

На правах рукописи

Мостовой Владимир Дмитриевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ
ПУТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Научный руководитель: Бирюков Владимир Петрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Плотников Александр Леонтьевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов»
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
Порватов Артур Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электро-техники, электроники и автоматики»
ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Ведущая организация: ФГБУН «Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук»

Защита состоится «_____» _____ 202_ г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим выслать в двух экземплярах по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан «_____» _____ 2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Богданов Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наличие повышенных деформаций при металлообработке нежестких валов при высоких требованиях к качеству обработанных изделий приводит к необходимости снижения режимов резания, что в свою очередь приводит к падению производительности обработки и снижению эффективности использования современных станков. Возможным путем обеспечения высокой производительности без снижения точности обработки является применение адаптивных систем управления процессами резания, направленных на компенсацию деформаций путем обработки по траекториям предыскажения и отработку влияния неконтролируемых возмущающих воздействий путем корректировки режимных параметров.

Следует отметить сложность управления точностными показателями обработанных изделий вследствие большой инерционности контуров управления при широкополосном спектре возмущающих воздействий. Поэтому большое количество разработок посвящено стабилизации промежуточных параметров процессов резания: силы резания, деформации упругих элементов и др. Эти системы управления, вследствие меньшей инерционности, являются более эффективными, что позволяет частично компенсировать неконтролируемые возмущающие воздействия и тем самым несколько повысить показатели качества обработанных деталей. Однако их эффективность также ограничена широкополосностью спектра неконтролируемых возмущений, недостаточным быстродействием исполнительных механизмов, взаимосвязями систем через объект управления и генерацией дополнительных возмущающих воздействий, возникновением автоколебаний, вследствие появления замкнутых контуров механических систем с положительной обратной связью. Поэтому повышение производительности токарной обработки методами управления, изучение динамики и разработка систем управления качественными показателями обрабатываемых деталей и промежуточными параметрами процесса резания является актуальной научной и практической задачей.

Целью диссертационной работы является повышение производительности токарной обработки нежестких валов с заданной точностью путем обработки по траекториям предыскажения с расширением частотного диапазона эффективной работы системы управления силой резания, исключением автоколебаний путем компенсации взаимосвязи контуров и обеспечение эффективной работы при неустойчивости параметров объекта управления.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- построены математические модели процесса токарной обработки нежестких валов как многомерного взаимосвязного объекта управления продольным профилем, силой резания, положением резца по поперечной оси для построения системы управления, обеспечивающей повышение производительности при заданной точности.
- исследованы закономерности взаимосвязи контуров управления по продольной и поперечной подачам при токарной обработке, приводящие к взаимной генерации друг на друга дополнительных возмущающих воздействий, появлению автоколебаний, вследствие образования замкнутых контуров механической системы

с положительной обратной связью; решены задачи компенсации взаимного влияния контуров управления путем ввода каналов динамической компенсации и повышения быстродействия контура управления силой резания.

- выявлены условия обеспечения совместной работы двух контуров управления на одно управляющее воздействие - силу резания при токарной обработке нежестких валов, позволяющие устранить взаимосвязь данных контуров.

- разработана система управления силой резания в процессе точения нежестких валов, позволяющая повысить производительность при заданной точности путем уменьшения влияния случайных возмущений на контур управления продольным профилем, компенсации взаимосвязи контуров и устранения взаимной генерации возмущений и автоколебаний за счет расширения частотного диапазона эффективной работы путем совместного применения низкочастотного и высокочастотного (быстродействующего) контуров управления.

- разработана многомерная многосвязная система управления продольным профилем нежесткого вала с новой структурой, обеспечивающая повышение производительности токарной обработки при заданной точности, включающая внешний контур нахождения и корректировки по обратной связи траектории предыскажения, следящую систему реализации траектории предыскажения, систему стабилизации силы резания с двумя исполнительными механизмами на одно управляющее воздействие и внутренним контуром управления удлинением пьезоэлемента.

Научная новизна работы. На основе полученных моделей процесса токарной обработки как взаимосвязного объекта управления:

1. предложена система управления силой резания с двумя контурами по продольной подаче, позволяющая расширить частотную зону эффективной работы, повысить ее устойчивость, уменьшить среднечастотные возмущения на контур управления продольным профилем, устранить генерацию взаимных возмущений контуров управления силой резания и положением резца по поперечной оси, уменьшить вероятность возникновения автоколебаний механической системы;

2. показано, что контур стабилизации текущего среднего удлинения пьезоэлемента выполняет роль фильтра высоких частот, обеспечивает частотную развязку контуров управления силой резания, автоматизированное перераспределение управляющего воздействия между контурами, исключает попадание пьезоэлемента в зону насыщения;

3. разработана система управления продольным профилем нежестких валов, позволяющая повысить производительность и точность обработки за счёт уменьшения влияния нестабильности жесткости технологической системы и случайных возмущений.

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных методов исследования, представительными выборками экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласованностью построенных математических моделей с экспериментальными данными и результатами других авторов, использованием современных методов анализа и синтеза систем управления, применением метрологически обеспеченного оборудования и современного лицензионного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Система управления силой резания при токарной обработке, включающая низкочастотный и высокочастотный контура управления, соответственно, с двигателем продольной подачи и пьезоэлементом в качестве исполнительных механизмов, что позволило расширить частотный диапазон эффективной работы системы, уменьшить влияние среднечастотных возмущений на контур управления продольным профилем нежестких валов, устранить дополнительную генерацию возмущающих воздействий контуров управления силой резания и положением резца по поперечной оси и **устранить** возможность возникновения автоколебаний механической системы станка, вследствие наличия взаимосвязи контуров и возможности образования замкнутых контуров механической системы с положительной обратной связью.

2. Алгоритм обеспечения совместной работы низкочастотного и высокочастотного контуров управления силой резания на одно управляющее воздействие, включающий фильтрацию низких частот элементами низкочастотного контура и высоких частот контуром управления по обратной связи средним удлинением пьезоэлемента, дополнительно обеспечивающим переменную частотную границу и автоматизированное перераспределение управляющего воздействия между контурами.

3. Многомерная многосвязная система управления продольным профилем нежесткого вала с новой структурой, обеспечивающая повышение производительности токарной обработки при заданной точности, включающая внешний контур нахождения и корректировки по обратной связи траектории предсказания, следящую систему реализации траектории предсказания, систему стабилизации силы резания с двумя исполнительными механизмами на одно управляющее воздействие и внутренним контуром управления удлинением пьезоэлемента, обеспечивающей снятие среднечастотных возмущений с контура управления продольным профилем и компенсацию взаимосвязи контуров управления силой резания и положением резца по поперечной оси, устранение (уменьшение вероятности возникновения) автоколебаний, обеспечение устойчивой работы системы, в том числе при изменении параметров. Применение системы управления продольным профилем позволяет повысить режимные параметры обработки, снизить продолжительность обработки до 30%, повысить точность обработки до 7 качества.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Разработаны способ и многомерная взаимосвязная система управления процессом токарной обработки, позволяющие уменьшить погрешность позиционирования резца по поперечной оси с $\varepsilon_0 = \pm 0,165$ мм до $\pm 0,008$ мм и сузить отклонение диаметра с 0,378 до 0,018 мм (7 качества) с повышением производительности до 30%. Способы частотной развязки двух исполнительных механизмов на одно управляющее воздействие и динамической компенсации взаимного воздействия контуров управления по различным каналам могут быть применены при разработке других систем управления. Результаты используются в учебном процессе на кафедре «Атомная энергетика» Балаковского инженерно-технологического института – филиала НИЯУ МИФИ и на кафедре «Технологии и системы управления в машиностроении» СГТУ им. Гагарина Ю.А. Разработанная система управления рекомендована к внедрению на АО «ТЯЖМАШ» г. Сызрань для процесса обработки валов роlikоопоры поддержки барабана вращающейся цементной печи ОР-6600, а также валов мельниц размолла для систем топливоприготовления.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и постановке задач исследований, разработке методик, проведении теоретических и экспериментальных исследований, построении математических моделей, синтезе систем управления, компьютерном моделировании разработанных систем, создании программно-аппаратного обеспечения для проведения и обработки результатов исследования пьезоактюатора как исполнительного механизма при токарной обработке и других экспериментов.

Методы и средства исследований. При теоретических исследованиях применялись теория автоматического и оптимального управления, методы исследования динамики процессов резания, статистического анализа и моделирования; экспериментальные исследования проводились на станке с ЧПУ 16K20Ф3, при этом использовались методы планирования и обработки результатов экспериментов, структурной и параметрической идентификации, метрологически обеспеченные системы измерения сил резания.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научной конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления в технических и организационных системах (Саратов, СГТУ, 2016г.), Международной научно – практической конференции «Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий» (Балаково, БИТИ НИЯУ МИФИ, 2017, 2018, 2019гг.), Международной научно – практической конференции «Современные технологии и автоматизация в технике управления и образовании» (Балаково, БИТИ НИЯУ МИФИ, 2018г.), Всероссийской заводской научно-практической конференции АО «ТЯЖМАШ» «Современные технологии в машиностроении» (Сызрань, АО «ТЯЖМАШ», 2019г.); Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение» (Балаково, БИТИ НИЯУ МИФИ, 2016г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы: 3 статьи в рекомендованных ВАК РФ изданиях: «Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе» - 2 статьи, «Автоматизация. Современные технологии» - 1 статья. Материалы, отражающие основное содержание работы, опубликованы также в 15 печатных работах, входящих в другие печатные издания.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы из 153 источников и 5 приложений. Работа изложена на 183 страницах, содержит 121 рисунок, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований, представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ автоматизированных систем управления процессами резания, разработанных в МГТУ «СТАНКИН» (Б.С. Балакшиным, Ю.М. Соломенцевым, А.Г. Схиртладзе, и др.), LLC OMATIVE (Германия), CEDRAT TECHNOLOGIES (Франция). Проблемами точности, динамики, разработки систем контроля и управления процессами металлообработки занимались В.А. Кудинов, М.С. Невельсон, В.Л. Заковоротный, С.А. Васин, В.Н. Подураев, О.И. Драчев, Ю.В. Петраков, Л.И. Волчкевич, Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.В. Мартынов, Ю.Л.

Чигиринский и другие ученые. Вопросами автоматизированной обработки нежестких валов занимались А.Л. Плотников, А.А. Жданов (ВолГТУ), А.М. Черноусова, Е.С. Шелихов (ОГУ), А.Ю. Набилкин, С.А. Кравченко (БИТТУ СГТУ). В главе рассмотрены факторы, приводящие к погрешностям обработки нежестких валов и их компенсации методами управления, процесс токарной обработки представлен как объект управления качественными показателями обрабатываемых деталей, приведена структурная схема процесса.

Повышенные деформации при обработке нежестких валов приводят к необходимости снижения режимов и потере производительности. Актуальным направлением повышения эффективности обработки нежестких валов является их обработка на относительно повышенных режимах резания по траекториям предсказания, что позволяет исключить бочкообразность. На основе данного подхода предложен технологический процесс обработки нежестких валов типа дорн для изготовления трубчатых деталей из композиционных материалов с 4 проходами по траектории предсказания и корректировкой траектории для 4-го прохода по результатам измерения предыдущей детали. Для реализации технологического процесса предложена система управления продольным профилем.

Для формирования траектории предсказания по результатам обработки серии валов (Рис. 1,а) построена полиномиальная математическая модель изменения диаметра по длине дорна (Рис. 1,б). Данная модель показала большую адекватность ($R^2=0,65$) по

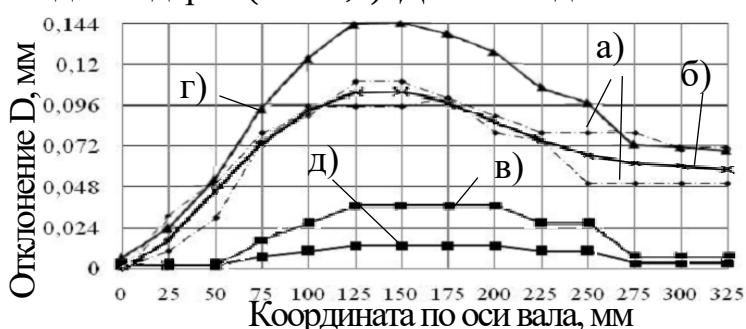


Рис. 1. а) профиль валов, обработанных без предсказания; б) траектория предсказания; в) профиль вала, обработанного по траектории «б»»; г) скорректированная траектория предсказания; д) профиль вала, обработанного по траектории «г»»

сравнению с классической моделью ($R^2=0,55$). Построение моделей для каждого вала позволило дополнительно повысить адекватность $R^2=0,85 - 0,95$. Это говорит о возможности применения технологии обработки нежестких валов по траекториям предсказания с необходимостью их корректировки. Поэтому траектория предсказания представлена как сумма усредненной траектории, определяемой по данной модели, и

случайной дополнительной траектории, вследствие дополнительного поджатия вала при обработке по траектории предсказания и, вследствие влияния неконтролируемых возмущений, влияющих на деформацию и, соответственно, на траекторию (Рис. 1,г).

На Рис. 2 представлена разработанная в БИТИ НИЯУ МИФИ автоматизированная система, обеспечивающая управление процессом токарной обработки нежестких валов по траекториям предсказания. Система, содержит вычислительное устройство ВУ прямого канала управления (I), которое по регрессионной модели рассчитывает усредненную траекторию движения резца по поперечной оси $y_{пр}(x)$ (Рис. 1,б), компенсирующую в процессе резания систематическую ошибку.

Компенсация изменения профиля под действием неконтролируемых возмущающих воздействий производится по обратной связи пятиканальным стохастическим

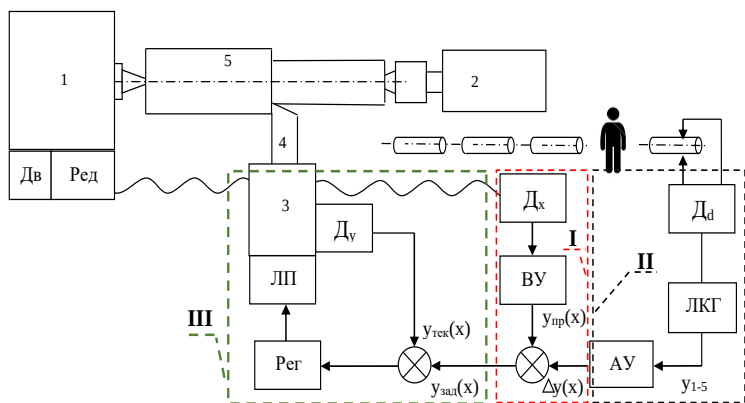


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированной системы управления продольным профилем нежесткого вала в процессе токарной обработки прибавляется к полученной по математической модели траектории. Это позволило свести управление объектом с распределенными параметрами к управлению объектом с сосредоточенными параметрами.

Скорректированная траектория движения режущего инструмента по поперечной оси при движении суппорта по продольной оси (Рис. 1,г) обрабатывается следящей системой(III), включающей Per – ПИД регулятор, $ЛП$ -привод, $Ду$ – датчик положения по оси У. Анализ взаимного расположения АЧХ системы по возмущению и спектральной плотности возмущения и математическое моделирование показали, что она может быть эффективной при замере каждой 4-й детали. Эффективность повышается при замере третьей, второй и каждой детали (Рис. 3,а, 3,б, линия $K_{эф1}$). Однако система имеет большую чувствительность к среднечастотным возмущающим воздействиям. Увеличение интенсивности среднечастотных возмущений от линии 1 до линии 2(Рис. 3,а) приводит к снижению интенсивности системы и практически сводит на нет повышение эффективности за счет повышения частоты измерения валов (Рис. 3,б, линия $K_{эф2}$).

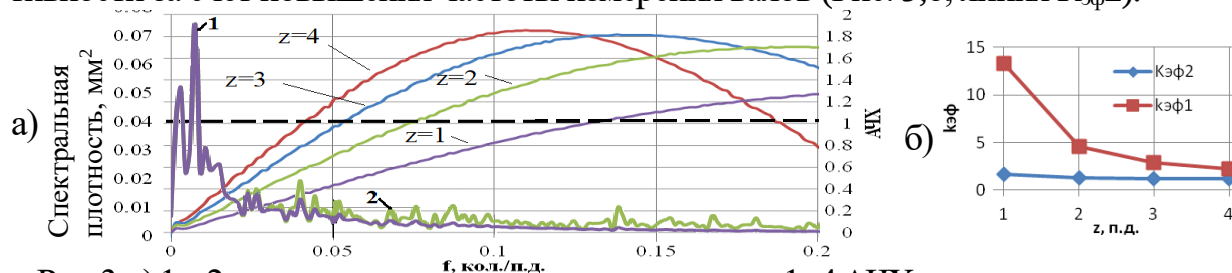


Рис. 3. а) 1 и 2 спектральная плотность возмущения; $z=1..4$ АЧХ системы по возмущению; б) коэффициенты эффективности системы при $z=1-4$ для спектр. плотностей: $K_{эф1}$; $K_{эф2}$

Возможным вариантом уменьшения влияния среднечастотных возмущений может быть создание более быстродействующих контуров управления промежуточными параметрами, например силой резания, что позволяет не допустить влияния возмущений на качественные показатели обработанных валов. Однако математическое моделирование работы типовой системы регулирования силы резания путем корректировки продольной подачи показало недостаточность данного подхода для решения обозначенной задачи. Частотный диапазон эффективной работы данной системы составляет от 0 до 3.1 Гц (Рис. 4 I,а), в то время как возмущающие воздействия имеют высокую интенсивность вплоть до 6 Гц (Рис. 4 I,в). При этом, значительная часть возмущающих воздействий находится в зоне положительной обратной связи системы и их влияние системой усиливается.

линейно-квадратичным гауссовым регулятором внешнего контура $ЛКГ$ (II). Регулятор по результатам измерений в пяти точках диаметра обработанного вала рассчитывает корректировки траектории в данных точках. Аппроксимирующее устройство $АУ$ по данным корректировкам рассчитывает поправочную траекторию $\Delta y(x)$ для всего вала, которая

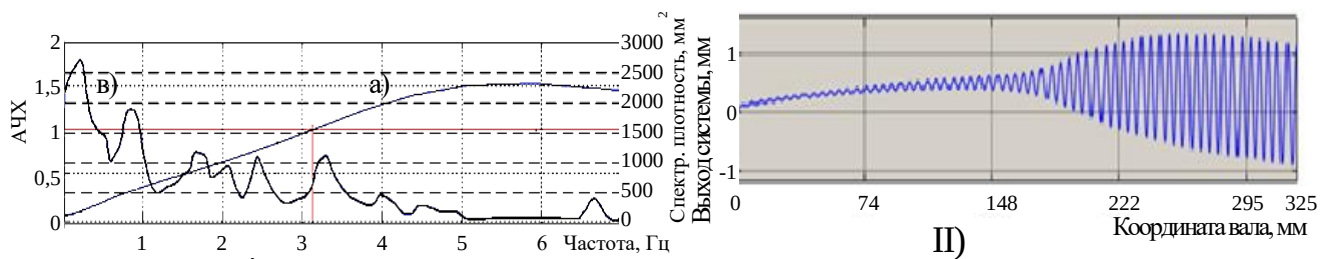


Рис. 4. I) а) - АЧХ; в) - спектральная плотность контура управления силой резания;
II) выход системы управления по положению режущего инструмента

Кроме того, моделирование совместной работы систем управления силой резания и положением резца по поперечной оси показало возможность возникновения автоколебаний элементов механической системы станка, вследствие взаимосвязи контуров через объект управления (Рис. 4 II). Выявленные факторы ограничивают применение систем управления процессами резания. Недостаточное быстродействие системы регулирования силы резания с двигателем продольной подачи, сложность реализации и снижение эффективности компенсации взаимосвязи при изменении характеристик ОУ полученного в диссертационной работе Кравченко С.А. решения по компенсации взаимосвязи систем управления показывают актуальность решения данных задач.

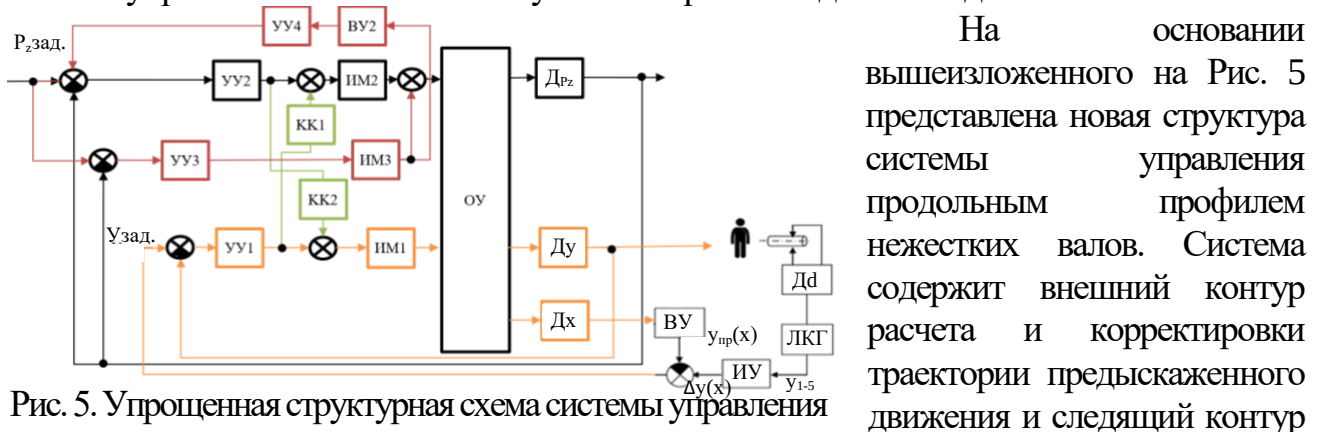


Рис. 5. Упрощенная структурная схема системы управления

управления, аналогичные исходной системе. Для расширения частотного диапазона эффективной работы разработанная система включает два контура стабилизации силы резания. Первый контур включает датчик силы резания $ДРz$, управляющее устройство $УУ2$, привод продольной подачи $ИМ2$ в качестве исполнительного механизма. Второй контур включает датчик силы резания $ДРz$, управляющее устройство $УУ3$, пьезоактюатор $ИМ3$ в качестве быстродействующего исполнительного механизма, скорость удлинения которого корректирует продольную подачу режущего инструмента. Вычислительное устройство $ВУ2$ определяет текущее среднее, а регулятор $УУ4$ стабилизирует текущее среднее удлинение пьезоактюатора, выполняя роль фильтра пробки низких частот для высокочастотного контура и автоматизированное перераспределение суммарного управляющего воздействий между высокочастотным и низкочастотным каналами. Каналы компенсации $КК1$ и $КК2$ дополнительно обеспечивают динамическую развязку контуров управления положением режущего инструмента и силой резания.

В данной системе задача расширения частотного диапазона эффективной работы системы управления силой резания решается путем использования дополнительного быстродействующего исполнительного механизма. Однако это поставило новые задачи обеспечения совместной работы двух контуров управления одним управляемым параметром с одним управляющим

воздействием. На основании предложенной структурной схемы системы управления уточнены цели и задачи исследования.

Во второй главе построены модели объекта управления по управляющим воздействиям, модели взаимосвязи через объект управления, модели элементов системы, исследованы характеристики и определены параметры возмущающих воздействий на силу резания, необходимые для построения и исследования системы управления.

Математические модели объекта управления строились на основании активных экспериментов. Первый состоял в фиксации силы резания (Рис. 6,б) при токарной обработке валов из стали 45 (Рис. 6,а) с разными значениями подачи $s=0,35\text{мм/об}$ и $s=0,25\text{мм/об}$, глубинами резания $t=0,5\text{ мм}$ и $t=0,8\text{ мм}$ $n=500\text{об/мин}$ на токарно-винторезном станке 16К20Ф3. Обработка велась токарным проходным резцом с быстросменной неперетачиваемой пластиной: передний угол $\gamma = 10^\circ$; главный задний угол $\alpha = 7^\circ$; угол заострения $\beta = 73^\circ$; угол резания $\delta = 80^\circ$; главный угол в плане $\varphi=93^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 7^\circ$; угол при вершине $\varepsilon = 80^\circ$; угол наклона главной режущей кромки $\lambda = 3-5^\circ$. Материал пластины – Т5К10. Каждый эксперимент определял суммарную реакцию процесса по силе резания на ступенчатые входные воздействия по подаче и глубине резания (Рис. 6,в). Для выделения влияния отдельных входных сигналов выбирались два эксперимента с одним изменяющимся параметром при постоянном значении другого и производилось относительное вычитание временных рядов.

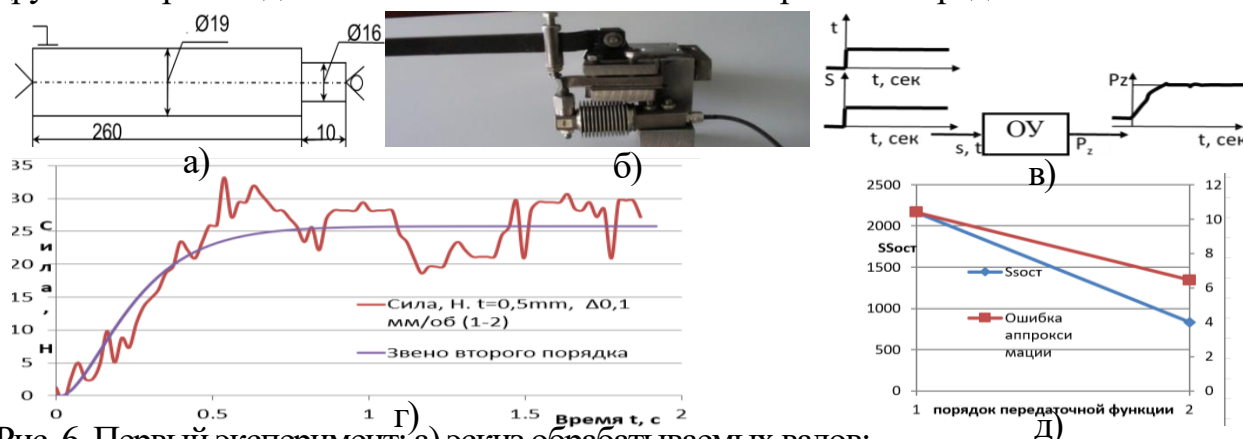


Рис. 6. Первый эксперимент: а) эскиз обрабатываемых валов; б) общий вид резцедержателя с тензодатчиком силы резания; в) план эксперимента; г) экспериментальное врезание после относительного вычитания временных рядов и аппроксимация; д) ошибки аппроксимации при различных порядках моделей

Мат. модели объекта управления по каналам продольная подача – сила резания, глубина резания – сила резания получены путем аппроксимации переходных процессов моделями 1 и 2-го порядка (Рис. 6,г, д). Полученные оценки показали широкий диапазон изменения параметров объекта управления (Таблица 7 диссертации). Модель упругой системы по каналу сила резания – положение режущего инструмента по поперечной оси построена на основании данных активного эксперимента по отклику акселерометра на импульсное воздействие, наносимое импульсным молотком (Рис. 7) ($\eta^2 = 0,95$).

Для экспериментального исследования возможности применения пьезоактюатора в качестве исполнительного механизма для процесса токарной обработки был разработан и изготовлен исследовательский стенд (Рис. 8,а), включающий генератор сигналов, источник питания постоянного тока, плату с микроконтроллером, головку

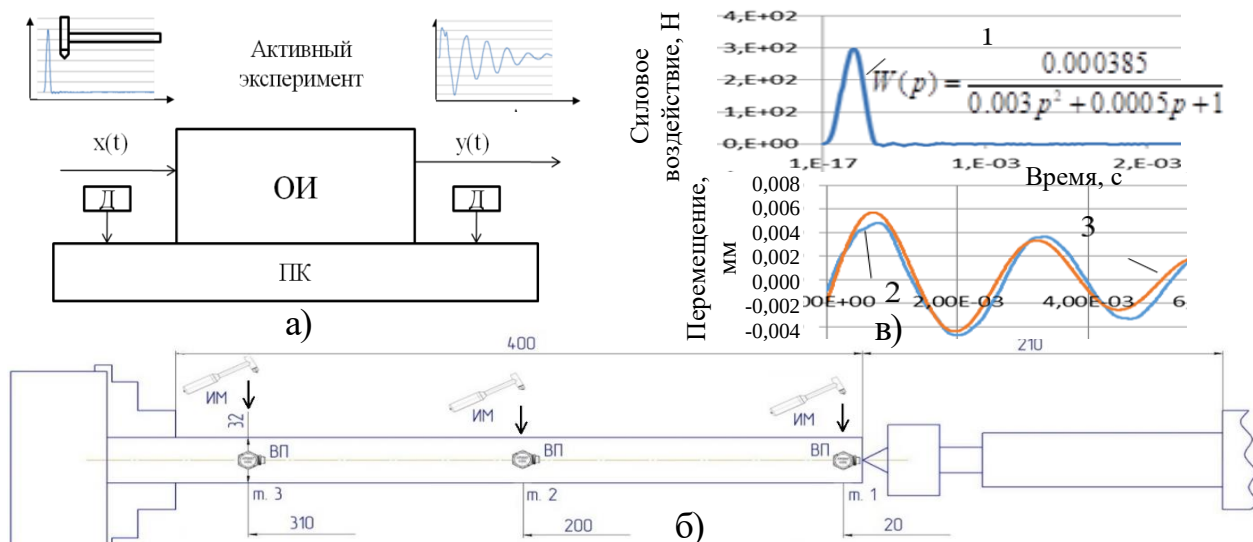


Рис. 7. Второй эксперимент: а) план эксперимента; б) схема эксперимента; в) графики входного силового воздействия (1), экспериментального (2) и расчетного (3) перемещения режущего инструмента по поперечной оси и полученная модель

измерительную пружинную малогабаритную (микатор) 2 ИПМ. Электрическая схема усилителя-преобразователя (Рис. 8,б). Исследование проводилось по схеме (Рис. 8,в). Пьезоэлемент установлен на поворотном резцедержателе. На свободный торец установлена головка измерительная 2 ИПМ для измерения перемещений. К пьезоэлементу приложена нагружающая сила резания от 0 до 200Н. Была подтверждена возможность применения пьезоактюатора в качестве исполнительного механизма для управления силой резания. Пьезоэлемент преодолевает запирающее усилие в исследуемом диапазоне. Управление удлинением осуществлялось по схеме с двумя последовательно включенными транзисторными ключами. На один ключ подается управляющее воздействие от системы управления удлинением пьезоэлемента. На второй – напряжение от высокочастотного генератора для повышения чувствительности пьезоэлемента к управляющему воздействию. Зависимость удлинения пьезоэлемента от усилия противодействия и частоты управляющего сигнала обусловила необходимость использования контура управления удлинением с обратной связью.

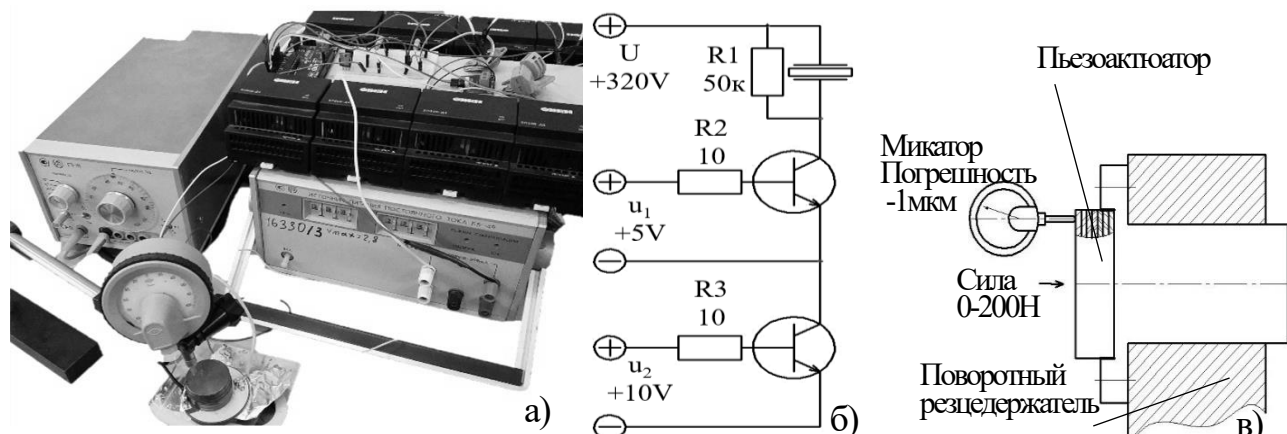


Рис. 8. а) общий вид исследовательского стенда; б) электрическая схема усилителя преобразователя, где U-Источники питания постоянного тока Б5-49 и БП60Б-Д4, u_1 -плата с микроконтроллером Microchip ATmega328P (частота ШИМ 62,5кГц) или ПЛК-110 М02 (100кГц), u_2 -генератор сигналов ГЗ-111, п-р-п транзисторы КТ892Б; $U_{КЭ\max}=400В$; граничная частота $f_{гр}=8МГц$; в) схема эксперимента

Математическая модель пьезоактюатора, построенная на основании данных сторонних исследователей с добавлением контура управления удлинением с отрицательной обратной связью, представлена в виде блок-схемы в среде «Simulink» (Рис. 9).

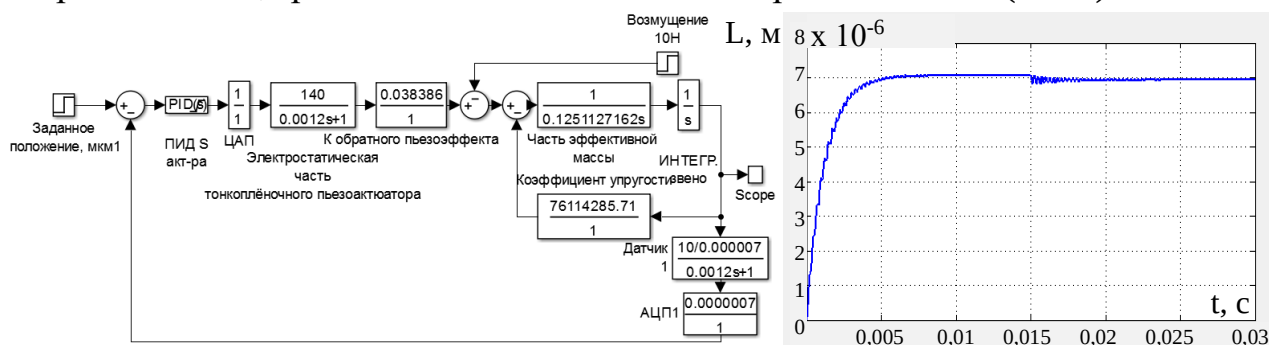


Рис.9. Математическая модель пьезоактюатора (слева) и переходной процесс

Модель содержит параметры тонкопленочного пьезоактюатора типа АПМ (АО «НИИ «Элпа») из пьезокерамического материала ЦТС-46 с толщиной слоя до 25мкм, диапазон частот 1-200Гц, перемещение 70мкм±15%. Расчетное значение блокирующего усилия актюатора $\geq 1200\text{Н}$. Нарботка на отказ (в типовом режиме эксплуатации), 10^9 циклов. Мат. модели электродвигателя и других элементов построены на основании паспортных данных.

В третьей главе решается задача повышения эффективности системы управления силой резания за счет повышения ее быстродействия. Исследовались два подхода. На первом этапе рассмотрена возможность повышения быстродействия путем построения каскадной системы. Полученный эффект оказался недостаточным.

Далее исследовалась возможность **повышения быстродействия управляющего воздействия**. Для этого совместно с двигателем продольной подачи используется пьезоактюатор, один торец которого закреплен на суппорте, другой торец соединен с режущим инструментом. Двигатель продольной подачи имеет большой диапазон изменения управляющего воздействия, но малое быстродействие. Пьезоэлемент имеет высокое быстродействие, но малый диапазон управляющего воздействия. Необходимость большого диапазона управляющего воздействия и высокого быстродействия обусловила их совместное использование. При этом потребовалось решение новой задачи – обеспечения устойчивой параллельной работы двух систем на одно управляющее воздействие при полной взаимосвязи контуров управления.

Функциональная схема системы с двумя исполнительными механизмами и частотной развязкой для компенсации их взаимосвязи представлена на (Рис. 10,а,б). Она содержит процесс резания как объект управления 1, низкочастотный контур управления силой резания, включающий датчик силы 2, АЦП 3, компьютер, в котором реализованы задатчик 4, элемент сравнения 5, ПИД регулятор низкочастотного контура 6, ЦАП 7, электронный усилитель 8, двигатель продольной подачи 9, редуктор 10, шарико-винтовую пару 11. Фильтр низких частот данного контура образован элементами системы. Высокочастотный контур управления II, включает фильтр высоких частот ФВЧ 12, элемент сравнения 13, интегрирующее звено 14, ПИД регулятор высокочастотной составляющей силы 15, выдающий задание каскаду управления удлинением пьезоэлемента, включающему элемент сравнения 16, ПИД регулятор внутреннего контура 17, ЦАП 18, электронный усилитель 19, пьезоэлемент 20, тензодатчик удлинения пьезоэлемента 21, АЦП 22. Система позволила расширить диапазон эффективной работы по АЧХ с 6,7 до 190 Гц. Недостатком

системы явилось то, что вследствие недостаточной эффективности развязки и интегрального насыщения регулятора, пьезоэлемент длительное время находится в крайних положениях (Рис. 10,в), что снижает эффективность управления.



Рис. 10. а) схема двухконтурной системы управления силой резания по продольной подаче с ФВЧ; б) функциональная схема; в) временной ряд удлинения пьезоэлемента

Для устранения попадания пьезоэлемента в зону насыщения предложена **система с повышенной эффективностью частотной развязки** в которой фильтр высоких частот реализован в виде дополнительного контура управления средним удлинением пьезоэлемента. Структурная схема системы с данным контуром (Рис. 11,а) отличается от приведенной на Рис.10 отсутствием ФВЧ 10 и тем, что сигнал с датчика удлинения пьезоактюатора подаётся на фильтр низких частот дополнительного контура управления текущим средним удлинением и поступает на устройство сравнения, в котором на основании задания определяется ошибка управления, подаваемая на дифференцирующее звено и регулятор для определения поправки к заданию контура с электродвигателем, отработка которого низкочастотным контуром приводит к стабилизации текущего среднего удлинения пьезоактюатора. Устранение низких частот и пропускание высоких означает, что данный контур играет роль фильтра высоких частот. Математическое моделирование данной системы управления показало высокую эффективность развязки, отсутствие нахождения актюатора в крайних положениях, достаточный для нормальной работы системы диапазон удлинения актюатора сузился с 70 до 35 мкм. Такая схема **обеспечивает частотную развязку контуров** и автоматизированное перераспределение суммарного управляющего воздействий между высокочастотным и низкочастотным каналами, полностью используя возможности быстродействующего контура и передавая управляющее воздействие низкочастотному контуру, исключая тем самым попадание пьезоэлемента в зону насыщения. Продольная подача изменяется в диапазоне 0,2-0,5 мм/об (Рис. 11,б).

Коэффициент эффективности системы с контуром стабилизации текущего среднего удлинения по СКО повышается с $K_{\text{эф}} = 15.5$ до 25, дисперсия силы резания уменьшается с $1,6H^2$ до $1H^2$ по временным рядам (Рис. 12). Диапазон эффективной работы контура по АЧХf до 190Гц (Рис. 13). Полученные показатели эффективности исследуемых в работе контуров управления приведены в Таблице 13 диссертации.

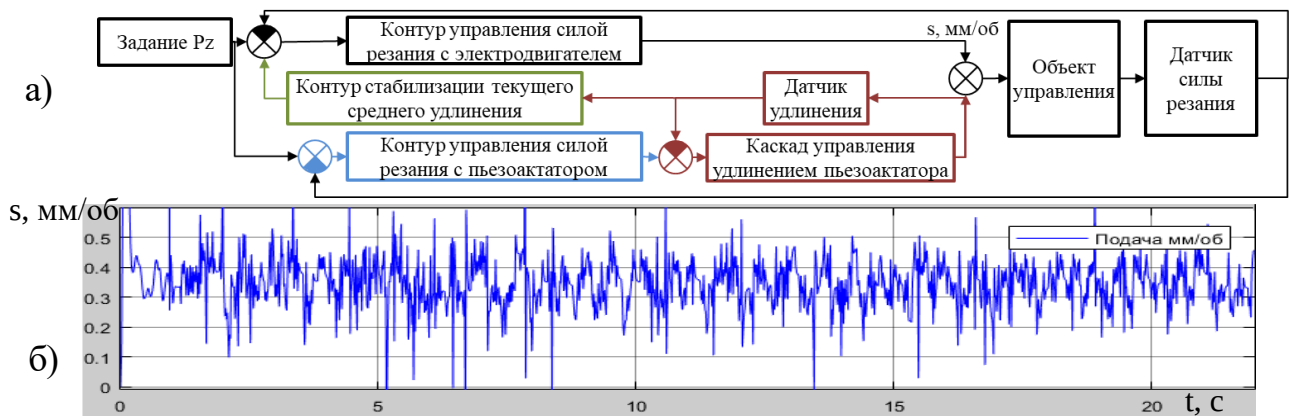


Рис. 11. а) схема системы с развязкой контуров управления с низкочастотной стабилизацией текущего среднего удлинения пьезоактюатора; б) график продольной подачи

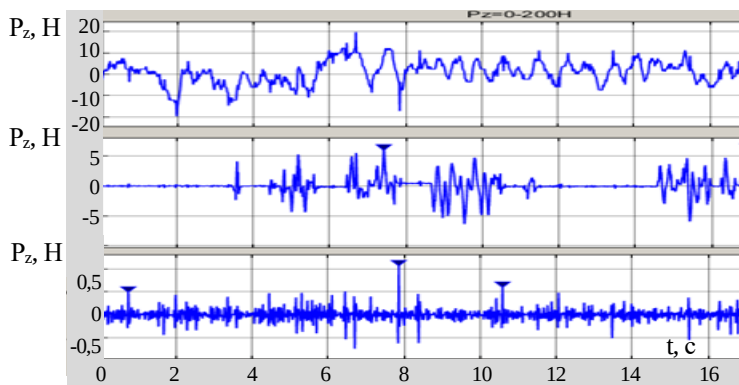


Рис. 12. Возмущение (сверху), выход системы с ФВЧ (средний) и стабилизацией удлинения (нижний)

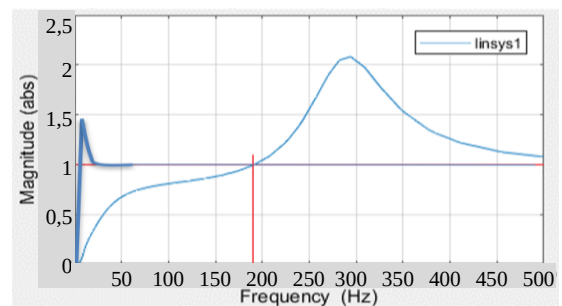


Рис. 13 АЧХf системы с пьезоактюатором со стабилизацией удлинения

Таким образом на основании проведенного исследования построена система управления силой резания с двумя исполнительными механизмами на одно управляющее воздействие, обеспечивающая повышение эффективности отработки возмущения на силу резания и уменьшающая возмущения, действующие на контур управления продольным профилем.

В четвертой главе решается задача повышения эффективности системы управления продольным профилем нежесткого вала путем компенсации автоколебаний и взаимного влияния контуров управления положением резца по поперечной оси - W_2 и силой резания - W_1 (Рис.14). На первом этапе построены каналы компенсации взаимосвязи. Для этого на основе теории инвариантности введены компенсационные динамические звенья W_{k1} и W_{k2} (Рис. 14). Звенья образуют вторые каналы, обеспечивающие приход в точки b и d сигналов от регуляторов $Reg. 1$ и $Reg. 2$, равных приходящим в данные точки возмущениям, но с противоположными знаками.

Система 2 при наличии взаимосвязи W_3 становится инвариантной к выходному сигналу системы 1 при выполнении условия: $W_1 \cdot W_3 = W_{k2} \cdot W_2$.

Отсюда передаточная функция звена компенсации будет: $W_{k2} = \frac{W_1 \cdot W_3}{W_2}$.

Аналогично для системы 1: $W_2 \cdot W_4 = W_{k1} \cdot W_1$; $W_{k1} = \frac{W_2 \cdot W_4}{W_1}$.

Передаточные функций звеньев W_{k1} и W_{k2} находились аппроксимационным методом на основании математических моделей передаточных функций элементов системы, объекта управления и каналов взаимного влияния контуров друг на друга.

Введение динамической компенсации позволило уменьшить влияние взаимно генерируемых возмущающих воздействий и устранить автоколебательные процессы.

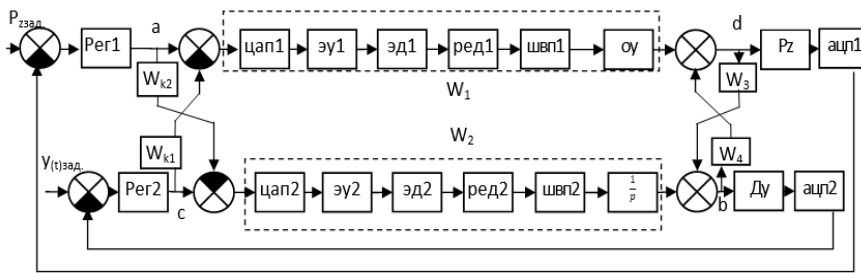


Рис. 14. Схема двухконтурной системы с компенсацией

Такой же эффект получен при расширении диапазона эффективной работы контура управления силой резания до собственной частоты автоколебательных контуров механической системы станка.

Разработана структурная схема системы в «Simulink», позволяющая при подключении соответствующих элементов системы промоделировать работу следующих систем управления: исходной системы без каналов компенсации возмущений, исходной системы с каналами компенсации, разрабатываемой системы с двумя исполнительными механизмами на продольную подачу и системы с каналами компенсации взаимосвязи. Результаты моделирования взаимосвязной системы при усредненных параметрах математических моделей представлены на Рис. 15.

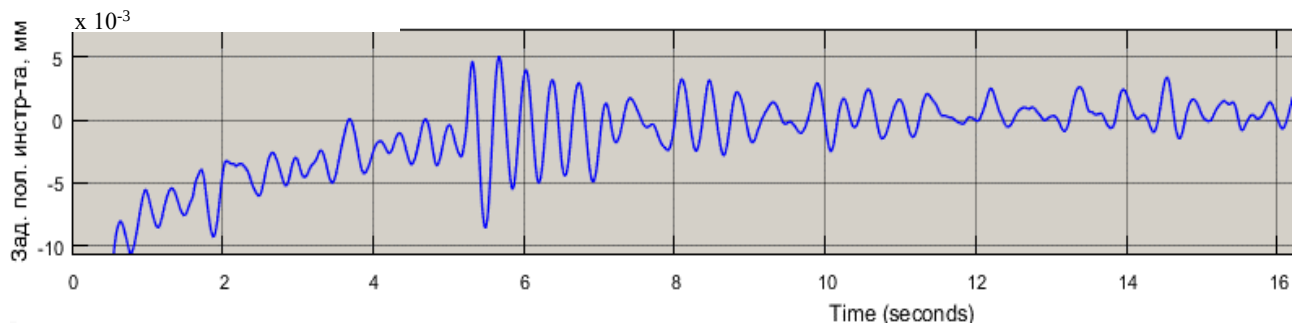


Рис. 15. Выход системы управления по положению инструмента

Система позволяет уменьшить колебания силы резания с ± 20 до ± 1 Н, что позволило уменьшить колебания положения режущего инструмента с ε_0 с $\pm 0,165$ мм до $\pm 0,008$ мм. Для рассматриваемой группы валов **точность токарной обработки повышается до 7 квалитета** (Рис. 16), диапазон колебаний размера сузился с $\pm 0,19$ мм до $\pm 0,009$ мм. Применение предложенного технологического процесса с данной системой позволяет повысить режимы и **увеличить производительность до 30%**, а также **устранить автоколебания**.

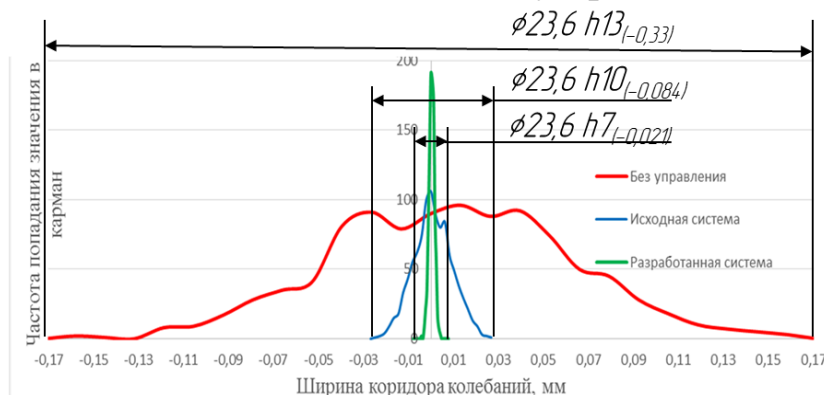


Рис. 16. Гистограмма положения режущего инструмента

Анализ устойчивости показал, что система управления силой резания с одним исполнительным механизмом с учетом взаимосвязи находится на границе устойчивости и подтверждает возможность возникновения автоколебаний механической системы. Годограф Найквиста для разработанной системы

показал, что **за счёт быстродействия система имеет достаточный запас устойчивости по контурам**. До 0,99 по модулю для системы по силе резания и порядка 0,8 по модулю для системы по положению резца.

Для проверки работоспособности системы при нестабильных параметрах объекта проводилось моделирование ее работы при найденных параметрах настройки регуляторов и изменении параметров объекта в выявленных диапазонах.

Моделирование показало, что введение звеньев транспортного запаздывания снижает качество регулирования при имеющихся настройках регуляторов, но корректировка параметров регуляторов позволяет поднять качественные показатели почти до начального уровня и **обеспечивает робастность системы** в данных диапазонах. При этом коэффициент эффективности по СКО силы резания снизился незначительно с 25 до 22-24, а по СКО поперечного положения режущего инструмента с 21 до 17-19. Частотный диапазон эффективной работы разработанной системы управления при усредненных параметрах 0-320 Гц и даже при самом неблагоприятном сочетании параметров ОУ составляет 0-7 Гц, что в 2 раза шире, чем у систем с электродвигателем при нормальных условиях.

На Рис. 17 представлен вариант реализации технологического процесса с применением разработанной системы управления на базе систем ЧПУ с наличием интерфейса для реализации пользовательского алгоритма управления.

Технологический процесс предполагает обработку в 4 прохода по траекториям предсказания $y(t,x)_{\text{пмод}}$ с работающей системой управления силой резания. На основании

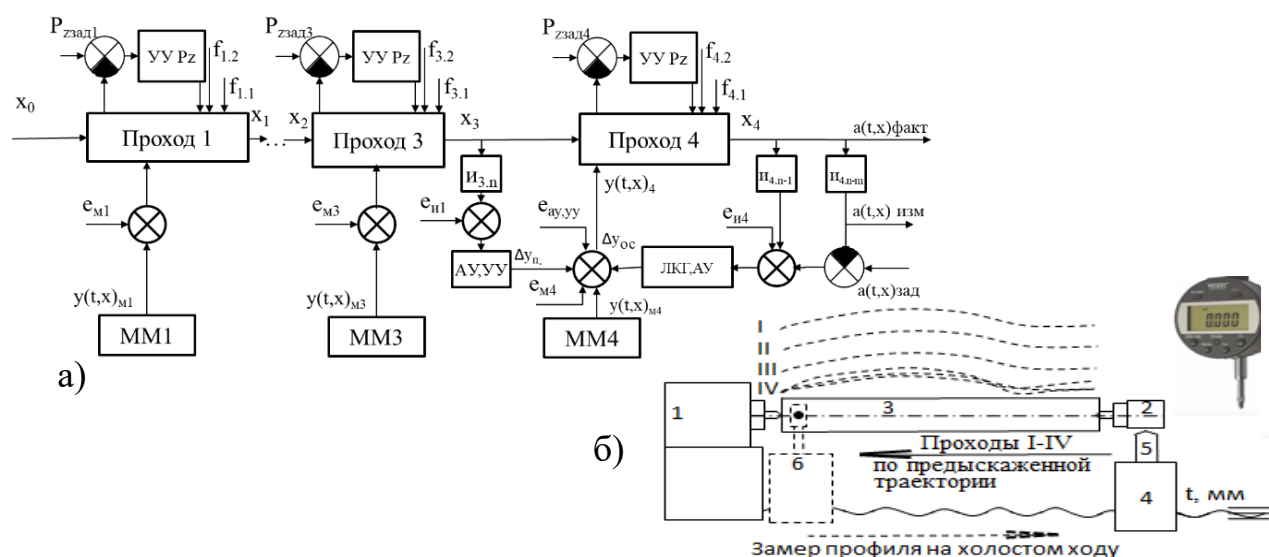


Рис. 17. а) структурная и б) функциональные схемы технологического процесса, реализуемые с применением разработанной системы управления

измерений после 4-го прохода ЛКГ регулятор рассчитывает корректировку траектории предсказания для 4-го прохода для следующей заготовки. При необходимости повышения точности обработки возможно построение прямых каналов управления, при этом после 3-го прохода деталь замеряется индикатором. АУ, УУ аппроксимируют отклонение продольного профиля и определяют поправку Δy_n к траектории на следующем проходе (Рис. 17,а). В зависимости от исходных данных и требований документации могут использоваться различные варианты работы контуров управления.

Одним из направлений практической реализации разработанной системы управления является повышение эффективности процесса обработки валов роликоопоры поддержки барабана вращающейся цементной печи ОР-6600, а также валов мельниц размолла, изготавливаемых для систем топливоприготовления предприятием тяжелого машиностроения АО «ТЯЖМАШ» г. Сызрань.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построены математические модели процесса токарной обработки нежестких валов как многомерного взаимосвязного объекта управления продольным профилем, силой резания и положением резца по поперечной оси для построения системы управления, обеспечивающей повышение производительности при заданной точности.

2. Выявлено, что контур управления силой резания при использовании в качестве исполнительного механизма двигателя продольной подачи имеет частотный диапазон эффективной работы по АЧХ до 3,1 Гц, что является недостаточным для отработки реальных неконтролируемых возмущающих воздействий, ширина спектральной плотности которых достигает 7 Гц; при этом возмущающие воздействия с частотами от 3,1 до 7 Гц находятся в зоне неэффективной работы системы, что приводит к увеличению их влияния системой управления.

3. Установлено, что для обеспечения отработки среднечастотных возмущающих воздействий на силу резания в процессе токарной обработки нежестких деталей необходимо расширить зону эффективной работы системы путем включения дополнительного высокочастотного (быстродействующего) контура управления на основе пьезоэлемента.

4. Выявлено, что для обеспечения совместной работы низкочастотного и высокочастотного контуров управления силой резания необходимо произвести частотную развязку с автоматизированным перераспределением управляющего воздействия между контурами для исключения попадания пьезоэлемента в зону насыщения путем включения дополнительного контура стабилизации текущего среднего удлинения с обратной связью.

5. Показано, что взаимосвязь контуров управления силой резания и положением резца по поперечной оси приводят к взаимной генерации дополнительных возмущающих воздействий и возможности возникновения автоколебаний, вследствие образования контуров механической системы с положительной обратной связью. Установлено, что для устранения дополнительных возмущающих воздействий и уменьшения вероятности появления автоколебаний необходимо вводить каналы динамической компенсации взаимосвязи контуров или повышать быстродействие контура управления силой резания до собственной частоты автоколебательных контуров механической системы станка.

6. Разработана система управления силой резания в процессе точения нежестких валов, позволяющая повысить производительность при заданной точности путем уменьшения влияния случайных возмущений на контур управления продольным профилем (уменьшить дисперсию силы резания с 24,8 до 1 Н²), компенсации взаимосвязи контуров и устранения взаимной генерации возмущений и автоколебаний за счет расширения частотного диапазона эффективной работы с 3,1 до 190 Гц путем совместного применения низкочастотного и высокочастотного (быстродействующего) контуров управления.

7. Разработана многомерная многосвязная система управления продольным профилем нежесткого вала с новой структурой, обеспечивающая повышение производительности токарной обработки (до 30%) при заданной точности, включающая внешний контур находде-

ния и корректировки по обратной связи траектории предсказания, следящую систему реализации траектории предсказания, систему стабилизации силы резания с двумя исполнительными механизмами на одно управляющее воздействие и внутренним контуром управления удлинением пьезоэлемента, обеспечивающая снятие среднечастотных возмущений с контура управления продольным профилем и компенсацию взаимосвязи контуров управления силой резания и положением резца по поперечной оси, устранение (уменьшение вероятности возникновения) автоколебаний, обеспечение устойчивости системы (запас устойчивости по годографу Найквиста по модулю до 0,9 для системы по силе резания и порядка 0,8 для системы по положению), в том числе при изменении параметров.

8. Предложен технологический процесс токарной обработки нежестких валов – дорнов для изготовления трубок из композиционных материалов, включающий четыре прохода по траекториям предсказания и корректировку траекторий предсказания по обратной связи по результатам замера диаметра в пяти точках по длине вала после четвертого прохода. ТП позволяет повысить режимные параметры и снизить на 30% продолжительность обработки (с 20 до 14 минут), а также сузить колебания размера детали с 0,378 до 0,018 мм (по 7 качеству). Это позволяет исключить операцию шлифования и дополнительно повысить производительность обработки.

Публикации по теме диссертации

1. Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Моделирование и обоснование эффективности двухконтурной системы управления процессом токарной обработки с использованием быстродействующего исполнительного механизма // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 2 (22). С. 205-221. (1 п.л. / 0,7 п.л.).
2. Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Компенсация взаимосвязи контуров управления поперечной и продольной подач на основе редуцированной модели токарной обработки // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. № 1 (25). С. 185-196. (0,75 п.л. / 0,5 п.л.).
3. Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Реализация фильтра высокой частоты для развязки контуров управления силой резания по обратной связи // Автоматизация. Современные технологии. 2019. № 12. С. 544-549. (0,38 п.л. / 0,25 п.л.).
4. Мостовой В.Д., Бирюков В.П., Сорокин В.А. Автоматизированная система исследования частотных характеристик металлорежущих станков // Молодой ученый. 2015. №14.2. С. 84-86. (0,18 п.л. / 0,1 п.л.).
5. Мостовой В.Д., Бирюков В.П., Игнатъев А.А. Уменьшение дисперсии ошибки системы управления силой резания путем повышения быстродействия управления // Актуальные проблемы автоматизации и управления в технических и организационных системах. 2016. С. 130-138. (0,55 п.л. / 0,35 п.л.).
6. Мостовой В.Д. Исследование эффективности каналов компенсации взаимосвязей системы управления процессом токарной обработки // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании. Сборник трудов I международной научно-практической конференции. Балаково: БИТИ НИЯУ МИФИ, 2018. С. 88-92. (0,18 п.л. / 0,18 п.л.).
7. Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Многомерная взаимосвязная система управления процессом токарной обработки нежестких валов // Молодежная наука: вызовы и перспективы. Сборник трудов II всероссийской научно-практической конференции. Самара: СамГТУ, 2019. С. 147-150. (0,18 п.л. / 0,1 п.л.).