

# Средства повышения точности контурного управления в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол»<sup>1</sup>

*А.И. Обухов,  
к.т.н., доц., obukhov@ncsystems.ru,  
А.Б. Любимов,  
вед. инж., ljubimov@ncsystems.ru,  
М.С. Бабин,  
асп., binafon88@yandex.ru,  
МГТУ «СТАНКИН», г. Москва*

Рассмотрены особенности механизма компенсации погрешностей в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол». Приведены данные измерений, полученные в ходе станочных испытаний системы.

Features of the error compensation mechanism in the "AxiOMA Control" CNC system are considered. The measurement data obtained during machine testing of the system are presented.

## 1. Проблемы обеспечения точности обработки и постановка задачи

Решение проблемы повышения класса точности станка с ЧПУ требует рассмотрения двух связанных задач: улучшение точности управления в статике и в динамике. Статическая точность определяет погрешность достижения инструментом заданных координат в установившемся режиме. Допустимая погрешность в статике является необходимым условием для успеха дальнейших работ по оптимизации характеристик движения по контуру. Статическая ошибка позиционирования определяется точностью изготовления и взаимного положения механических частей станка, стабильностью их геометрических размеров при изменении температуры. Ошибки механики в основном носят систематический характер, 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 такая опасность обычно учитывается на этапе подбора электрооборудования для станка.

Динамическая точность зависит от быстродействия контуров серво-усилителей, то есть от их способности с минимальными задержками реагировать на возмущение генерацией достаточно мощного компенсирующего сигнала. Второй важнейший фактор - сам характер возмущений, прежде всего сил трения покоя, резко меняющих величину момента на валу при переходе через мертвые точки (где скорость движения по оси становится нулевой).

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

Таким образом, перед нами стояла задача разработки механизма компенсации статической и динамической погрешности, а также средств для сбора и визуализации данных, позволяющих в ходе экспериментов на конкретном станочном оборудовании оценивать эффективность разработанных инструментов [1].

## 2. Принцип и особенности построения механизма компенсации погрешностей

Компенсация погрешностей – комплексная процедура, выполняемая на разных этапах обработки управляющей программы. В ходе обработки последовательности кадров интерполятор траектории преобразует каждый кадр в массив точек, отнесенных к декартовой системе координат станка. Затем модуль кинематических преобразований рассчитывает для этих точек позиции физических осей станка. Далее, при исполнении цикла управления движением в подсистеме реального времени модуль разгона и торможения на основе микрокоманд генерирует тактированную последовательность приращений позиций приводов. Программные регуляторы реализуют обратную связь по скорости и положению, учитывают момент на валу и компенсационные смещения. Рассчитанные сигналы скорости и положения передаются приводам. В этом конвейере обработки можно выделить несколько элементов механизма компенсаций, позволяющих повысить точность управления станком с ЧПУ:

- свободное задание векторов вращения круговых осей в параметрах кинематической схемы, обеспечивающее компенсацию отклонения осей от эталонной ориентации. Это средство актуально для пятикоординатных станков [2];
- модуль табличных компенсаций с поддержкой одноосевой, температурной, перекрестной и объемной компенсации ошибок;
- алгоритм ограничения рывка при расчете командной скорости на участках разгона и торможения, реализуемый в рамках механизма опережающего просмотра кадров;
- программные регуляторы с развитым набором параметров и реализацией контроля ошибок запаздывания.
- модули сбора данных на всех уровнях конвейера и средства визуализации полученных данных в реальном времени.

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

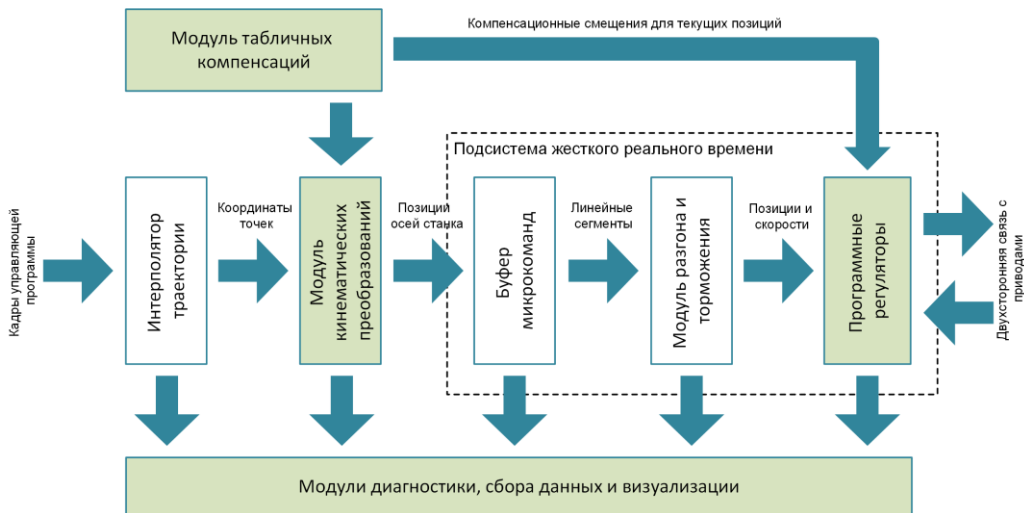


рис. 1 Общая схема интеграции механизма компенсаций

Механизм табличных компенсаций, таким образом, представляет собой распределенный набор средств, реализованных в разных компонентах системы ЧПУ. Собственно модуль табличных компенсаций как элемент этого механизма реализован в виде клиентской и серверной частей. Разборщик файлов в терминале реализует клиентскую часть и состоит из расширяемого набора синтаксических анализаторов, позволяющих преобразовать данные файлов измерений разных форматов в бинарный блок данных таблиц компенсаций. Сервер данных таблиц компенсаций реализуется в ядре системы ЧПУ. Основной его функцией является предоставление данных из таблиц по запросу других компонентов системы. Модуль кинематических преобразований получает данные путем прямых вызовов функций сервера, так как находится с ним на одном уровне реализации (выполняется в том же режиме мягкого реального времени). Для связи сервера компенсаций с модулями драйвера (подсистемы жесткого реального времени, в частности, программных регуляторов) реализован фоновый поток обновлений позиций. Цикл этого потока выполняется с периодом порядка такта интерполяции, хотя и в режиме мягкого реального времени. В данном потоке периодически производятся запросы текущих позиций от приводов и на основе полученных значений обновляются внутренние поля компенсационных величин, получаемых путем прямых вызовов функций сервера таблиц компенсаций. В конце цикла компенсационные величины отправляются регуляторам приводов через интерфейс между основным кодом ядра и драйвером.



рис. 2 Распределение функций механизма компенсаций по подсистемам

Данные в таблицах организованы в виде пар блоков данных одинаковой длины, один из которых соответствует величинам компенсаций при движении оси в положительную сторону, второй – в отрицательную. Количество осей ограничено настройками системы ЧПУ (в данный момент поддерживается максимум 32 оси на систему или 16 осей на канал). Количество значений и область определения компенсационных величин для каждой оси задаются свободно. Другими словами, для каждой оси в таблице указываются координаты начала и конца интервала измерений и шаг сетки. Количество значений в таблице соответствует этим параметрам. Значения компенсаций вычисляются с помощью интерполяции табличных величин с учетом текущих позиций осей (т.е. если нужно получить значение для координаты между узлами сетки таблицы, это значение вычисляется исходя из значений соседних узлов). Реализованы два режима интерполяции: линейная и сплайнами Акимы.

Важный элемент механизма компенсаций – программные регуляторы. В рамках работы в регуляторы приводов (реализующие дополнительный контур обратной связи на уровне программного обеспечения системы ЧПУ, а не на уровне контроллера привода) добавлена реализация контроля ошибок перекрестного запаздывания. Эта функция представляет собой генератор треугольного импульса командной скорости заданной длины и амплитуды, выдаваемого при обнаружении движения через точку покоя. Путем экспериментального подбора значений амплитуд и периодов компенсационного импульса для типовых режимов резания конкретного станка можно с помощью данного средства значительно уменьшить ошибки, обусловленные влиянием трения покоя на инерционность приводов. В особенности польза этого механизма проявляется при обработке криволинейных поверхностей, когда периодически возникают остановки части осей при ненулевой контурной скорости.

### 3. Результаты испытаний механизма компенсаций на станке серии Quaser MV184

Приведём данные, полученные в рамках работ по установке и наладке системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» на станке серии Quaser MV184 производства ОАО «КЭМЗ».

Замеры точности позиционирования осей станка с помощью лазерного интерферометра показали величину ошибок порядка 15-20 мкм на полном диапазоне перемещения осей (например, 600 мм для оси Y). Встречались большие градиенты ошибок (до 10 мкм / 50 мм длины). Люфт по каждой из осей не превышал 2 мкм. Полученные данные были 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 диапазоне.

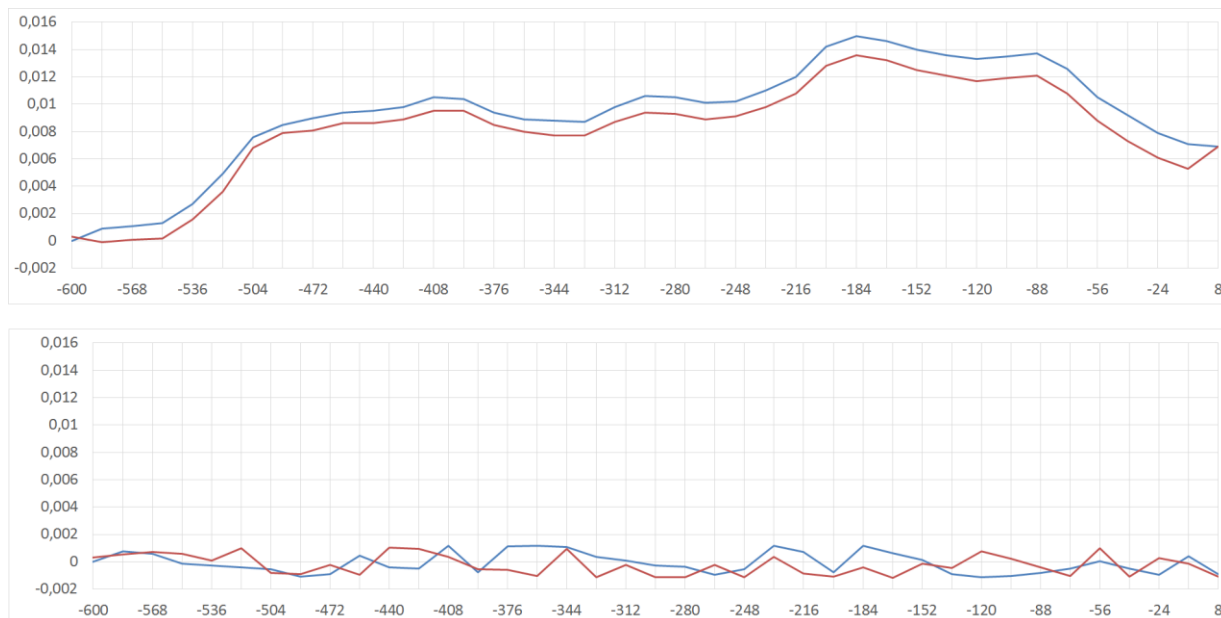


рис. 3 Ошибка позиционирования оси Y станка Quaser MV184 до и после активации таблицы компенсаций

На следующем этапе с помощью программного осциллографа и компонента визуализации теста отклонения от окружности была проведена настройка программных регуляторов. В этой работе можно выделить два главных пункта:

- подбор максимально допустимых пропорциональных коэффициентов контуров скорости и позиции ПИД-регуляторов. Подбираются величины коэффициентов, обеспечивающие минимальное отклонение от контура при отсутствии ощутимых вибраций осей.
- 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 квадрантных ошибок.

До настройки регуляторов среднеквадратичное отклонение составляло 8 мкм, а квадрантные ошибки достигали 40 мкм. После подбора параметров отклонение снизилось до 4 мкм, а ошибки на квадрантах практически перестали выделяться на фоне среднего отклонения. Максимальная ошибка по контуру не превышает 8 мкм.

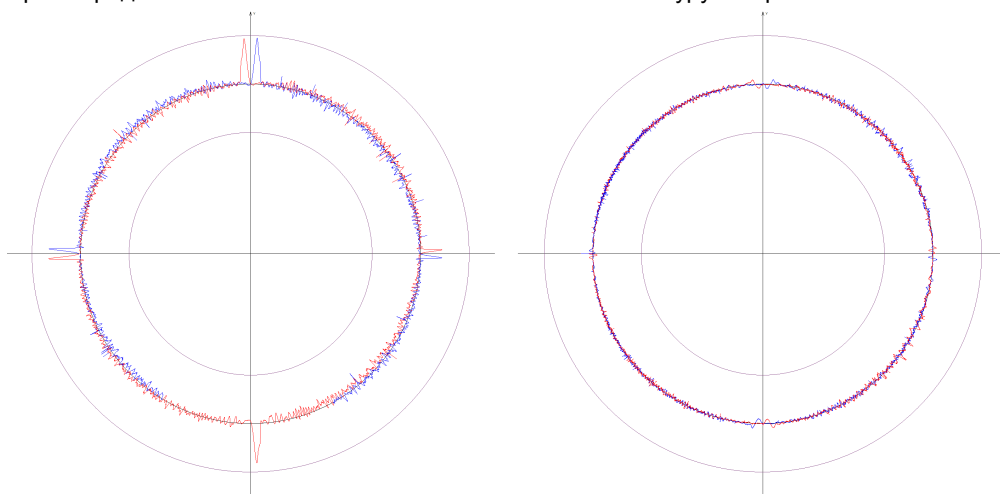


рис. 4 Отклонение от контура для окружности в плоскости XY до и после настройки регуляторов с компенсацией трения покоя

Полученные результаты подтверждают работоспособность метода подавления квадрантных ошибок с помощью компенсирующего треугольного импульса заданной длительности и амплитуды, но одновременно с этим 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 диапазона линейных размеров заготовок и величин рабочей подачи.

Ещё 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) [3]. Дело в том, что 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. 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. При линейном торможении возникал перебег позиции на 2 мкм. Это значение практически не зависело от величины подачи. На него влияло только ускорение. Активация ограничения рывка (величиной 12000 об/мин / сек<sup>2</sup>) практически исключило перебег заданной координаты.

После проведённых настроек системы ЧПУ были 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 находится в пределах 4 мкм, отклонение от заданного контура для линейной и круговой интерполяции – 10 мкм. С учетом того, что на момент сдачи работ станок не был оснащён линейными датчиками положения (изначально предполагалось ограничиться использованием только датчиков двигателей), результаты признаны удовлетворительными.

#### **Выводы из испытаний:**

1. Работы по оптимизации точности станочного оборудования с ЧПУ требуют применения развитых средств диагностики и визуализации данных, получаемых с датчиков положения и скорости.
2. Реализация табличных компенсаций в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол» позволила значительно снизить систематические ошибки позиционирования из-за механики станка.
3. Наличие программных регуляторов с поддержкой компенсации трения покоя даёт возможность снизить негативное влияние недостатков в контурах обратной связи приводов и минимизировать ошибки запаздывания, которые вносят основной вклад в погрешность при движении по криволинейной траектории.
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 станка при обработке изделий в штатных технологических режимах.

#### **Литература**

1. Г.М. Мартинов, А.И. Обухов, Н.В. Козак Применение инструментария компенсаций погрешностей для повышения точности обработки на вертикально-фрезерных станках с ЧПУ // СТИН, №8. 2017. с.12-15.
2. Г.М. Мартинов, А.И. Обухов, Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева Особенности реализации и специфика применения функций многокоординатной обработки в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол» // Автоматизация в промышленности, №5. 2017. с.17-22.
3. Обухов А.И., Мартинова Л.И., Любимов А.Б. Построение алгоритма опережающего просмотра кадров для линейных и нелинейных законов управления подачей в системах ЧПУ // Автоматизация в промышленности, №5, 2016. с.10-13.