

*Гибадулин Руслан Рашитович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»*

Россия, г. Москва

*Сидоренко Максим Сергеевич,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»*

Россия, г. Москва

*Колесников Евгений Александрович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»*

Россия, г. Москва

МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ НА СТАНКЕ С ЧПУ

Аннотация: В статье рассматривается мехатронная система автоматического позиционирования заготовки на металлорежущем станке с числовым программным управлением. Предложена структура, включающая программируемый контроллер, сервопривод, шарико-винтовую передачу, датчики наличия и положения, зажимное устройство и интерфейс обмена с ЧПУ. Сформирован алгоритм двухэтапного позиционирования с контролем конечной погрешности и повторной коррекцией перед фиксацией заготовки. Рассмотрена математическая связь между угловым перемещением серводвигателя и линейным положением исполнительного органа, а также

составлена модель суммарной погрешности. Для иллюстрации принципа выполнено расчетное моделирование переходного процесса без заявления о проведении натурных испытаний. Показаны требования к диагностике, безопасности и интеграции системы в автоматизированный технологический цикл.

Ключевые слова: *мехатронная система, станок с ЧПУ, позиционирование заготовки, сервопривод, шарико-винтовая передача, датчик положения, автоматизация.*

Annotation: *The article considers a mechatronic system for automatic positioning of a workpiece on a CNC metal-cutting machine. The proposed architecture combines a programmable controller, servo drive, ball-screw transmission, presence and position sensors, a clamping device and an interface with the CNC unit. A two-stage positioning algorithm with final error verification and repeated correction before clamping is proposed. The relationship between servo motor rotation and linear displacement is formulated and a combined positioning-error model is presented. A numerical transient simulation is used only to illustrate the principle and is not reported as a physical experiment. Diagnostic, safety and integration requirements for an automated machining cycle are discussed.*

Key words: *mechatronic system, CNC machine tool, workpiece positioning, servo drive, ball screw, position sensor, automation.*

Предлагаемая система строится по модульному принципу. Исполнительный механизм перемещает заготовку, паллету, установочный упор либо подвижный элемент приспособления. В качестве привода используется сервомотор с цифровым преобразователем, а вращательное движение преобразуется в линейное посредством шарико-винтовой передачи (ШВП). Такое решение соответствует типовой структуре высокоточного привода подачи и обеспечивает возможность формирования замкнутого контура по положению. Информационная часть включает датчик наличия

заготовки, энкодер двигателя, независимый линейный датчик положения и дискретные датчики состояния зажимного устройства.

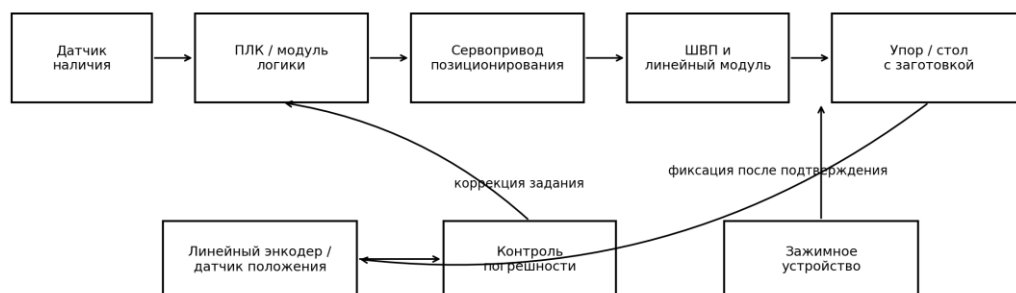


Рисунок 1. Функциональная структура системы автоматического позиционирования заготовки

Управляющий уровень целесообразно разделить между локальным контроллером позиционирования и системой ЧПУ. Локальный контроллер реализует последовательность подготовки, движения, коррекции и фиксации, а ЧПУ передает идентификатор технологической операции, требуемую координату и разрешение на запуск цикла. Такое разделение повышает детерминированность: высокочастотный контур сервопривода не зависит от времени обработки внешних технологических команд, а ЧПУ получает уже сформированный диагностический статус.

Функциональные элементы образуют единый контур: сервопривод и ШВП создают линейное перемещение, линейный энкодер подтверждает фактическую координату, датчик наличия контролирует поступление детали, а зажимное устройство фиксирует ее только после достижения допуска. ПЛК координирует последовательность и межблокировки, тогда как ЧПУ передает номер операции, требуемую позицию и разрешение на обработку.

Кинематическая модель и обратная связь

Для привода с вращающимся винтом линейное перемещение x связано с углом поворота серводвигателя φ через шаг ШВП p и передаточное отношение

редуктора i . При отсутствии промежуточного редуктора $i = 1$. Базовая кинематическая зависимость имеет вид

$$x = p \cdot \varphi / (2\pi \cdot i).$$

Если положение оценивается только по энкодеру двигателя, в измерение не входят упругие деформации, люфт соединительной муфты, погрешность шага винта и возможное смещение подвижной части относительно направляющих. Для повышения достоверности конечного положения предлагается использовать независимый линейный энкодер или измерительный датчик, связанный непосредственно с перемещаемым элементом. Тогда ошибка позиционирования определяется выражением

$$e(t) = x_{\text{зад}}(t) - x_{\text{изм}}(t),$$

где $x_{\text{зад}}$ - требуемая координата; $x_{\text{изм}}$ - координата по независимому измерительному каналу. Сервоконтур может оставаться штатным и работать по энкодеру двигателя, а внешний контур после завершения основного движения выполняет медленную коррекцию задания. Такой подход исключает необходимость вмешательства в внутренние алгоритмы преобразователя и одновременно позволяет компенсировать часть механических систематических отклонений.

Исследования точности станков показывают необходимость учитывать, как собственно погрешность привода, так и состояние механических элементов. Д.А. Блохин и соавторы применяли карты позиционной точности стола фрезерного станка, а при нагружении выявляется дополнительное изменение параметров перемещения [3]. Это подтверждает целесообразность использования отдельного измерительного канала в системе позиционирования заготовки, особенно если модуль работает в широком диапазоне координат и нагрузок.

Формирование баланса погрешности

В предлагаемой системе конечная ошибка положения складывается из нескольких независимых или слабо коррелированных составляющих. Для

предварительной инженерной оценки можно использовать корень квадратный из суммы квадратов отдельных погрешностей:

$$\Delta\Sigma = \sqrt{(\Delta_{\text{пр}}^2 + \Delta_{\text{ШВП}}^2 + \Delta_{\text{дат}}^2 + \Delta_{\text{баз}}^2 + \Delta_{\text{аж}}^2)},$$

где $\Delta_{\text{пр}}$ - остаточная ошибка сервопривода; $\Delta_{\text{ШВП}}$ - составляющая, связанная с передачей; $\Delta_{\text{дат}}$ - ошибка измерительного канала; $\Delta_{\text{баз}}$ - ошибка контакта заготовки с базовыми элементами; $\Delta_{\text{аж}}$ - смещение при фиксации. Эта формула не заменяет статистическую оценку конкретного узла, но позволяет определить, какая составляющая требует первоочередного уменьшения. Если одна из ошибок существенно превосходит остальные, повышение разрешения энкодера не приведет к сопоставимому повышению точности установки.

В расчетном примере примем остаточные составляющие 8, 10, 3, 12 и 8 мкм соответственно. Тогда суммарная оценка составляет около 19,5 мкм. Если после первого касания и предварительной фиксации выполняется повторный контроль, а коррекция уменьшает ошибку базирования с 12 до 4 мкм и смещение при зажиме с 8 до 4 мкм, расчетная оценка уменьшается примерно до 14,3 мкм. Этот пример показывает смысл двухэтапного цикла: точность повышается не только за счет более точного привода, но и за счет контроля фактического результата установки.

Таблица 1.

Расчетный баланс погрешности позиционирования

Составляющая	До коррекции, мкм	После коррекции, мкм
Остаточная ошибка сервопривода	8	8
Погрешность ШВП и механической передачи	10	10
Измерительный канал	3	3
Базирование заготовки	12	4
Смещение при зажиме	8	4
Итоговая оценка по RSS	≈19,5	≈14,3

Алгоритм автоматического позиционирования

Алгоритм построен как последовательность состояний с обязательным подтверждением переходов. После включения выполняется самодиагностика датчиков и реферирование исполнительного модуля. Далее контроллер

ожидает сигнал о наличии заготовки и команду ЧПУ. При отсутствии подтверждения разжатого состояния приспособления движение блокируется. После получения задания привод выполняет быстрое перемещение до зоны предварительного позиционирования, затем снижает скорость и переходит к точному доведению по линейному датчику.

В конце движения вычисляется абсолютная ошибка $|e|$. Если она меньше допуска $\varepsilon_{доп}$, выполняется предварительный зажим. После срабатывания датчика давления или конечного выключателя фиксирующего механизма координата считывается повторно. Если зажим вызвал смещение, превышающее допустимое, контроллер снимает зажим, выполняет компенсационное перемещение и повторяет цикл. Количество повторных попыток ограничивается, чтобы механическая неисправность или загрязнение базы не приводили к бесконечному повторению операций.

После успешного подтверждения положение передается в ЧПУ как статус «позиционирование завершено». В зависимости от технологической схемы система может также записывать корректирующее смещение нуля заготовки. Такой вариант полезен, когда требуется не физически доводить деталь до идеальной координаты, а измерить малое остаточное отклонение и учесть его в системе координат обработки. Подобный принцип цифровой коррекции согласуется с подходами к повышению объемной точности станков, где измеренные отклонения используются для изменения управляющих координат [2, с. 146–156].

Расчетная оценка переходного процесса

Для оценки динамической части выполнено моделирование линейного сервомодуля как системы второго порядка. Задано перемещение 80 мм по сглаженной траектории длительностью 0,4 с. Параметры модели выбраны условно: собственная частота замкнутого контура 34 рад/с, коэффициент демпфирования 0,88, дискретность измерения линейного датчика 0,001 мм. Дополнительно после окончания движения введена малая затухающая

механическая составляющая. Расчет не относится к конкретной модели станка и не является результатом натурного эксперимента.

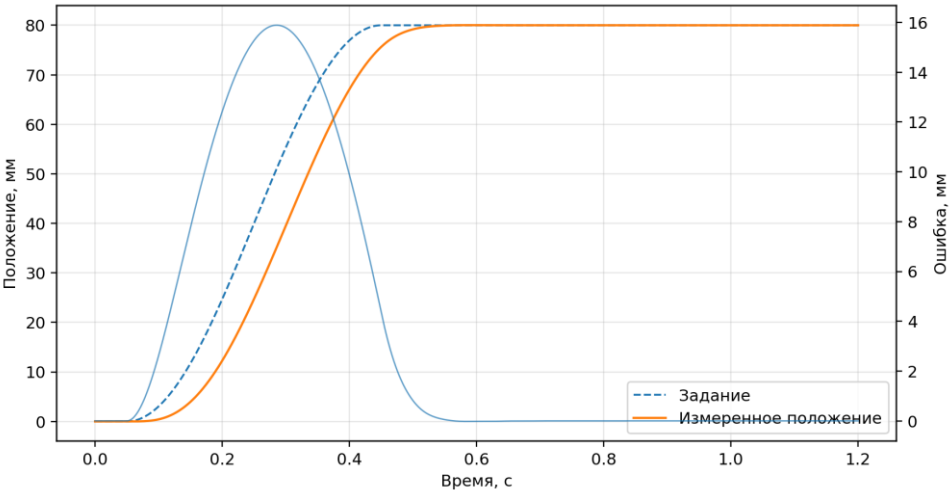


Рисунок 2. Расчетный переходный процесс позиционирования на 80 мм

Модель показывает плавное приближение к целевой координате без выраженного перерегулирования. На этапе точного доведения ошибка уменьшается до уровня, сопоставимого с дискретностью измерительного канала. Для реального оборудования допустимое время позиционирования определяется тактом линии, массой заготовки и возможностями привода. Ускорение нельзя увеличивать независимо от механики: рост инерционных сил повышает деформации и может ухудшить повторяемость конечного положения. Поэтому целесообразно задавать отдельные профили движения для разных типоразмеров деталей.

Таблица 2.

Параметры расчетного режима позиционирования

Параметр	Принятое значение	Назначение
Перемещение	80 мм	Иллюстративный ход модуля
Время формирования задания	0,40 с	Сглаженный разгон и торможение
Собственная частота модели	34 рад/с	Быстродействие замкнутого контура
Коэффициент демпфирования	0,88	Ограничение перерегулирования
Дискретность линейного датчика	0,001 мм	Расчетная квантованность обратной связи
Критерий завершения	$ e \leq \epsilon_{доп}$	Переход к фиксации заготовки

Система должна обмениваться с ЧПУ минимально необходимым набором сигналов: «готовность», «заготовка присутствует», «позиционирование выполнено», «зажим подтвержден», «ошибка». В обратном направлении передаются команда запуска, номер рецепта и требуемая позиция. Если станок поддерживает программный обмен технологическими данными, координата может задаваться числовым значением; для более простой модернизации допустимо хранить таблицу позиций в локальном ПЛК и передавать только номер детали.

Согласование с приспособлением должно учитывать положение относительно технологических баз, а не только координату каретки. Стружка, загрязнение или неполное прилегание способны создать ошибку, не наблюдаемую сервоприводом. Для ответственных деталей целесообразен дополнительный контроль контактным датчиком или штатным щупом; измеренное после фиксации остаточное отклонение может быть внесено в корректировку системы координат заготовки.

Точность самого станка также должна подтверждаться независимо. ГОСТ ISO 230-2-2016 предусматривает оценку точности и повторяемости позиционирования осей, а результаты могут использоваться при периодической коррекции [1]. В.В. Додонов отмечает, что систематические погрешности станков с ЧПУ могут частично компенсироваться корректировкой управляющих программ и параметров управления [4]. В предлагаемой системе этот принцип дополняется контролем отдельного звена - автоматической установки заготовки.

Отказы системы позиционирования могут привести не только к браку, но и к повреждению инструмента, приспособления или шпиндельного узла. Поэтому разрешение обработки должно формироваться по принципу положительного подтверждения: отсутствие сигнала считается неготовностью. Контроллер должен различать по меньшей мере следующие состояния: потеря сигнала линейного датчика, превышение времени

движения, превышение допустимой ошибки, несоответствие состояния зажима, перегрузка сервопривода и невозможность реферирования.

При аварийном останове необходимо исключить самопроизвольное перемещение заготовки. Для вертикальных или потенциально опасных осей применяются тормозные и удерживающие устройства, а функции безопасного отключения момента и контролируемой остановки должны реализовываться средствами привода, соответствующими принятой архитектуре функциональной безопасности. ГОСТ Р МЭК 61800-5-2-2015 устанавливает требования функциональной безопасности для систем силовых электроприводов с регулируемой скоростью [7]. При этом логика технологической готовности не должна подменять собой специализированную систему безопасности станка.

Предлагаемая система применима в токарных и фрезерных центрах, паллетных системах и автоматических приспособлениях. Ее принципиальное отличие от обычного механизма подачи состоит в замыкании операции по измеряемому результату: положение подтверждается независимым каналом и повторно контролируется после фиксации. Перспективным развитием является построение карты поправок по накопленной статистике и выбор разных профилей ускорения для заготовок различной массы; подход к картированию позиционной точности используется и при диагностике станочного оборудования [3].

Таким образом, разработана концепция мехатронной системы автоматического позиционирования заготовки на станке с ЧПУ, объединяющей сервопривод, ШВП, независимый датчик положения, ПЛК, зажимное устройство и ЧПУ. Предложено двухэтапное управление с точным доведением и повторной проверкой после зажима. Расчетный баланс показал, что точность определяется не только сервоприводом, но и передачей, базированием, измерением и фиксацией; в условном примере повторный контроль снизил оценочную суммарную погрешность с 19,5 до 14,3 мкм. Моделирование переходного процесса подтвердило возможность плавного

позиционирования без значительного перерегулирования. Для внедрения требуется идентификация параметров конкретного модуля, назначение технологических допусков и верификация безопасности.

Использованные источники:

1. ГОСТ ISO 230-2-2016. Нормы и правила испытаний станков. Часть 2. Определение точности и повторяемости позиционирования осей станков с числовым программным управлением. – М.: Стандартиформ, 2017.
2. Пимушкин Я. И. Разработка метода повышения объёмной точности многокоординатного металлорежущего оборудования на основе цифровой коррекции перемещений рабочих органов: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.5 / Я. И. Пимушкин; МГТУ «СТАНКИН». – Москва, 2023. – 178 с.
3. Блохин Д. А., Блохина Ю. А., Лакман М. М. Составление карты позиционной точности стола фрезерного станка // Омский научный вестник. – 2021. – № 6 (180). – С. 21–25. – DOI 10.25206/1813-8225-2021-180-21-25.
4. Додонов В. В. Повышение точности обработки на станках с числовым программным управлением // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – № 6 (54). – DOI 10.18698/2308-6033-2016-6-1506.
5. Бушуев В. В. Повышение точности станков с ЧПУ для контурной обработки за счет улучшения динамических характеристик электромеханических приводов подачи: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. – Москва, 2017. – 183 с.
6. Бушуев В. В., Новиков В. А. Определение приведенных коэффициентов демпфирования элементов привода подач станков с передачей винт-гайка качения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2016. – № 4 (39). – С. 22–26.
7. ГОСТ Р МЭК 61800-5-2-2015. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 5-2. Требования функциональной безопасности. – М.: Стандартиформ, 2016.

8. Телешевский В. И., Соколов В. А. Автоматическая коррекция объёмных геометрических погрешностей программно-управляемых измерительных и технологических систем // Измерительная техника. – 2015. – № 7. – С. 14–17.