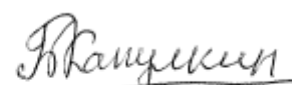


на правах рукописи



Капулкин Борис Самуилович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
СТАНКОВ С ЧПУ**

Специальность: 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: кандидат технических наук, профессор
Семёнов Игорь Михайлович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПШОНЕНТЫ: доктор технических наук, профессор
Бор-Раменский Арнольд Евгеньевич;
кандидат технических наук, руководитель
проекта Филатов Виктор Николаевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Защита состоится "24" мая 2007 г. в 18⁰⁰ на заседании
диссертационного Совета Д 212.229.20 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, главное здание, ауд. 151.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан "21" апреля 2007 г.

Учёный секретарь
Диссертационного Совета, к.т.н., доцент



Курмашев А. Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный уровень развития числового программного управления характеризуется применением высокоскоростных металлообрабатывающих станков, когда наряду с высокой скоростью обработки поддерживается высокая точность изготовления деталей. Электропривод переменного тока стал доминирующим в новых разработках технологического оборудования. Применение в устройствах ЧПУ аппаратных средств персональных компьютеров позволило перенести акцент в развитии средств ЧПУ на разработку эффективных алгоритмов управления исполнительными органами станка.

Одним из направлений в современном станкостроении является создание станков с параллельной кинематикой. Такие станки уже более 30 лет привлекают внимание ученых и специалистов, имеют усложнённую конструкцию. Станки с традиционной и параллельной кинематикой имеют свои уже известные преимущества и недостатки. Основные и вспомогательные технические показатели, условия эксплуатации и экономическая эффективность оборудования с параллельной кинематикой при реализации требований заказчика требуют компромисса между жесткостью станка, размерами рабочей зоны, удобством доступа к ней и конструктивными параметрами станка. У станков с параллельной кинематикой статические, динамические и тепловые характеристики связаны между собой и в значительной степени зависят от положения их рабочих органов, поэтому выявление погрешностей достаточно затруднено. Проблемы выявления погрешностей у станков с параллельной кинематикой особенно трудны вследствие их сложной объёмной структуры и значительного числа компонентов, причем погрешности функционирования компонентов сочетаются с погрешностями их изготовления, а также со статическими и тепловыми погрешностями.

Проблема повышения динамической точности станков с ЧПУ в настоящее время остается актуальной. Международным стандартом ISO указаны верхняя граница скорости и нижняя – дискретности задания перемещения: $V_{k\max} = 2500 \text{ мм/с}$; $d_{z\min} = 10^{-3} \text{ мм}$, которые соответствуют максимально востребованному значению добротности по скорости:

$$D_{v\max} = \frac{V_{k\max}}{d_{z\min}} = \frac{2500}{0,001} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}.$$

При использовании существующих традиционных методов синтеза условия точности и быстродействия оказываются в противоречии. Усилия многих исследователей (Андрейчиков Б.И., Соколов О.А., Сосонкин В.М., Каган В.Г., Коровин Б.Г., Михайлов О.П. и др.) направлены на разрешение этих противоречий. Предлагаются различные решения, связанные с изменением кинематических схем, применение замкнутых систем ЧПУ взамен разомкнутых, более совершенные системы привода, программные способы компенсации кинематических погрешностей.

В диссертации предлагается реализовывать электромеханические системы по принципу двунаправленных систем, в которых перемещение подвижного органа станка по какой-либо координате контролируется двумя двигателями, причём один из них работает в двигательном режиме, а другой – в тормозном. В диссертации предлагается производить коррекцию траектории за счёт организации скользящего режима в контуре положения. Применение дополнительной коррекции должно значительно повысить точность воспроизведения траекторий в соответствии со стандартом ISO.

Задача реализации в устройствах ЧПУ двунаправленных систем с коррекцией в контуре положения является актуальной, так как её решение позволит повысить точность и производительность процесса металлообработки. Внедрение устройств ЧПУ с коррекцией в контуре положения при ремонте старых станков позволит повысить их точность и, в ряде случаев, производить модернизацию вместо приобретения новых станков.

Объектом исследования являются электромеханические системы станков с ЧПУ.

Предметом исследования является система регулирования положения, осуществляющая перемещение подвижных органов станка.

Цель диссертационной работы: разработка электромеханических систем, обеспечивающих повышение точности и производительности станков с ЧПУ.

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие **задачи:**

- проанализировать причины появления погрешностей при обработке изделий и выбрать способы их устранения;
- провести анализ кинематических цепей металлорежущих станков;
- создать модель электромеханической системы, адекватно описывающую процесс отработки траектории в станке с ЧПУ;
- исследовать характеристики электромеханической системы при стандартных настройках регуляторов;
- выбрать и обосновать принципы построения системы управления электроприводом координат;
- разработать методику синтеза параметров регуляторов по условиям точности;
- выполнить теоретические расчёты оценки точности воспроизведения траектории, произвести моделирование при помощи средств вычислительной техники и сопоставить результаты моделирования с результатами теоретических расчётов.

Методы анализа и синтеза. Для решения поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, а также метод компьютерного моделирования с использованием математического пакета MATLAB.

Достоверность полученных результатов работы определяется обоснованностью

принятых допущений, адекватностью используемых при исследовании математических моделей, подтверждением теоретических расчётов при моделировании, сопоставлением с результатами исследования других авторов.

Научная новизна диссертационной работы:

- получено обобщённое математическое описание электропривода координат в виде математической модели с учётом люфта и упруго-диссипативных свойств его передач;
- разработан способ коррекции траектории путём создания системы, работающей в скользящем режиме;
- создана методика синтеза следящего привода подач по условию точности;
- выдвинуто и обосновано положение о разделении управляющих функций между устройством ЧПУ и электроприводом по линии на выходе регулятора скорости.

Практическая ценность выполненных исследований:

- разработаны средства повышения точности и производительности процесса металлообработки;
- разработана инженерная методика выбора параметров регулятора, обеспечивающего требуемую точность отработки траектории в соответствии со стандартами ISO.

К защите представляются следующие основные результаты:

- математические модели электромеханических систем электропривода координат, условия их упрощения и области рационального применения;
- метод коррекции траектории за счёт организации скользящего режима в контуре положения;
- методики синтеза параметров управляющих устройств;
- система управления двигателями двунаправленной системы, приводящая к устранению размыкания кинематической цепи.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на 2-й международной научно-практической конференции в Тамбове 21-22 апреля 2006 г.

Проверка разработанного регулятора положения произведена на опытном макете на фирме «Балт-Систем» и подтвердила эффективность предложенного метода коррекции траектории. По результатам испытаний отмечено уменьшение как динамической, так и моментной погрешности. Предусмотрено задание параметров регулятора коррекции в файле характеристики устройства ЧПУ.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 статьи.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации: 98 страниц основного текста, 58 рисунков, 2 таблицы, 3 страницы списка используемой литературы из 47 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрено состояние проблемы повышения динамической точности станков с ЧПУ. Выявлены основные факторы, влияющие на точность воспроизведения программных траекторий. Из анализа характеристик станков и применяемых способов уменьшения ошибок сделан вывод о том, что наиболее сильно на точность обработки влияют кинематические погрешности станка и добротность следящего привода подач. Рассмотрен также вопрос о влиянии динамических характеристик приводов на шероховатость обрабатываемой поверхности. Для определения путей повышения точности станков с ЧПУ приведены возможные направления работы.

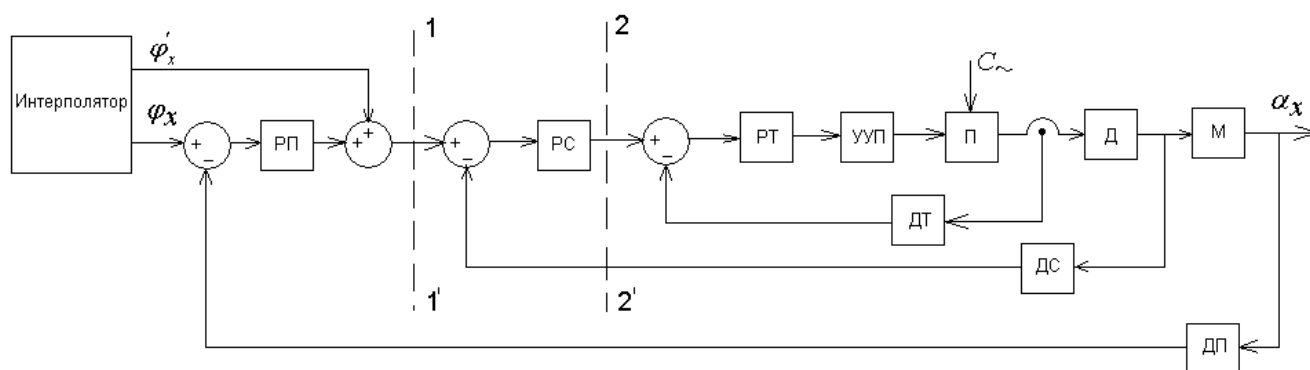


Рис. 1. Типовая структура следящего привода

Следящий привод представляет собой трёхконтурную систему подчинённого управления (рис. 1). На этом рисунке: РП – регулятор положения; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ДП – датчик положения; ДС – датчик скорости; ДТ – датчик тока; П – силовой преобразователь; УУП – устройство управления силовым преобразователем; Д – электродвигатель; М – механизм. Для компенсации установившейся скоростной ошибки в контур положения может вводиться дополнительный сигнал ϕ'_x , пропорциональный скорости программного изменения текущего значения координаты.

Обеспечение высокой производительности и качества обработки возможно только при корректной стыковке электропривода с устройством ЧПУ. Традиционно сопряжение УЧПУ и регулируемого привода осуществляется по сечению 1–1'.

При наличии зазоров в механической передаче следящему приводу приходится работать в режиме не только возмущения по нагрузке, но также и с переменным моментом инерции, что в ряде случаев может привести к появлению автоколебаний в системе регулирования.

Применение двунаправленных систем и метода коррекции траектории путём введения дополнительной обратной связи, обеспечивающей работу системы в скользящем режиме, позволяет добиться более высокой точности регулирования в контуре положения.

Во второй главе вопросы анализа режимов работы электропривода координат, в силу их сложности, рассмотрены с привлечением моделей, созданных в среде MATLAB.

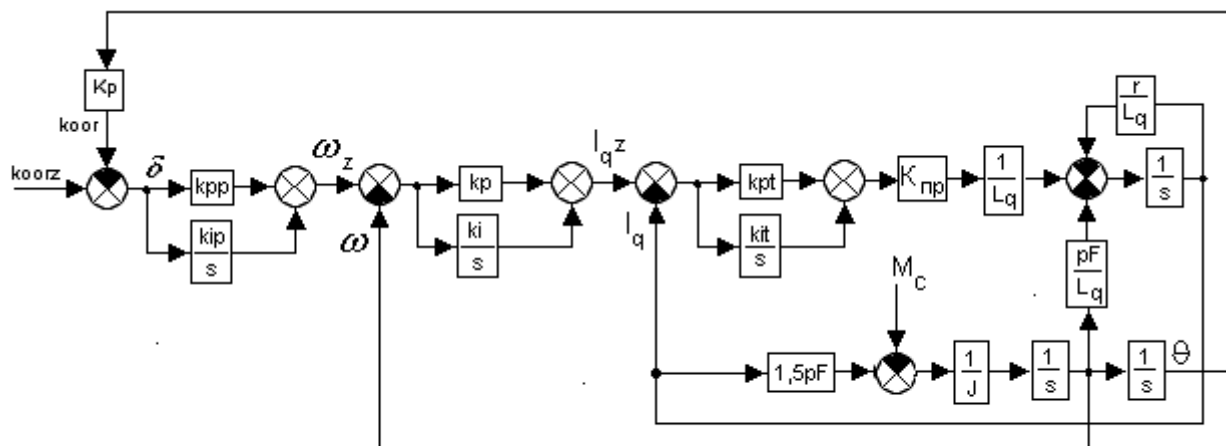


Рис. 2. Упрощенная модель следящего привода

В качестве базовой системы привода использовался вентильный электропривод с векторным управлением, который в современных станках имеет доминирующее распространение. Существующая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами, входящая в библиотеку SIMULINK, была отвергнута ввиду её громоздкости и недоступности для пользователя блока измерения. В диссертации представлена модель, полученная на базе дифференциальных уравнений синхронного двигателя. Полученная модель представляет собой трёхконтурную систему подчинённого управления. В схему управления добавляется блок координатных преобразований из двухфазной системы координат ($d - q$) в трёхфазную ($a - b - c$) для управления силовым преобразователем. Т. к. у неявнополюсной синхронной машины индуктивности по продольной и поперечной осям равны: $L_d = L_q$ и при векторном управлении требуемый момент двигателя обеспечивается при минимальном значении тока статора за счёт поддержания $I_d = 0$, то модель двигателя и всей системы могут быть существенно упрощены (рис. 2). Сопоставление упрощенной модели следящего электропривода с библиотечной моделью SIMULINK показало адекватность этих моделей. Однако одинаковый результат воспроизведения траектории получен более простым способом и при меньших затратах вычислительных ресурсов посредством упрощенной модели.

В третьей главе предложен способ повышения динамической точности станков с ЧПУ, основанный на введении дополнительной коррекции в контуре положения, обеспечивающей работу контура в скользящем режиме.

В теории автоматического управления разработаны методы оптимального управления: принцип максимума Л. С. Понтрягина и метод динамического программирования Р.

Беллмана. Полученные с помощью этих методов решения приводят к разрывному управлению, а функция управления представляет собой релейную функцию времени. Частота переключений в такой системе зависит от корней характеристического уравнения. Для получения системы, в которой обеспечивается оптимальное управление, нужно применить релейный элемент (нуль-компаратор) и определить параметры, а также характеристики связей и элементов, управляющих переключением реле. К близким результатам приводит использование скользящих режимов в контуре управления. Общность скользящего и оптимального режимов механизмов заключается в том, что их движение имеет одинаковый характер. Причём оптимальный процесс движения является в некотором смысле предельным, частным случаем скользящего режима.

При синтезе оптимальных механизмов следует учитывать внешнее воздействие, которое в общем случае влияет на выбор характеристик и связей. Величина внешнего воздействия в большинстве случаев заранее неизвестна, поэтому приходится осуществлять оптимальное управление с помощью сигналов старших производных. Закон оптимального управления будет инвариантным относительно внешнего воздействия, если он формируется с помощью сигналов первой и второй производных регулируемой величины.

При создании системы с коррекцией в контуре положения была использована упрощенная линейная модель системы. Задача о линейных оптимальных быстродействиях имеет решение в теории оптимального управления. Согласно теореме о конечности числа переключений, оптимальное управление должно быть кусочно-постоянной функцией со значениями на границах области управления. Число переключений зависит от вида объекта управления. Если характеристическое уравнение системы имеет комплексные корни, то число переключений системы неограниченно увеличивается при увеличении длины траектории. Если характеристическое уравнение системы имеет действительные корни, то число переключений системы определяется её порядком. Приводимые соображения дают конструктивный метод решения задачи. Осуществление этого метода в каждом конкретном случае требует, однако, ряда построений.

Скользящий режим существует, если расстояние до линии переключения и скорость его изменения имеют разные знаки. Если определять скользящий режим как движение в заданном направлении при колебаниях переключающего элемента с бесконечной частотой и амплитудой, равной нулю, то это приведёт к весьма жёстким условиям возникновения скользящего режима. На практике допускаются конечные частота и амплитуда колебаний управляющего элемента. При линейных обратных связях можно осуществлять переходный процесс, который после начального отклонения затухает монотонно (без колебаний), при

этом на участке замедления возникает скользящий режим. Конструктивно осуществлять и настраивать линейные связи значительно проще.

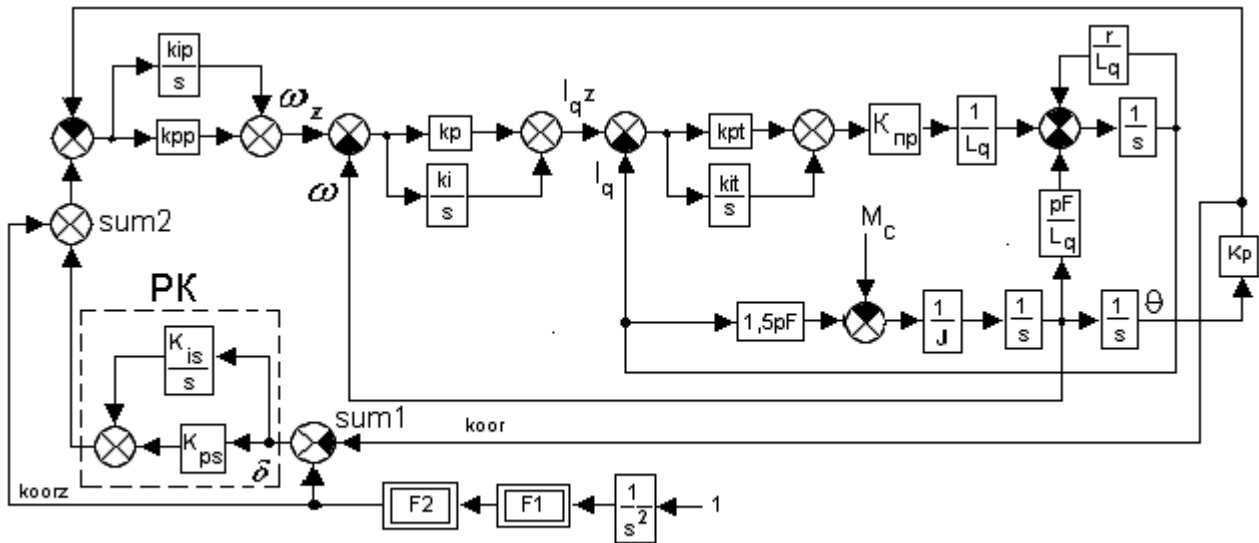


Рис. 3. Модель следящей системы с коррекцией в контуре положения

В системах с разрывными управлениями, работающих в скользящем режиме, возникают автоколебания вдоль линии переключения. Однако режим автоколебаний неприемлем для станков с ЧПУ, т. к. приводит к увеличению шероховатости поверхности и создаёт тяжёлый динамический режим работы электропривода. Решение проблемы следует искать в области линейных систем. Для перехода от релейной системы к линейной использован метод гармонической линеаризации. Согласно этому методу, в общем виде релейный элемент с гистерезисом заменяется ПИ-регулятором. Тогда система приобретает положительные свойства систем, работающих в скользящем режиме, при сохранении линейного закона управления. Для создания такой системы используется введение корректирующего устройства. В исходную систему дополнительно включены ПИ-регулятор коррекции “ПК”, сумматоры “sum1” и “sum2”, которые позволяют обеспечить скользящий режим вдоль заданной траектории (рис. 3). Так как при воспроизведении траектории фактическая координата отстаёт от заданной и ошибка имеет знак минус, корректирующее воздействие подаётся со знаком ‘+’ для компенсации ошибки. В работе показано, что для уменьшения ошибки в начале и конце кадра необходимо корректировать сигнал задания. С этой целью в модель введен функциональный блок разгона-торможения F1. Функциональный блок F2 формирует синусоидальный сигнал задания координаты в режиме круговой интерполяции.

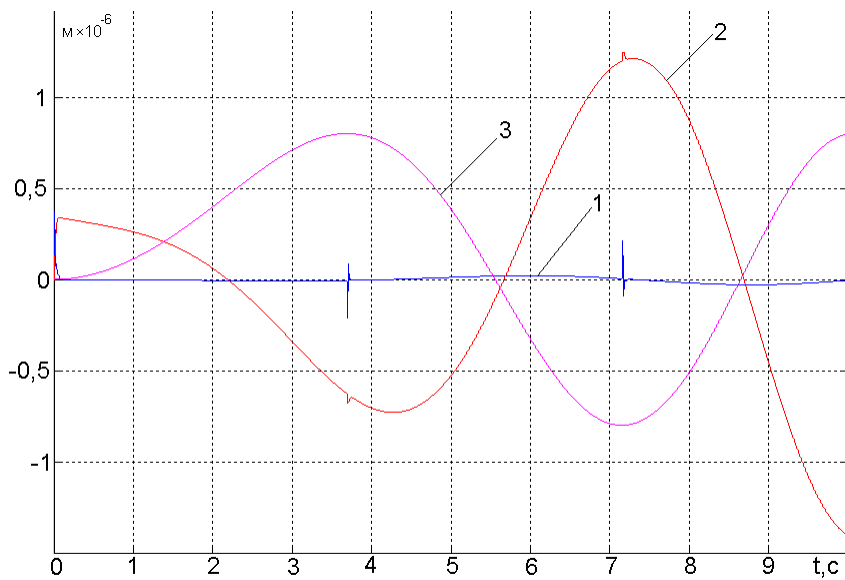


Рис. 4. Траектория движения и ошибка системы при обработке синусоидального входного сигнала

Результаты моделирования отображены на рис. 4:

- 1 - ошибка обработки координаты в системе с коррекцией в контуре положения;
- 2 - ошибка в системе без коррекции в масштабе 1:10;
- 3 - изменение координаты в масштабе 1:100000. Как видно из графика, введение коррекции в контур положения повысило

точность обработки координаты в установившемся режиме приблизительно на два порядка, и с учётом участка разгона и влияния внешних возмущений величина ошибки не превышает 0,5 мкм. Скорость рабочей подачи задана равной 1/3 скорости быстрого хода.

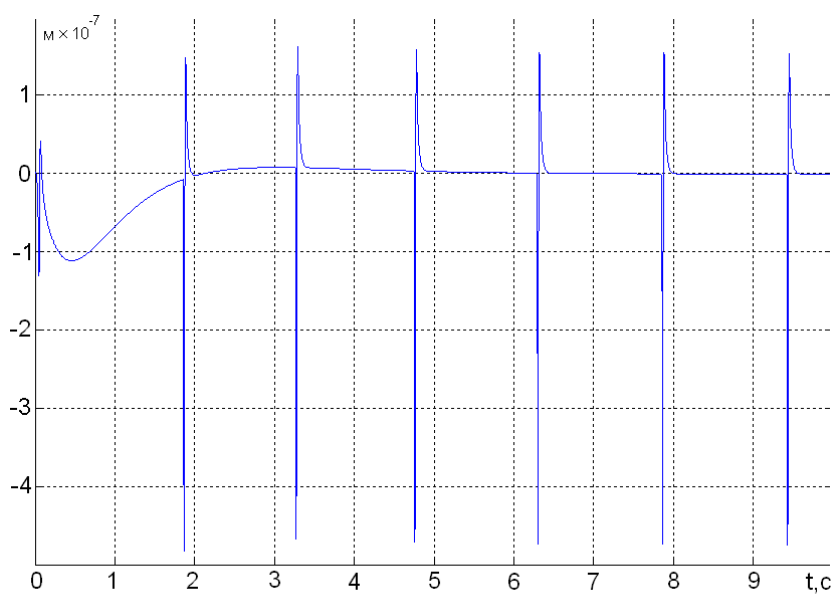


Рис. 5. Ошибка системы при обработке окружности

Учитывая, что контуры большинства деталей, обрабатываемых на станках, ограничены отрезками прямых и дугами окружностей (до 95%), произведена оценка точности воспроизведения более сложной траектории, которой является дуга окружности. На рис. 5 отображена контурная

ошибка системы при воспроизведении окружности. Из сопоставления двух графиков (рис. 4 и 5) следует, что при использовании дополнительной коррекции в контуре положения величина контурной ошибки при обработке траектории приблизительно совпадает с величиной ошибки по отдельной координате и не превышает 0,5 мкм. Каждый всплеск кривой ошибки на графике (рис. 5) обусловлен изменением направления движения по одной из координатных осей X или Y и, как следствие, изменением знака момента нагрузки.

Разгон и торможение электропривода подачи могут осуществляться по различным законам. На временных диаграммах (рис. 6) приведены ошибки обработки траектории по

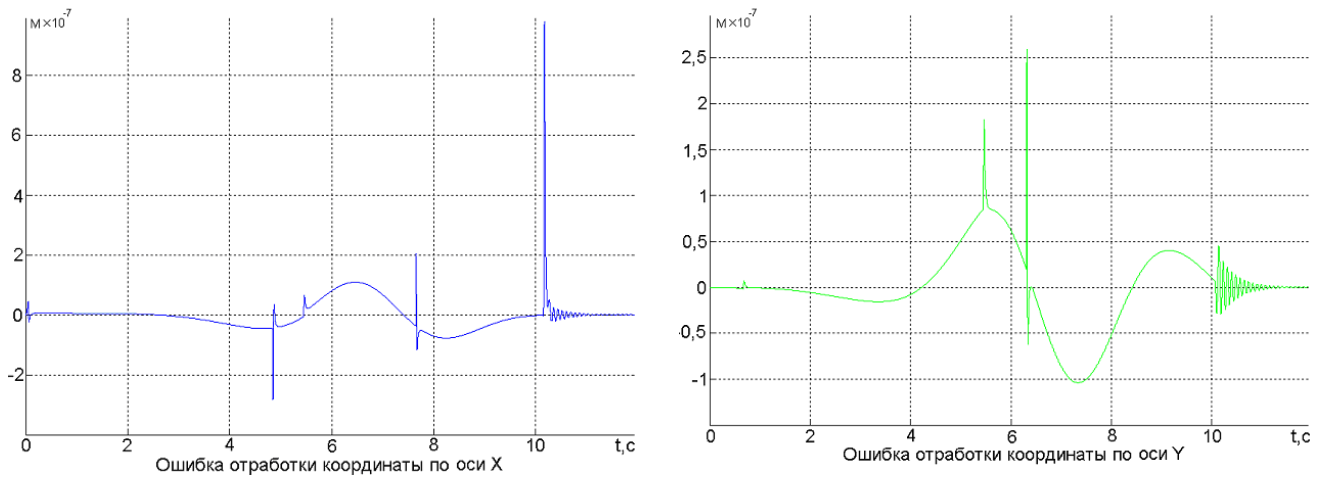


Рис. 6. Временные диаграммы

координатным осям с учётом S-образного закона разгона-торможения. При движении по траектории величины динамических ошибок по координатам X и Y совпадают. Всплеск кривых ошибки на графиках происходит вследствие изменения направления движения по каждой из координатных осей X или Y и, как следствие, изменения знака момента нагрузки, а также в моменты начала и окончания торможения.

Простота разработанного метода коррекции траектории создаёт предпосылки для его реализации в цифровом регуляторе положения. Предложенный вариант структурной схемы следящего привода обеспечивает высокую точность воспроизведения траекторий и по этому показателю отвечает стандарту ISO.

В четвёртой главе разработана методика расчёта параметров регуляторов по условию точности. Исследования на модели показали высокую эффективность предложенного способа коррекции системы, однако моделирование позволяет получить только частные решения задачи. Для получения общих закономерностей применены аналитические методы исследования, которые позволяют связать показатели качества электропривода с точностью обработки.

Исследования характеристик следящего привода на модели показали, что исходная система управления может быть описана передаточной функцией третьего порядка:

$$\Phi(s) = \frac{a_2s + a_3}{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3}.$$

Параметры регуляторов и желаемая передаточная функции синтезированы на основе нормированной передаточной функции, которая характеризуется известными законами распределения нулей и полюсов. Коэффициенты нормированной передаточной функции выбирались по законам геометрической прогрессии с показателем прогрессии q . В этом случае нормированная передаточная функция третьего порядка принимает вид:

$$\Phi_H(s) = \frac{(q + q^2 + q^3)s + q^3}{s^3 + (1 + q + q^2)s^2 + (q + q^2 + q^3)s + q^3}. \quad \text{Изменяя показатель прогрессии можно}$$

обеспечить любое заданное перерегулирование, однако, большие значения q приведут к излишне большим коэффициентам усиления, поэтому рекомендуется выбирать $q = 2 \div 6$. В этом случае перерегулирование не будет превышать 25%.

При формировании желаемой передаточной функции коэффициенты последней можно изменять вводя масштаб времени m_t , при этом значения нулей и полюсов изменяются, но законы их распределения остаются прежними. Передаточная функция преобразуется к виду:

$$\Phi_H(m_t \cdot s) = \frac{m_t(q + q^2 + q^3)s + q^3}{m_t^3 s^3 + m_t^2(1 + q + q^2)s^2 + m_t(q + q^2 + q^3)s + q^3}. \quad (1)$$

Нормированной передаточной функции вида (1) соответствует передаточная функция разомкнутой системы $W_H(s)$:

$$W_H(s) = \frac{m_t(q + q^2 + q^3)s + q^3}{m_t^3 s^3 + m_t^2(1 + q + q^2)s^2} = \frac{m_t(q + q^2 + q^3)s + q^3}{m_t^2 s(1 + q + q^2)} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{\frac{m_t}{1 + q + q^2}s + 1}.$$

Полученное выражение можно трактовать следующим образом:

$$W_{pn} = \frac{m_t(q + q^2 + q^3)s + q^3}{m_t^2 s(1 + q + q^2)} - \text{передаточная функция ПИ-регулятора положения,}$$

$$W_c = \frac{1}{\frac{m_t}{1 + q + q^2}s + 1} - \text{эквивалентная передаточная функция оптимизированного контура}$$

скорости,

$$t_c = \frac{m_t}{1 + q + q^2} - \text{эквивалентная постоянная времени контура скорости, которая определяет}$$

полосу пропускания системы. Сделаем подстановку: $m_t = t_c(1 + q + q^2)$. Тогда:

$$K_{pp} = \frac{m_t(q + q^2 + q^3)}{m_t^2(1 + q + q^2)} = \frac{q}{m_t} = \frac{q}{t_c(1 + q + q^2)} \quad (2); \quad K_{ip} = \frac{q^3}{m_t^2(1 + q + q^2)} = \frac{q^3}{t_c^2(1 + q + q^2)^3}. \quad (3).$$

Величина t_c определяется полосой пропускания регулируемого электропривода, которая составляет 30-40 с⁻¹ для преобразователей по схеме трёхфазного управляемого выпрямителя, 60-90 с⁻¹ для шестифазного и 100-120 с⁻¹ для векторного электропривода. Таким образом, зная полосу пропускания регулируемого электропривода, можно по формулам (2) и (3) вычислить параметры регулятора положения.

Выбор параметров корректирующего звена производится исходя из требований устойчивости, точности и запаса устойчивости.

Передаточная функция системы с коррекцией (рис. 7) имеет вид:

$$\Phi_K(s) = \frac{a_2(1 + K_{ps}) \cdot s^2 + (a_3 + a_3K_{ps} + a_2K_{is}) \cdot s + a_3K_{is}}{a_0s^4 + a_1s^3 + a_2(1 + K_{ps}) \cdot s^2 + (a_3 + a_3K_{ps} + a_2K_{is}) \cdot s + a_3K_{is}}$$

Определение области устойчивости системы можно произвести на основании

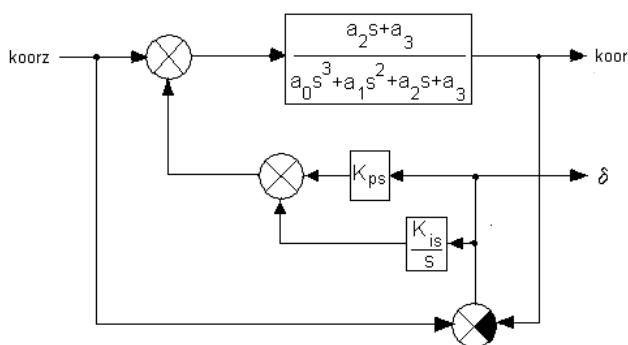


Рис. 7. Структурная схема системы с коррекцией

характеристического уравнения. Если

коэффициенты передаточной функции (1)

исходной системы $a_0 - a_3$ распределены по законам геометрической прогрессии:

$$\begin{aligned} a_0 &= m_t^3, & a_1 &= m_t^2(1 + q + q^2), \\ a_2 &= m_t(q + q^2 + q^3), & a_3 &= q^3, \end{aligned} \quad (4)$$

то характеристическое уравнение

системы с коррекцией имеет вид;

$$m_t^3s^4 + m_t^2(1 + q + q^2)s^3 + m_t(q + q^2 + q^3)(1 + K_{ps}) \cdot s^2 + [q^3 + q^3K_{ps} + m_t(q + q^2 + q^3)K_{is}]s + q^3K_{is} = 0.$$

Диаграммы для определения области устойчивости системы по критерию Гурвица в зависимости от параметров ПИ-регулятора коррекции построены на рис. 8:

$F_{кр.уст1} = A_1A_2 - A_0A_3$; $F_{кр.уст2} = A_1A_2A_3 - A_0A_3^2 - A_1^2A_4$. Область допустимых значений

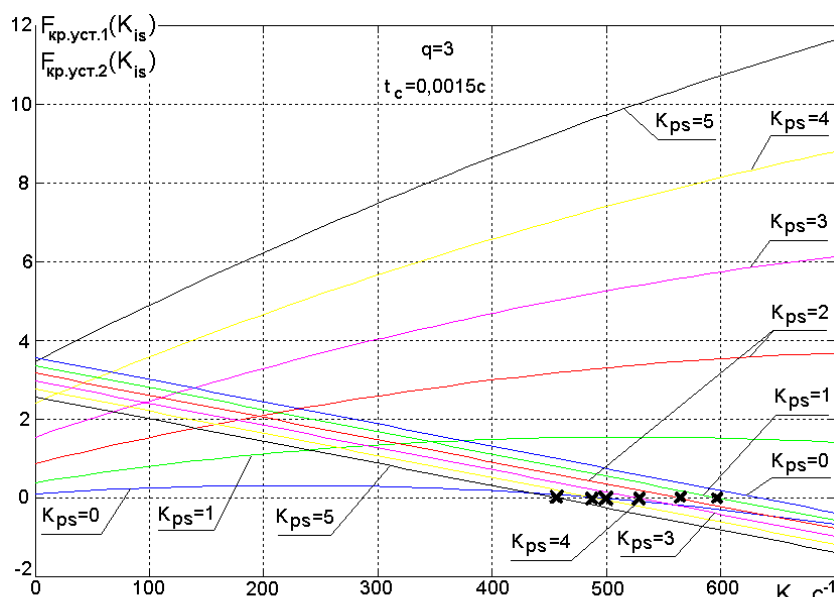


Рис. 8. Диаграммы $F_{кр.уст.1}(K_{is})$ и $F_{кр.уст.2}(K_{is})$

параметра K_{is} находится на оси абсцисс слева от кривых $F_{кр.уст1}(K_{is})$ и $F_{кр.уст2}(K_{is})$.

Предельные значения коэффициента K_{is} (порог устойчивости) для каждого наперед заданного значения K_{ps} определяются точками пересечения кривых с осью абсцисс $F_{кр.уст} = 0$ (отмечены крестиками).

В общем виде точность системы характеризуется модулем передаточной функции $|\Phi(j\omega_\theta)|$ при заданном управляющем воздействии. Равенство $|\Phi(j\omega_\theta)| = 1$ обеспечивает нулевую контурную ошибку. Фактическая относительная ошибка равна: $E = 1 - |\Phi(j\omega_\theta)|$.

Оценка запаса устойчивости произведена по показателю колебательности: $M = |\Phi(j\omega)|_{max}$.

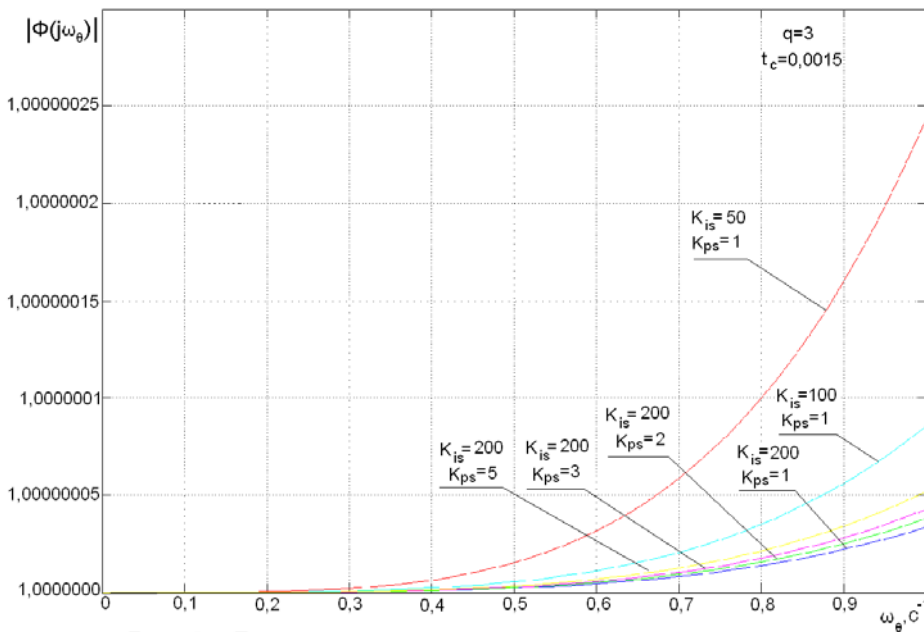


Рис. 9. Диаграмма для определения точности системы

Характеристики $|\Phi(j\omega)| = f(\omega)$ для определения точности и показателя колебательности представлены на диаграммах (рис. 9 и 10). Из диаграммы на рис. 9 можно определить зависимость ошибки системы от коэффициентов K_{ps} и K_{is} : незначительное

увеличение ошибки при увеличении K_{ps} и значительное уменьшение ошибки при увеличении K_{is} . Однако чрезмерное увеличение коэффициента K_{is} приводит к потере устойчивости (см. рис. 8). Следует отметить, что предложенный метод коррекции в контуре положения обеспечивает высокую точность воспроизведения траекторий: отклонение $E = 1 - |\Phi(j\omega_0)|$ представляет весьма незначительную величину. Относительная ошибка составляет доли процента.

На диаграмме рис. 10 отмечены величины показателей колебательности M1 – M6 для

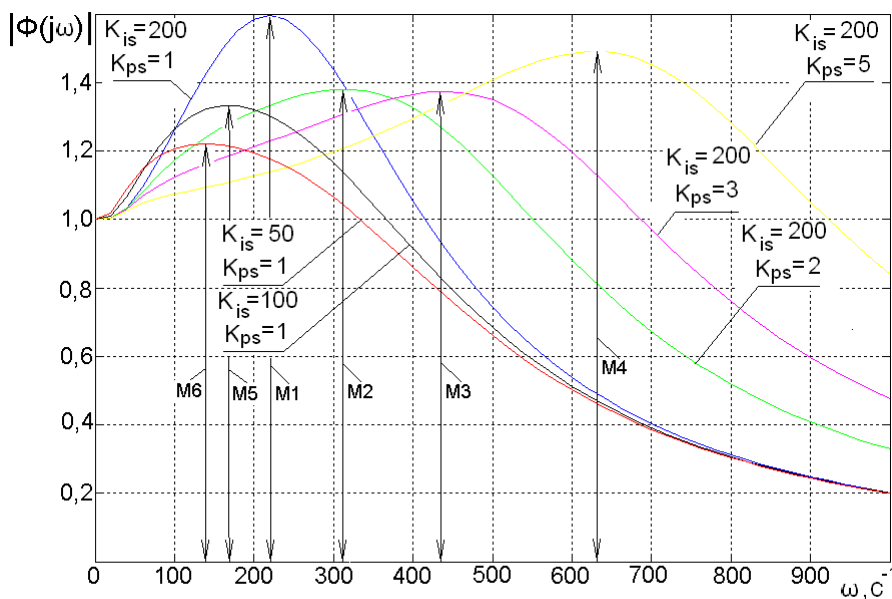


Рис. 10. Диаграмма для определения показателя колебательности

нескольких рассмотренных примеров. Считается, что в хорошо демпфированных системах показатель колебательности не должен превосходить значений $1,1 \div 1,5$, хотя в некоторых случаях можно допускать величины до $2 \div 2,5$.

Представленные

переходные процессы на рис. 6 соответствуют случаю $K_{ps} = 1$ и $K_{is} = 200$. Изменение K_{is} от 50 до 200 (при $K_{ps} = 1$) на диаграмме (рис. 10) приводит к увеличению показателя колебательности, демпфирование системы ухудшается, переходный процесс становится колебательным. Моделирование показало, что колебательность наиболее сильно влияет на процесс торможения: точность отработки траектории снижается, создаются предпосылки для увеличения шероховатости поверхности.

Величина моментной погрешности может быть рассчитана при помощи передаточной функции по возмущающему воздействию: $\delta_M = \frac{W_f(s)}{1+W(s)} \cdot M_c$, где

$$W_f(s) = -\frac{r \left(\frac{L_q}{r} s + 1 \right)}{JL_q s^2 + Jrs + 1,5 p^2 F^2} \cdot \frac{1}{s}$$

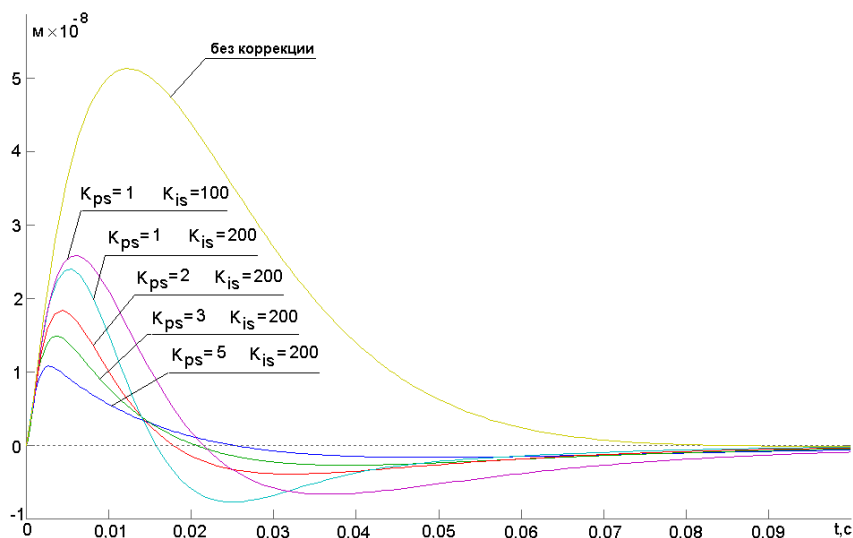
- передаточная функция объекта регулирования по возмущающему воздействию, $W(s)$ - передаточная функция разомкнутой системы. Для системы с коррекцией в контуре положения:

$W(s) = W_K(s) = \frac{a_2(1 + K_{ps}) \cdot s^2 + (a_3 + a_3 K_{ps} + a_2 K_{is}) \cdot s + a_3 K_{is}}{a_0 s^4 + a_1 s^3}$.

С учётом обозначений (2) - (4) получаем:

$$W_K(s) = \left[K_{pp} (1 + K_{ps}) + \left(K_{ip} + \frac{a_3 K_{ps}}{a_1} + \frac{a_2 K_{is}}{a_1} \right) \cdot \frac{1}{s} + \frac{a_3 K_{is}}{a_1 s^2} \right] \cdot \frac{1}{t_c s + 1} \cdot \frac{1}{s}$$

Введение коррекции в контур положения привело к увеличению коэффициента усиления регулятора положения и, как следствие, к снижению моментной погрешности, на



величину которой наиболее сильно влияет значение коэффициента K_{ps} . График переходных характеристик для моментной погрешности δ_M приведён на рис. 11.

Синтез регулятора положения системы ЧПУ следует осуществлять на

основе нормированных передаточных функций, коэффициенты которой целесообразно выбирать по законам геометрической прогрессии. Исходным параметром для расчёта

является значение полосы пропускания регулируемого электропривода. Приведена методика выбора параметров ПИ-регулятора коррекции K_{ps} и K_{is} на основании компьютерных расчётов. Повышение точности обработки при сохранении прежней колебательности не приводит к увеличению шероховатости обрабатываемой поверхности.

В пятой главе выполнено сопоставление однонаправленной и двунаправленной систем. Определены перспективные пути совершенствования систем ЧПУ.

Реальный механизм подвержен упругим деформациям, как правило, имеет люфт в кинематической цепи. В качестве датчиков координат применяются преобразователи линейных и угловых перемещений с высокой разрешающей способностью, которые устанавливаются на конечном кинематическом звене.

Реализация повышенных требований к точности станков с ЧПУ привели к созданию конструкций, в которых податливость элементов и узлов механической части в среднем на 40-50% меньше чем податливость аналогичных узлов универсального металлорежущего оборудования. Линейная податливость различных передач, применяемых в станках с ЧПУ,

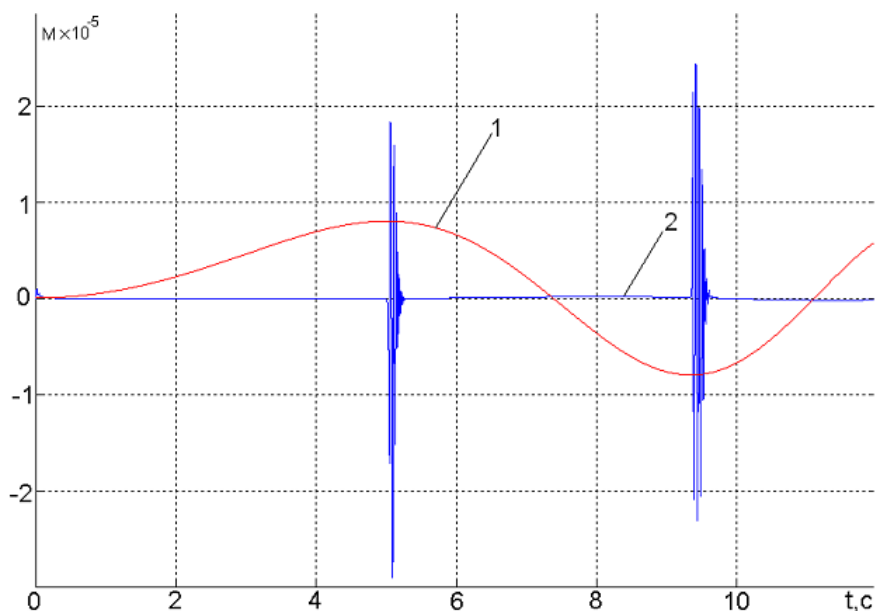


Рис. 12. Траектория движения и ошибка системы с люфтом в редукторе при отработке синусоидального входного сигнала

имеет порядок 10^{-9} м/Н. Уменьшение зазоров в передачах станков с ЧПУ достигается применением прецизионных кинематических пар. Величина люфта в таких передачах имеет порядок 10^{-5} м. Величина минимальной дискреты преобразователя линейных перемещений составляет 10^{-7} м. Проведён анализ точности

воспроизведения траектории в системе с коррекцией в контуре положения для металлообрабатывающих станков с данными характеристиками.

Результат моделирования приведён на рис. 12. На этом графике кривая 1 отображает изменение координаты в масштабе 1:10000, а кривая 2 – ошибку отработки координаты в метрах. Как видно из графиков, система с упруговязкой передачей при низком значении величины податливости ($e = 3 \cdot 10^{-9}$ м/Н) узлов станков с ЧПУ сохраняет высокую точность отработки траектории при движении в установившемся режиме: величина ошибки не превышает 0,7 мкм. В процессе выборки люфта точность отработки заданной координаты

резко снижается (в данном примере – 0,05мм), могут возникать колебания.

Наличие люфта уменьшает область устойчивости системы. Срыв автоколебаний осуществляется за счёт уменьшения коэффициентов K_{ps} и K_{is} в ПИ-регуляторе коррекции. Однако, благодаря применению коррекции в контуре положения, точность воспроизведения траектории в установившемся режиме остаётся высокой. Для учёта люфтов в следящей системе требуется устанавливать два датчика положения: один - на исполнительный двигатель, другой – на оконечное кинематическое звено. Сигнал выборки люфта используется при формировании корректирующего сигнала. Дискретность датчиков положения в 0,1ммк при воспроизведении траектории не вносит существенной дополнительной погрешности.

Дальнейшее повышение точности станков с ЧПУ возможно при полном исключении люфта механизма.

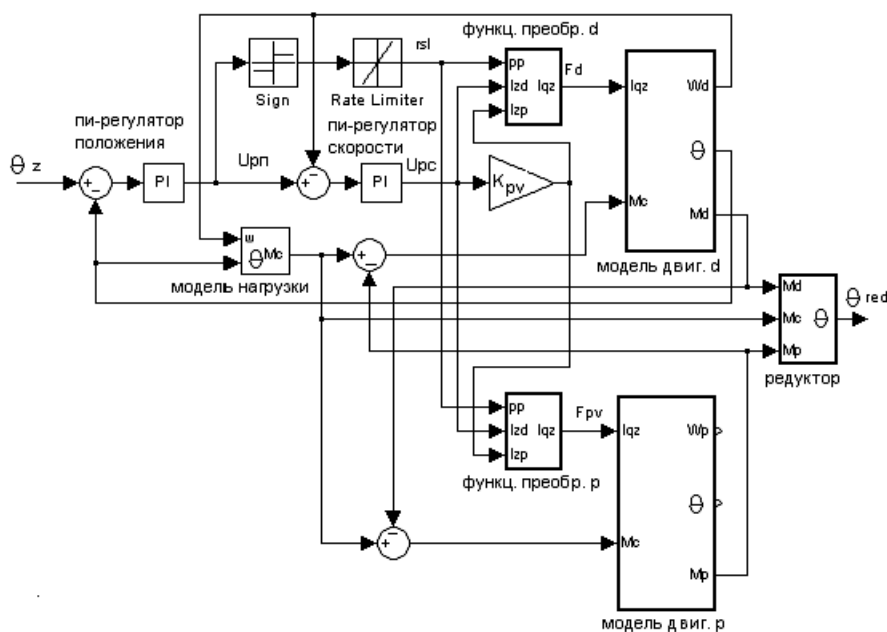


Рис. 13. Модель двунаправленной системы

люфта механизма. В двунаправленной системе перемещение по координатной оси контролируется двумя двигателями, причем один из них работает в двигательном режиме, а другой - в тормозном, осуществляя силовое замыкание кинематической цепи. При смене направления

движения соответственно меняются режимы работы двигателей.

Для исследования двунаправленных систем предложена модель (рис. 13), в которой исполнительные двигатели работают в режиме “ведущий-ведомый”. При этом ведомый в качестве задающего сигнала получает сигнал заданного значения тока ведущего. Ведомый двигатель работает в режиме регулирования момента и создаёт момент, пропорциональный моменту ведущего двигателя, обеспечивая силовое замыкание кинематической цепи. Двунаправленные системы позволяют заменить оборудование с параллельной кинематикой и тем самым упростить кинематическую схему станка за счёт развития системы ЧПУ.

В предложенной модели сигнал с выхода регулятора скорости поступает на вход функциональных блоков, где формируются сигналы задания токов двигателей с учетом знака сигнала рассогласования на выходе регулятора положения. Ограничитель крутизны “Rate

“Limiter” характеризуется параметром “rsl”, служит для уменьшения ударных нагрузок в механизме при смене направления движения и подбирается из условия сохранения достигнутой точности воспроизведения траектории. Функциональные блоки реализуют функцию логического ИЛИ: двигательный ИЛИ тормозной режим работы двигателя устанавливается в зависимости от знака сигнала на выходе регулятора положения.

Силовое замыкание кинематической цепи в двунаправленных системах устраняет люфт в механизме, в сочетании с коррекцией в контуре положения позволяет добиться высокой точности воспроизведения траектории.

При создании двунаправленных систем появляется необходимость вводить в устройство ЧПУ регулятор скорости, а стыковку со следящим приводом произвести (рис. 1) по сечению 2-2', так как в двунаправленной системе один регулятор скорости воздействует на два блока электропривода.

Проведенный анализ показывает, что применение двунаправленных систем ЧПУ с коррекцией в контуре положения позволяет решить проблему точности металлообрабатывающих станков, однако это требует кардинального изменения в системе ЧПУ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты теоретических исследований и проведённого моделирования заключаются в следующем:

1. Определены основные причины появления ошибок при воспроизведении траектории в станках с ЧПУ.
2. Разработаны математические и компьютерные модели электромеханических систем приводов подач металлорежущих станков с учётом и без учёта параметров кинематической цепи. Эти модели позволяют исследовать статические и динамические характеристики и оценивать влияние различных факторов на точность обработки.
3. Предложена система управления, отличающаяся наличием дополнительной коррекции в контуре положения, позволяющая значительно увеличить точность.
4. Разработана методика расчёта регуляторов следящих приводов подач.
5. Проанализированы варианты кинематических схем металлорежущих станков и сделан вывод о целесообразности:
 - установки двух датчиков положения: на исполнительный двигатель и на оконечное кинематическое звено - для фиксации выборки люфта в системе с коррекцией в контуре положения;
 - применения двунаправленных систем взамен станков с параллельной кинематикой.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Капулкин Б. С., Семёнов И.М. Системы управления станками повышенной точности// Научно-технические ведомости СПбГТУ: Сборник научных трудов/Изд-во Политехнического университета. - СПб.: - 2006. - № 5-1(47).- с. 178-185.

публикации в других изданиях:

2. Капулкин Б.С Исследование станков с ЧПУ повышенной точности. Вычислительные, измерительные и управляющие системы: Сборник научных трудов/Под редакцией Ю.Б. Сениченкова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005.- с. 114-122.

3. Капулкин Б. С., Семёнов И. М. Следящий привод станков с ЧПУ с коррекцией в контуре положения//Составляющие научно-технического прогресса: Сборник материалов 2-й международной научно-практической конференции (21-22 апреля 2006 г., Тамбов). – Тамбов: Першина, 2006.- с. 80-87.

4. Капулкин Б.С., Семёнов И.М. Синтез систем ЧПУ из условий точности. Вычислительные, измерительные и управляющие системы: Сборник научных трудов/Под редакцией Ю.Б. Сениченкова. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.- с. 40-46.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД В РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В СОАВТОРСТВЕ

В работе [3] выполнена постановка задачи исследований, произведено упрощение математической модели следящего электропривода, предложен способ коррекции траектории на основании теории скользящих систем, произведён анализ устойчивости на основании критерия Гурвица.

В работе [4] путём моделирования обосновано использование нормированных передаточных функций для синтеза желаемой передаточной функции следящего электропривода, разработана методика расчёта ПИ-регулятора положения и произведён аналитический расчёт точности.

В работе [1] приведена модель электропривода координат с учётом зазора в редукторе и упруго-диссипативных свойств его передач; приведена модель двунаправленной системы с коррекцией в контуре положения; приведены результаты компьютерного моделирования воспроизведения траекторий для таких систем. Сделан вывод о том, что применение двунаправленных кинематических передач и систем ЧПУ с коррекцией в контуре положения позволяет решить проблему точности металлообрабатывающих станков.