеспечение статической точности позиционирования.
2. Повышение динамической точности движения по контуру.

Статическая точность определяет погрешность достижения режущим инструментом (РИ) заданных координат в установившемся режиме. Допустимая погрешность в статике — необходимое условие для успеха дальнейших работ по оптимизации характеристик движения по контуру.

Статическую ошибку позиционирования определяют точностью изготовления и взаимного положения механических частей станка, реализующих движение РИ относительно обрабатываемой заготовки (шарики-винтовых пар, направляющих и др.), и стабильностью их геометрических размеров при изменении температуры. Ошибки механики (в основном) имеют систематический характер и, следовательно, могут быть измерены и скомпенсированы достаточно простыми методами. Для осей, постоянно находящихся под нагрузкой (например, вертикальных), параметры серво-усилителей и их контуров обратной связи также могут существенно влиять на статическую точность, хотя такую опасность обычно учитывают на этапе подбора электрооборудования для станка.

Динамическая точность зависит от быстродействия контуров серво-усилителей, т. е. от их способности с минимальными задержками реагировать на

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения гос. задания (№ 2.1237.2017/ПЧ).

возмущение генерацией достаточно мощного компенсирующего сигнала. Второй важнейший фактор — сам характер возмущений (прежде всего сил трения покоя), резко изменяющих величину момента на валу при переходе через мертвые точки (где скорость движения по оси становится нулевой).

Необходимое условие быстрого прогресса в работах по наладке МС с ЧПУ — удобный и доступный инструментарий для измерения величин скорости и результатов позиционирования осей [5]. Если на этапе оптимизации статической точности требуется разовое применение внешнего метрологического оборудования (обычно, интерферометра), то для операций по минимизации динамических ошибок необходим внутренний программный инструмент системы ЧПУ, позволяющий в реальном времени визуализировать массив данных с датчиков двигателей.

Программный инструментарий повышения точности управления движением. Ядро системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» реализовано на основе ряда модулей, образующих единый механизм конвейерной обработки команд для движения по заданному контуру. Рассмотрим структуру и кратко опишем назначение основных модулей управления (рис. 1).



Рис. 1. Структура модулей управления движением в ядре системы ЧПУ

Интерполятор траектории преобразует каждый кадр управляющей программы в массив точек, отнесенных к декартовой системе координат МС [6]. Затем модуль кинематических преобразований рассчитывает для этих точек координаты в осевой системе (т.е. позиции физических осей МС). Таким образом, получаем «идеальную» траекторию движения в осевой системе координат МС в виде очереди линейных микрокоманд движения.

Далее, при исполнении цикла управления движением в подсистеме реального времени модуль разгона и торможения на основе микрокоманд генерирует тактированную последовательность приращений позиций приводов в соответствии с заданным законом управления скоростью подачи. Программные регуляторы реализуют обратную связь по скорости и положению, учитывают момент на валу и компенсационные смещения. Рассчитанные сигналы скорости и положения передаются приводам.

В приведенной системе можно выделить несколько модулей, позволяющих повысить точность формообразования станка с ЧПУ: механизм свободного задания векторов вращения круговых осей в параметрах кинематической схемы, обеспечивающий компенсацию отклонения осей от эталонной ориентации. Это средство актуально для пятикоординатных МС [7 и 8]; модуль табличных компенсаций с поддержкой одноосевой, температурной, перекрестной и объемной компенсации ошибок [9 и 10]; алгоритм ограничения рывка при расчете командной скорости на участках разгона и торможения, реализуемый в рамках механизма опережающего просмотра кадров [11]; программные регуляторы с развитым набором параметров и реализацией контроля ошибок на стыках квадрантов окружности (наличие таких регуляторов на уровне ядра позволяет в ряде случаев скомпенсировать недостатки контуров приводов); модули сбора данных на всех уровнях конвейера обработки управляющей программы и средства визуализации полученных данных в реальном времени.

Результаты практического применения средств повышения точности. Приведем данные, полученные при установке и наладке системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» на станке серии Quaser MV184.

Замеры точности позиционирования осей станка с помощью лазерного интерферометра (точность которого составляет $\pm 0,5$ ppm в рабочем интервале температур, который составляет $0-40$ °С) показали величину ошибок (позиционного отклонения по п. 3.5 ГОСТа 27843—2006) порядка 15—20 мкм на полном интервале перемещения осей (например, 600 мм для оси Y). Были большие градиенты ошибок (до 10 мкм на 50 мм длины). Люфт по каждой из осей не превышал 2 мкм (зона нечувствительности позиционирования по п. 3.12 ГОСТа 27843—2006). Полученные данные введены в таблицы компенсаций неравномерности шага винта.

Последующие измерения показали стабильно воспроизводимый результат, подтверждающий величину ошибок позиционирования в рамках $\pm 1,5$ мкм на полном интервале. На рис. 2 приведены данные измерений позиционного отклонения для оси Y . *I* — данные первоначальных измерений, *II* — данные после ввода и активации таблиц компенсаций. По оси абсцисс отложены позиции, по оси ординат — ошибка. Величины приведены в мм.

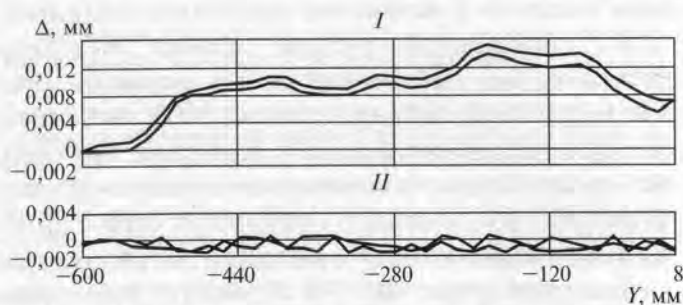


Рис. 2. Ошибка Δ позиционирования оси Y до (*I*) и после (*II*) активации таблицы компенсации

Следует отметить, что в ходе работ по наладке системы ЧПУ был выявлен линейный рост ошибок позиционирования при значительном изменении температуры в цеху (что, впрочем, не происходит при штатной эксплуатации МС). Однако из-за отсутствия на МС температурных датчиков использовать таблицу температурной компенсации невозможно.

На следующем этапе с помощью программно-реализованного цифрового осциллографа проведена настройка программных регуляторов. В этой работе можно выделить два главных пункта: 1) подбор максимально допустимых пропорциональных коэффициентов контуров скорости и позиции ПИД-регуляторов [12]; подбираются величины коэффициентов, обеспечивающие минимальное отклонение от контура при отсутствии ощутимых вибраций осей; 2) подбор времени и множителя для компенсаторов трения покоя; эти параметры определяют длительность и амплитуду сигналов, вырабатываемых регуляторами при реверсе движения оси, что необходимо для минимизации ошибок на стыках квадрантов окружности [13].

На рис. 3 дано сравнение результатов теста движения по окружности диаметром 70 мм при подаче 1000 мм/мин. Внешняя и внутренняя окружность соответствуют отклонению ± 40 мкм (круговое отклонение G по ГОСТу ИСО 230-4—2015, п. 3.4). Данные получены с датчиков двигателей.

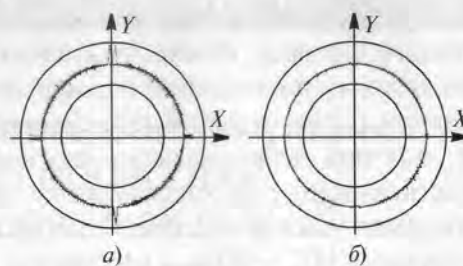


Рис. 3. Отклонение от контура для окружности в плоскости XY до (*a*) и после (*б*) настройки регуляторов с компенсацией трения покоя

До настройки регуляторов среднее двунаправленное отклонение D (по ГОСТу ИСО 230-4—2015 п. 3.6) составляло 8 мкм, а отклонение G на стыках квадрантов достигали 40 мкм. После подбора параметров отклонение D снизилось до 4 мкм, а отклонение G на стыках квадрантов практически перестали выделяться на фоне среднего отклонения. Круговое отклонение G по всему контуру не превышает 8 мкм.

Полученные результаты подтверждают работоспособность метода подавления ошибок на стыках квадрантов с помощью компенсирующего треугольного импульса заданной длительности и амплитуды, но одновременно наблюдается ожидаемая зависимость оптимальных параметров компенсации от радиуса окружности и величины подачи.

В дальнейшем для решения этой проблемы предполагается реализовать в системе табличное задание параметров компенсатора для разных значений скорости движения и кривизны контура с обучением регулятора по значениям таблицы. Тем не менее, в рамках обсуждаемой работы качество компенсации признано удовлетворительным для требуемого интервала линейных размеров заготовок и величин рабочей подачи.

Еще одна мера оптимизации системы по точности связана с введением режима управления скоростью, обеспечивающего ограничение на величину рывка (что означает линейное, а не мгновенное изменение ускорения при движении по контуру). Во многих случаях приводы и их контуры обратной связи не могут обеспечить выход в заданную позицию при линейном торможении без некоторого «перебега». Из-за этого при подходе к контуру может происходить врезание в материал заготовки. Величина этого врезания редко превосходит единицы микрон, но тоже вносит свой вклад в общую погрешность обработки.

Реализация ускорения и торможения по квадратичному закону с ограничением рывка конечной величиной может решить эту проблему. На рис. 4 показаны результаты замеров позиции датчика двигателя оси X с помощью встроенного цифрового осциллографа системы ЧПУ (масштаб по оси ординат — 1 мкм на клетку). При линейном торможении возникает перебег позиции на 2 мкм. Это значение практически не зависит от величины подачи. На него влияет только ускорение (в данном случае — 1200 об/мин за секунду). Активация ограничения рывка (здесь — 12 000 об/мин за секунду) практически исключило перебег заданной координаты.

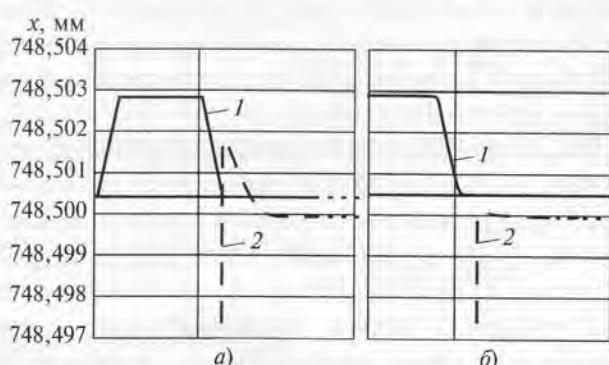


Рис. 4. Перебег позиции оси X при линейном торможении (а) и торможении с ограничением рывка (б) (1 — скорость, 2 — позиция)

После проведенных настроек системы ЧПУ изготовлены тестовые детали, на основе обмеров которых метрологический отдел завода сделал выводы о величинах ошибок позиционирования и контурного управления при обработке стальных заготовок в штатных технологических режимах резания. Ошибка позиционирования — в пределах 4 мкм, отклонение от заданного контура для линейной и круговой интерполяции — в пределах 10 мкм. С учетом того, что на момент сдачи работ МС не был оснащен линейными датчиками положения (изначально предполагалось ограничиться использованием только датчиков двигателей), результаты признаны удовлетворительными.

Выводы

1. Двухэтапное планирование работ по оптимизации точности МС с ЧПУ требует применения развитых средств диагностики и визуализации данных, получаемых с датчиков положения и скорости.

2. Реализация табличных компенсаций в системе ЧПУ «АксиОМА Контроль» позволила значи-

тельно снизить систематические ошибки позиционирования из-за механики МС.

3. Наличие программных регуляторов с поддержкой компенсации трения покоя позволяет снизить негативное влияние недостатков в контурах обратной связи приводов и минимизировать ошибки на стыках квадрантов окружности, которые вносят основной вклад в погрешность при движении по криволинейной траектории [14 и 15].

4. Ограничение рывка может принести заметную пользу при оптимизации параметров системы управления по точности обработки, исключив перебег заданных позиций при торможении осей.

5. Применение всех рассмотренных средств системы ЧПУ позволило даже в условиях отсутствия точных линейных датчиков положения достичь нормативной погрешности МС при обработке изделий в штатных технологических режимах.

Список литературы

1. Grigoriev S. N., Martinov G. M. An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines // *Procedia CIRP*. — 2016. — Vol. 46. — P. 525–528.
2. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems / G. M. Martinov, N. V. Kozak, R. A. Nezhmetdinov et al. // *Automation and Remote Control*. — 2017. — Vol. 78. — Is. 3. — P. 525–536.
3. The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application / L. I. Martinova, N. V. Kozak, R. A. Nezhmetdinov et al. // *Automation and Remote Control*. — 2015. — Vol. 76. — Is. 1. — P. 179–186.
4. Grigoriev S. N., Martinov G. M. The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems // *Procedia CIRP*. — 2016. — Vol. 41. — P. 858–863.
5. Григорьев С. Н., Мартинов Г. М. Настройка и диагностика металлорежущих станков с использованием Web-технологий // *Автоматизация в промышленности*. — 2014. — № 6. — С. 3–7.
6. 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.
7. Martinov G. M., Kozak N. V. Specialized Numerical Control System for Five-Axis Planing and Milling Center // *Russian Engineering Research*. — 2016. — Vol. 36. — No. 3. — P. 218–222.
8. Martinov G. M., Kozak N. V. Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMAcontrol system // *Russian Engineering Research*. — 2015. — Vol. 35. — Is. 7. — P. 534–538.
9. An Approach to Building a Specialized CNC System for Laser Engraving Machining / Martinov G. M., Obuhov A. I., Martinova L. I. et al. // *Procedia CIRP*. — 2016. — Vol. 41. — P. 998–1003.
10. An Approach to Building Specialized CNC Systems for Non-traditional Processes / Martinov G. M., Obuhov A. I., Martinova L. I. et al. // *Procedia CIRP*. — Vol. 14. — 2014. — P. 511–516.
11. Любимов А. Б., Мартинова Л. И., Обухов А. И. Построение алгоритма опережающего просмотра кадров для линейных и нелинейных законов управления подачей в системах ЧПУ // *Автоматизация в промышленности*. — 2016. — № 5. — С. 10–13.
12. Григорьев С. Н., Мартинов Г. М. Управление и диагностика цифровых приводов станков с ЧПУ // *Контроль. Диагностика*. — 2012. — № 12. — С. 54–60.
13. Van G. V. A study of friction models and friction compensation // *DCT*. — 2009. — Vol. 118. — P. 24.
14. Martinova L. I., Sokolov S. S., Nikishechkin P. A. Tools for Monitoring and Parameter Visualization in Computer Control Systems of Industrial Robots // *Advances in Swarm and Computational Intelligence*. — 2015. — Vol. 9142. — P. 200–207.
15. Solution to the problems of axle synchronization and exact positioning in a numerical control system / L. I. Martinova, R. L. Pushkov, N. V. Kozak et al. // *Automation and Remote Control*. — 2014. — Vol. 75. — Is. 1. — P. 129–138.