

**Институт машиноведения и автоматики
Национальной академии наук Кыргызской Республики**

**Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова**

Диссертационный совет Д 05.21.642

На правах рукописи
УДК 62-572:681.5.01:621.0(043.3)

Турусбеков Бактыбек Сагындыкович

**Разработка основ теории, методов построения
гидравлических систем и устройств автоматического управления
технологическими процессами в машиностроении**

05.02.08 – технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Бишкек - 2022

Работа выполнена на кафедре «Прикладная механика, физика и инженерная педагогика» Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина.

Научный консультант: Темирбеков Жээнбек Темирбекович, доктор технических наук, профессор, Кыргызский Национальный аграрный университет им. К.И. Скрябина, Инженерно-технический факультет, декан.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Муслимов Аннас Поясович, ГОУ ВПО Кыргызско-Российский Славянский университет имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина, профессор;

доктор технических наук, профессор Шеров Карибек Тагаевич, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфулина, профессор;

доктор технических наук, профессор Мардонов Бахтиёр Тешаевич, Навоийский Государственный горно-технологический университет, ректор.


Ведущая организация: НАО «КазНИТУ им. К.И. Сатбаева», Институт энергетики и машиностроения, кафедра «Машиностроение, стандартизация, сертификация и метрология», 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22 а.

Защита состоится 30 июня 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 05.21.642 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук при Институте машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики (г. Бишкек, ул. Скрябина, 23, <http://imash.kg>) и Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова (г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, <https://kstu.kg>) по адресу: г. Бишкек ул. Скрябина, 23, конференцзал. Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации: <https://vc1.vak.kg/b/052-ajg-ewq-keo>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова и на сайте: <http://imash.kg>.

Автореферат разослан «28» мая 2022 г.

Ученый секретарь

 Дресвянников С.Ю.

диссертационного совета, к.т.н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Технология машиностроения является одним из приоритетных направлений в экономике, поскольку от степени ее развития зависит прогресс в других отраслях промышленности, т.е. решаются вопросы повышения качества продукции и производительности.

В связи с тем, что при механической обработке силы резания постоянно изменяются по причинам неоднородности структуры обрабатываемого материала, колебания припуска на обработку и твердости материала по длине обработки, износа инструмента и других, которые приводят к неточностям геометрических размеров обработанной детали, разработка автоматических систем регулирования режимов работы станков с целью стабилизации силы резания других силовых параметров за счет изменения подачи инструмента, скорости резания, а также программного устройства, позволяющего автоматически перенастраивать и управлять процессом обработки в зависимости от материала обрабатываемой детали, является актуальной проблемой, требующей решения.

Связь темы диссертации с крупными научными программами (проектами) и основными научно исследовательскими работами. Диссертационная работа органично входит в программу развития Кыргызской Республики на период 2018-2022 гг. «Единство, доверие, созидание», предусматривающая в пункте 5.5.5 мобилизацию необходимых ресурсов для запуска новых отраслей, дополняющих и укрепляющих структуру 47 промышленного производства, включая машиностроительное производство.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методов построения гидравлических систем и устройств автоматического управления технологическими процессами по параметрам: подача инструмента и скорость резания для повышения качества изготовления изделий (точность геометрических размеров и чистота поверхности).

Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач.

1. Обзор и анализ научно-технической и патентной литературы и постановка задач исследований.

2. Экспериментальные исследования для определения влияния технологических параметров подачи инструмента и скорости резания при различных видах механических обработок на силу резания.

3. Разработка основ теории, методов построения и исследования автоматических систем управления технологическими процессами при механической обработке на станках.

4. Разработка комплекса универсальных автоматических систем управления технологическими процессами, обеспечивающих качественное изготовление изделий машиностроения.

5. Исследование возможностей эффективного использования гидродвижения и способов регулирования его скорости движения в автоматических системах управления режимами работы оборудования.

6. Разработка информационных устройств различного типа применительно к созданным системам автоматического управления технологическими процессами на металлорежущих системах.

7. Разработка экспериментальных стендов и методик проведения экспериментов, обработка их результатов.

8. Разработка рекомендаций по практическому использованию результатов диссертационной работы в учебном процессе и на машиностроительных предприятиях.

Научная новизна полученных результатов:

Разработано новое научное направление в области технологии машиностроения, которое включает следующие результаты:

- основы теории, методов построения и исследования автоматических систем управления технологическими процессами с разработкой соответствующих математических моделей элементов и систем, позволяющих произвести расчет массо-геометрических и режимных параметров, необходимых для их проектирования и изготовления;

- комплекс универсальных автоматических систем управления технологическими процессами обработки изделий на токарном, сверлильном станках, применительно к двум видам обработок – чистовой и черновой:

- а) универсальные гидравлические автоматические системы с обратными гидравлической и электрогидравлической связями;

- б) универсальная автоматическая система регулирования режимами работ токарного станка по двум технологическим параметрам: скоростью резания и подачей инструмента;

- в) универсальная автоматическая система управления технологическим процессом обработки отверстий многолезвийным инструментом по двум параметрам: скоростью резания и подачей инструмента;

- г) автоматическая система программного управления подачей инструмента гидросуппорта станка с амплитудно-импульсным регулятором, новизна которых подтверждены патентами КР.

– разработана классификация способов регулирования скоростей движения гидропривода по критерию их рационального использования при проектировании станков различного назначения;

– разработаны новые высокочувствительные информационные устройства, применяемые в качестве измерительных элементов в универсальных автоматических системах: динамометрические резцедержатели с дифференциальным и пьезоэлектрическим датчиками, а также тензометрический датчик.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке рекомендаций для модернизации существующего парка металлорежущих станков, а также для проектирования нового высокопроизводительного оборудования, отвечающего современным требованиям промышленности.

2. Результаты диссертационной работы используются при чтении специальных дисциплин бакалаврам, магистрантам и аспирантам, изучающих вопросы автоматизации технологических процессов, а также внедрены на Бишкекском опытно-экспериментальном заводе горно-разведочной техники для автоматизации технологических процессов при производстве основной продукции. Акты внедрения представлены в приложении диссертации.

Экономическая значимость полученных результатов. Применение разработанного комплекса универсальных автоматических систем управления технологическими процессами при металлообработке позволяет повысить точность геометрических размеров деталей, чистоту поверхности; изготовление изделий без брака; повысить стойкость инструмента и снизить себестоимость изделий.

Расчеты, выполненные применительно к токарной обработке, показывают снижение трудоемкости производства на 25 %; рост производительности на 30 %; снижение себестоимости на 20 %.

Основные положения диссертации, вносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований: влияния скорости резания и подачи инструмента на силы резания при токарной обработке, влияние скорости резания при сверлении отверстий на осевую силу и крутящий момент, зависимости стойкости фрезы от скорости резания.

2. Результаты разработки основ теории, методов построения и исследований автоматических систем управления технологическими процессами при механической обработке:

а) принципиальные структурные схемы автоматических систем управления подачей инструмента гидросуппорта токарного станка при чистовых и черновых обработках изделий, а также разработанные математические модели отдельных элементов и всей системы для расчета

массо-геометрических и режимных параметров, необходимых при их проектировании и изготовлении систем;

б) результаты теоретического исследования объекта регулирования с безынерционным и инерционным регуляторами первого и второго порядков.

3. Результаты исследования различных способов регулирования скоростей движения гидропривода, вопросы стабилизации их и разработка рекомендаций по применению различных схем к конкретным видам технологического процесса, выполняемых на станках различного назначения.

4. Классификация способов регулирования скоростей движения гидравлических органов станка.

5. Принципиальные схемы дискретного регулирования скорости подачи инструмента гидросуппорта с частотно– импульсным и амплитудно-импульсным регулированием расхода жидкости и результаты их исследования.

6. Разработанный комплекс универсальных автоматических систем управления технологическими процессами и результаты их исследования:

а) гидравлическая автоматическая система стабилизации радиальной составляющей силы резания при токарной обработке;

б) универсальные гидравлические автоматические системы с обратными гидравлической и электрогидравлической связями;

в) универсальная автоматическая система регулирования режимами работ токарного станка по двум параметрам: по скорости резания и подаче инструмента;

г) универсальная автоматическая система управления технологическим процессом обработок отверстий многолезвийным инструментом;

д) автоматическая система с программным управлением подачей инструмента гидросуппорта токарного станка с амплитудно-импульсным регулятором расхода.

7. Разработанные и исследованные оригинальные информационные устройства для измерения выходных регулируемых параметров объектов управления – металлорежущих станков различного назначения: динамометрические резцедержатели с дифференциальным и пьезоэлектрическими датчиками; тензометрический датчик давления.

8. Экспериментальные стенды для исследования разработанного комплекса универсальных автоматических систем управления технологическими процессами и методика проведения экспериментальных работ.

9. Результаты экспериментальных исследований разработанных автоматических систем управления технологическими процессами и рекомендации по их использованию в производстве.

Личный вклад соискателя. Основные результаты теоретических экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. Автору принадлежат постановка проблемы и задач исследований, выбор методик проведения экспериментов, обработка полученных результатов.

Экспериментальные исследования разработанных автоматических систем проведены совместно к.т.н. Неженко О. В.

Апробация результатов исследований. Результаты работы соискателем были представлены на следующих научно-технических конференциях и семинарах: научно-техническая конференция, посвященная 65–летию Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (Бишкек, 2019 г.), 1-ой международной конференции, посвященной юбилею кафедр факультета автоматики и компьютерных наук Липецкого государственного технического университета (Липецк, 2019 г.), III Международной научно-практической конференции «Системы управления, математическое моделирование, автоматизация и энергоэффективность» SUMMA2021 (Липецк, 2021 г.).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Материалы диссертации изложены в 21 научных статьях, в том числе 9 статей в зарубежных журналах, из них 7 статей в журналах, входящих в базу индексирования научных публикаций РИНЦ с ненулевым импактфактором, 2 статьи в журнале, индексируемом базой данных SCOPUS. 9 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК КР, получены 3 патента КР на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, общих выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 220 наименований и 4-х приложений. Работа изложена на 242 страницах машинописного текста, содержит 135 рисунков и 20 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи исследований, определены основные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна, практическая значимость и личный вклад автора.

В первой главе «Обзор литературы» представлен обзор и анализ известных работ ученых в области технологии машиностроения и адаптивных систем управления станками профессоров, докторов технических наук Соколовским А.П., Трояновским Г., Балакшиным Б.С., Соломенцевым Ю.М. и других разрабатывавшие в период 1970-2008 гг. системы автоматического управления технологическими процессами, которые позволяют сделать следующие выводы:

1. Существующие адаптивные системы управления станками в основном подразделяются на следующие виды:

а) управление упругими перемещениями путем внесения поправок в размер статической и динамических настроек;

б) управление размерной перенастройкой системы станок – приспособление – изделие – деталь (СПИД) с одного типа размера детали на другой по точностным параметрам.

2. Автоматические системы управления станками являются однопараметрными, т.е. автоматическое регулирование качества продукции обеспечивается изменением значения одного параметра технологического процесса.

Для установления функциональной связи сил резания, крутящего момента с подачей инструмента и скоростью резания были проведены экспериментальные исследования при механической обработке: точение – на токарном станке; сверление – на сверлильном станке; шлифование – на шлифовальном станке.

Исследования влияния подачи инструмента на составляющие силы резания были проведены на токарном станке 1К62. Материал обрабатываемой заготовки сталь 45, составляющие силы резания измерялись силометрическим датчиком ДСР-1, инструмент резания – твердосплавный резец Т15К6 из быстрорежущей стали с прямолинейной режущей кромкой. Параметры резания: скорость 22 м/мин, глубина $t=2$ мм, $t=3$ мм, подача на оборот $s=0.3$ мм/об.

Результаты экспериментального исследования влияния скорости резания на силу резания, приведенные в диссертации показали, что силы резания с увеличением скорости резания до 60 м/мин растут, затем уменьшаются до 240 м/мин: силы P_z примерно на 20 %, а силы P_y и P_x – примерно на 30 %.

Для определения крутящего момента при сверлении $M_{кр}$ и осевой силы резания P_0 экспериментальные исследования проводились на вертикально сверлильном станке 2Н135. Материал обрабатываемой детали – сталь 20Х, сверло диаметр $d=20$ мм с геометрическими параметрами: $\varphi=58^\circ$, $\alpha_n=15^\circ$, $\gamma=0$. Подача $s=0.15$ мм/об, смазочно-охлаждающая жидкость – 10% раствор эмульсии с расходом $5\div6$ л/мин. Результаты,

проведенного эксперимента показали, что по мере повышения скорости резания от 3 до 20 м/мин осевая сила P_0 возрастает, а при повышении скорости примерно от 20 до 80 м/мин осевая сила резко снижается. Такая же зависимость наблюдается с изменением крутящего момента по мере возрастания скорости резания, хотя влияние скорости резания менее значительное.

Нами были проведены эксперименты для определения величины износа по задней поверхности в зависимости от стойкости инструмента и скорости фрезерования стали 45 цилиндрической фрезой с твердосплавными пластинами Т15К6 из быстрорежущей стали с диаметром $D=90$ мм. Параметры резания: – подача $s_z = 0,25$ мм, $s_z = 0,16$ мм; – глубина резания $t = 5$ мм. Экспериментальные работы проводились с охлаждением инструмента. Результаты экспериментов позволили определить зависимости $T = f(v)$.

Проведенные эксперименты позволили сделать следующие выводы:

1. Доказано, что увеличение подачи инструмента при точении способствует возрастанию сил резания, что приводит к изменениям величин упругих перемещений системы СПИД и погрешности геометрических размеров обрабатываемой детали увеличиваются, поэтому возникает задача автоматической стабилизации сил резания с помощью регулирования подачи инструмента.

2. Показано, что увеличение скорости резания при точении от 80 до 240 м/мин силы резания уменьшаются и в определенной степени их значения стабилизируются, что позволяет вести обработку деталей с более высокой производительностью при одновременном обеспечении требуемого качества.

3. С увеличением скорости сверления в диапазоне от 25 до 80 м/мин осевая сила постепенно уменьшается и далее происходит относительная их стабилизация.

Увеличение скорости сверления при тех же пределах 25 м/мин÷80 м/мин приводит к уменьшению крутящего момента.

4. Показано, что при фрезеровании величина износа инструмента по задней грани нелинейно зависит от скорости фрезерования и времени обработки: износ более интенсивно происходит при малых скоростях фрезерования, а стойкость инструмента снижается с увеличением скорости фрезерования.

Таким образом, с учетом необходимости дальнейшего повышения качества изготовления продукции и производительности в машиностроении, возникает задача по разработке автоматических систем управления технологическим процессом применительно к токарной обра-

ботке путем стабилизации силы резания за счет изменения в отдельности подачи инструмента или скорости резания, либо одновременно изменяя эти два параметра, при этом должны быть выполнены следующие требования к системе.

1. Простота системы управления, надежность в работе.
2. Универсальность ее применения для любого вида обработки (чистовой, получистовой и черновой).

3. Высокие динамические качества: приемлемый вид переходного процесса, высокое быстродействие, малое значение ошибки регулирования и устойчивая работа на всем диапазоне режимов работ.

В связи с выше изложенным сформулированы следующие задачи исследования

1. разработка новых способов регулирования в технологическом процессе скоростей резания и подачи инструмента, отвечающим выше перечисленным требованиям;

2. разработка:

- а) принципиально новых схем автоматического управления режимами работ токарного станка, существенно повышающих качество продукции машиностроения;

- б) математических моделей отдельных элементов и всей автоматической системы для расчета их основных параметров;

- в) конструкции и изготовление оригинальных элементов системы;

- г) экспериментальных стендов и методик проведения экспериментов, обработка полученных результатов и рекомендации по их использованию в производстве и учебном процессе.

Во второй главе «Материалы и методы исследований» представлены разработанные теоретические основы принципиальных схем и математических моделей автоматических систем управления технологическими процессами в металлообработке.

Принципиальная схема автоматического управления технологическим процессом по подаче инструмента показана на рисунке 1.

В этой схеме объектом управления является технологическая система - СПИД токарного станка с гидравлическим приводом подачи инструмента – гидросуппорт.

В процессе резания технологическая система испытывает воздействие $f(t)$, в результате чего изменяется радиальная составляющая силы резания P_y , величина которой постоянно измеряется измерительным устройством, которое одновременно является и преобразователем.

При этом на выходе этого устройства имеем электрический сигнал, который, поступая в элемент сравнения, сравнивается с задающим

сигналом U_0 и сигнал рассогласования $U=U_1-U_0$ далее в усилителе уси-

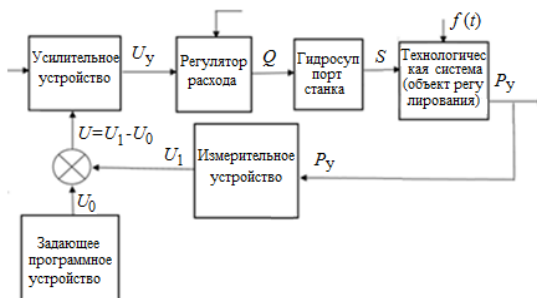


Рисунок 1 – Принципиальная схема автоматического управления технологическим процессом по подаче инструмента

ливается до значения U_y . Усиленный сигнал U_y , воздействуя на регулятор расхода, изменяет величину расхода, поступающего в силовой цилиндр гидросуппорта станка, таким образом, чтобы величина P_y была стабильной за счет изменения вели-

чины подачи инструмента. При возрастании P_y подача S автоматически уменьшается, а при уменьшении наоборот. По величине задающего сигнала U_0 по справочникам устанавливается величина подачи инструмента в зависимости от материалов обрабатываемой детали и инструмента.

Разработанная автоматическая система управления технологическим процессом отличается универсальностью, она может быть применима в станках, предназначенных как для черновой, так и чистовой обработок деталей. При черновой обработке автоматическая система при повышении нагрузки за счет снижения скорости подачи инструмента снижает силы резания. При чистовой обработке главным в этом процессе является обеспечение стабильности величины подачи инстру-

мента для уменьшения шероховатость обработанной поверхности.

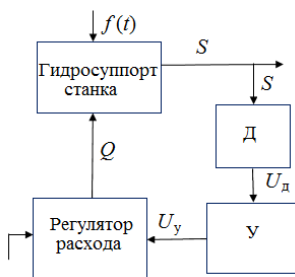


Рисунок 2 - Структурная схема стабилизации подачи инструмента гидросуппорта

Структурная схема системы стабилизации представлена на рисунке 2. Система стабилизации подачи инструмента гидросуппорта обеспечивается следующим образом: при возрастании сил резания $f(t)$ растет давление в рабочей полости силового цилиндра гидросуппорта, что приводит к увеличению внутренних утечек в нем, уменьшается подача S . При этом D -индукционный датчик

выдает сигнал U_d , который затем увеличивается до значения U_y , необхо-

димого для перемещения подвижного элемента регулятора для увеличения расхода Q , поступающего в силовой цилиндр, ровно настолько, чтобы компенсировать внутренние утечки в силовом цилиндре с целью стабилизации подачи инструмента. Очевидно, при уменьшении нагрузки на гидросуппорте все процессы происходят наоборот.

Проведена сравнительная оценка системы гидросуппорта с обратной связью и без нее.

Расчетная схема гидросуппорта представлена на рисунке 3. При подаче жидкости с расходом Q при давлении P цилиндр перемещается справа налево.

Уравнение статики имеет вид:

$$S = \frac{Q}{F} - K_{yt} \frac{P_0 + \Sigma P_{тр}}{F}. \quad (1)$$

где S – скорость перемещения гидросуппорта; F – эффективная площадь поршня; K_{yt} – коэффициент утечек, зависящий от качества уплотнения; P_0 – усилие подачи; $\Sigma P_{тр}$ – суммарная сила.

На рисунке 4 представлена принципиальная расчетная схема

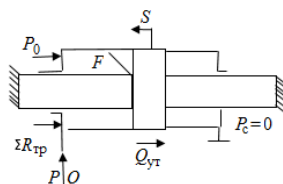


Рисунок 3 - Расчетная схема гидросуппорта

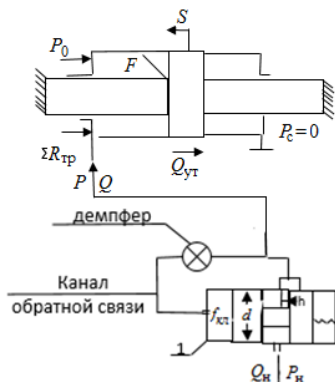


Рисунок 4 - Расчетная схема гидросуппорта с обратной связью

гидросуппорта станка с гидравлической обратной связью.

При возрастании усилия подачи P_0 возрастает давление в рабочей полости цилиндра, что ведет к увеличению внутренних утечек Q_{yt} и снижению скорости перемещения гидросуппорта. Одновременно возросшее давление, воздействуя на торец клапана расхода регулятора, перемещает золотник, увеличивая проходную щель и этим самым изменяется расход ровно на столько, чтобы компенсировать снижение скорости подачи.

При этом формула скорости подачи инструмента гидросуппорта примет следующий вид:

$$S = \frac{Q}{F} - K_{\text{yr}} \frac{P_0 \pm \Delta P_0 + \Sigma P_{\text{тр}}}{F^2} \pm \frac{\Delta Q}{F}, \quad (2)$$

где: ΔP_0 – приращение усилия подачи; ΔQ – приращение расхода; $\Delta Q = K_p \Delta h$, Δh – дополнительное открытие щели регулятора; $K_p = \mu \pi d \sqrt{2g/(\gamma \cdot \Delta p)}$ – коэффициент усиления регулятора расхода; $\mu = 0,65$ – коэффициент расхода диаметр клапана; d – диаметр клапана; g – ускорение свободного падения; γ – удельный вес жидкости; $\Delta P = P_{\text{н}} - P = \text{const}$, если присоединить редукционный клапан параллельно к регулятору расхода.

Приращение давления в канале обратной связи равно $\Delta p_0 = \Delta P_0 / F$, следовательно

$$\Delta h = \frac{\Delta P_0 f_{\text{кл}}}{C}, \quad (3)$$

где $f_{\text{кл}}$ – площадь торца клапана; C – коэффициент жёсткости пружины.

В формуле (2) знаки «+» надо брать при возрастании нагрузки и «-» наоборот при уменьшении нагрузки.

Формула (3) позволяет правильно выбрать конструктивные параметры регулятора расхода $f_{\text{кл}}$, C , Δh .

Математическая модель гидросуппорта станка с инерционным регулятором. Дифференциальное уравнение объекта регулирования гидросуппорта станка в приращениях имеет вид:

$$T_0 \frac{d\Delta S}{dt} + \Delta S = K_0 \Delta Q + f(t), \quad (4)$$

где T_0 – постоянная времени гидросуппорта; K_0 – коэффициент усиления гидросуппорта.

Дифференциальное уравнение инерционного регулятора представляется в виде:

$$T \frac{d\Delta Q}{dt} + \Delta Q = -K_0 \Delta S, \quad (5)$$

где T – постоянная времени регулятора, характеризующая его инерционность.

Решая совместно уравнения (4) (5), найдем уравнения динамики всей системы регулирования:

$$T_0 T \frac{d^2 \Delta S}{dt^2} + (T_0 + T) \frac{d\Delta S}{dt} + (1 + K_0 K_{\text{пер}}) \Delta S = T \frac{df}{dt} + f(t). \quad (6)$$

Процесс регулирования складывается из переходного и установившегося процессов:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{пер}} + \Delta S_{\text{уст}}.$$

Составим характеристическое уравнение автоматической системы:

$$T_0 T p^2 + (T_0 + T) p + (1 + K_0 K_{\text{пер}}) = 0.$$

Корни характеристического уравнения представлена в виде:

$$p_{1,2} = \frac{-(T_0 + T) \pm \sqrt{(T_0 - T)^2 - 4T_0 T K_0 K_{\text{пер}}}}{2T_0 T}. \quad (7)$$

Корни характеристического уравнения будут вещественными и отрицательными при условии:

$$K_{\text{пер}} < \frac{(T_0 - T)^2}{4T_0 T K_0}. \quad (8)$$

Тогда переходной процесс будет происходить по аperiodическому закону второго порядка, и он складывается из двух экспонент с разными постоянными времени:

$$\Delta S_{\text{пер}} = C_1 e^{p_a t} + C_2 e^{p_b t},$$

либо

$$\Delta S_{\text{пер}} = C_1 e^{-t/T_a} + C_2 e^{-t/T_b}, \quad (9)$$

где

$$\left. \begin{aligned} T_a &= \frac{2T_0 T}{(T_0 + T) - \sqrt{(T_0 - T)^2 - 4T_0 T K_0 K_{\text{пер}}}}, \\ T_b &= \frac{2T_0 T}{(T_0 + T) + \sqrt{(T_0 - T)^2 - 4T_0 T K_0 K_{\text{пер}}}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

При этом из (10) видно, что $T_a > T_b$.

Следует отметить, что C_1 и C_2 – произвольные постоянные, которые определяются из начальных условий.

Например,

$$\Delta S_{\text{пер}} = C \text{ при } t = 0; D = d\Delta S_{\text{пер}}/dt \text{ при } t = 0. \quad (11)$$

Из (9) видно, что переходной процесс состоит из двух экспонент, постоянные времени которых T_a и T_b изменяются в пределах:

$$T_0 > T_a > \frac{2T_0T}{T_0 + T}; \quad T < T_b < \frac{2T_0T}{T_0 + T}. \quad (12)$$

Рассмотрим случай увеличения коэффициента усиления регулятора:

$$K_{\text{пер}} > \frac{(T_0 - T)^2}{4T_0TK_0}, \quad (13)$$

тогда корни характеристического уравнения (7) будут комплексными сопряженными:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{T_a} \pm j\omega, \quad (14)$$

$$\text{где} \quad j = \sqrt{-1}; \quad T_a = \frac{2T_0T}{T_0 + T}; \quad \omega = \sqrt{\frac{K_0K_{\text{пер}}}{T_0T} - \left(\frac{T_0 - T}{2T_0T}\right)^2}. \quad (15)$$

При этих корнях переходной процесс будет колебательным:

$$\Delta S_{\text{пер}} = C_1 e^{-t/T_a} \sin(\omega t + C_2). \quad (16)$$

На рисунке 5 построены графики переходного процесса объекта без регулятора с безынерционным регулятором и объекта инерционным регулятором при разных соотношениях $K_{\text{пер}}$.

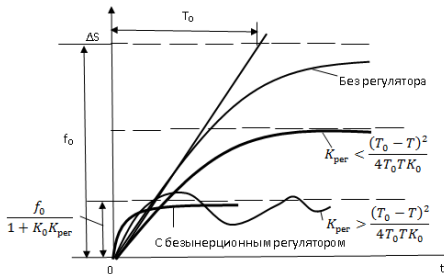


Рисунок 5 - Переходные процессы объекта без регулятора и с регуляторами безынерционным и инерционным

Анализ графиков, представленных на рисунке 5 показывают, что в системе объект – инерционный регулятор с постоянного времени T , можно добиться малой статической ошибки регулирования как в случае с безынерционным регулятором, но при этом переходной процесс будет

колебательным.

Условия устойчивой работы объекта с инерционным регулятором:

1. Положительность коэффициентов дифференциального уравнения системы (6), то есть:

$$T_0T > 0; \quad T_0 + T > 0; \quad (1 + K_0K_{\text{пер}}) > 0.$$

2. Отрицательных вещественных корней характеристического уравнения.

3. Если корни характеристического уравнения являются комплексными сопряженными, то вещественная ее часть должны быть отрицательной.

Поэтому при проектировании регулятора к объекту необходимо выбрать его параметры таким образом, чтобы система была устойчивой и далее добиваться качества переходного процесса вида и малого значения статической ошибки.

Статическая ошибка при $f(t) = f_0$ есть частное решение дифференциального уравнения (6) и будет равна 0:

$$\Delta S_{\text{ст}} = \frac{f_0}{1 + K_0 K_{\text{пер}}} \quad (17)$$

Из формулы (17) видно, что для уменьшения статической ошибки системы регулирования необходимо увеличить $K_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления регулятора, с другой стороны, имеются определенные ограничения по качеству динамических процессов.

Известны критерии устойчивости Гаусса-Гурвица для системы третьего порядка, дифференциальное уравнение которой описывается в общем виде (левая часть):

$$a_0 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_2 \frac{dx}{dt} + a_3 x \quad (18)$$

1. Положительность коэффициентов при переменных:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0. \quad (19)$$

2. Произведение средних коэффициентов должно быть больше, чем произведение крайних коэффициентов:

$$a_1 a_2 > a_0 a_3, \quad (20)$$

только при выполнении условия (19) и (20) все корни характеристического уравнения будут иметь отрицательные вещественные значения или один корень вещественный отрицательный, а два корня комплексные с отрицательной вещественной частью.

Для автоматической системы стабилизации подачи инструмента гидросуппорта согласно дифференциальным уравнениям, представленных в диссертации имеем:

$$a_0 = T_0 T_k^2; a_1 = T_0 T_d + T_k^2; a_2 = T_0 + T_d; a_3 = (1 + K_0 K_{\text{пер}}). \quad (21)$$

Как было ранее отмечено первое условие устойчивости (19) обеспечивается правильным присоединением регулятора расхода к объекту. Второе условие выводится согласно (20):

$$(T_0 T_d + T_k^2)(T_0 + T_d) > T_0 T_k^2 (1 + K_0 K_{\text{пер}}).$$

Откуда определяется уравнение ограничение на увеличение коэффициента усиления регулятора $K_{\text{пер}}$:

$$K_{\text{пер}} < \left(\frac{1}{T_0} + \frac{T_0 + T_d}{T_k^2} \right) \frac{T_d}{K_0}. \quad (22)$$

Из неравенства (22) можно получить границу устойчивости

$$K_0 K_{\text{пер}} < \left(\frac{T_k}{T_0} + \frac{T_0}{T_k} \right) \frac{T_d}{T_k} + \left(\frac{T_d}{T_k} \right)^2. \quad (23)$$

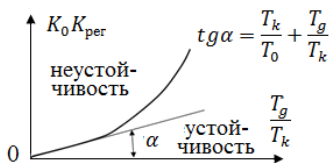


Рисунок 6 - Граница устойчивости системы

Зная T_k/T_0 , представляется возможным по (23) построить зависимость $K_0 K_{\text{пер}}$ от T_d/T_k (рисунок 6).

Как было выше отмечено при черновой обработке деталей на токарном станке процесс резания происходит в динамических условиях. По этой причине математическая модель гидросуппорта будет отличаться от ранее составленной модели для чистовой обработки, представленной в диссертации.

На рисунке 7 представлена принципиальная расчетная схема гидросуппорта.

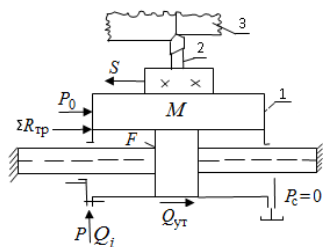


Рисунок 7 - Принципиальная расчетная схема гидросуппорта, предназначенного для выполнения черновой обработки на токарном станке

Примечание. Здесь и далее вывод всех математических моделей приведены в диссертации с соответствующими обоснованиями учета и пренебрежения факторов, присутствующих в процессах.

Уравнение сил, действующих на силовой цилиндр гидросуппорта, составленное на основе принципа Даламбера:

$$PF = M \frac{d^2 x}{dt^2} + P_0 + \Sigma R_{\text{тр}}. \quad (24)$$

Уравнение неразрывности потока рабочей жидкости:

$$QF = F \frac{dx}{dt} + F \frac{d(y-x)}{dt} + K_{\text{yt}} P, \quad (25)$$

где: y – координата рабочей жидкости; x – перемещение гидросуппорта.

Уравнение связи:

$$PF = K_{\text{ж}} (y - x) P, \quad (26)$$

где $K_{\text{ж}}$ – коэффициент жесткости рабочей жидкости.

Для получения математической модели гидросуппорта необходимо решить совместно уравнения (24), (25) и (26)

При этом имеем:

$$Q = F \frac{dx}{dt} = \frac{FM}{K_{\text{ж}}} \frac{d^3 x}{dt^3} + \frac{F}{K_{\text{ж}}} \frac{d(P_0 + \Sigma R_{\text{тр}})}{dt} + \frac{MK_{\text{yt}}}{F} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{K_{\text{yt}}}{F} (P_0 + \Sigma R_{\text{тр}}).$$

Поделив каждый член уравнения на F , эффективную площадь цилиндра, полагая, что нагрузка и силы трения являются постоянными, т.е. $\frac{d(P_0 + \Sigma R_{\text{тр}})}{dt} = 0$ и вводя следующие обозначения:

$$T_{\text{кц}} = \sqrt{\frac{M}{K_{\text{ж}}}}; T_{\text{дц}} = \frac{MK_{\text{yt}}}{F^2}; s = \frac{dx}{dt}; S_0 = \frac{Q}{F}; a_0 = \frac{K_{\text{yt}}}{F^2} (P_0 + \Sigma R_{\text{тр}}),$$

где $T_{\text{кц}}$ – постоянная времени гидросуппорта, способствующая к колебаниям в переходном режиме; $T_{\text{дц}}$ – постоянная времени гидросуппорта, способствующая демпфированию колебаний в переходном процессе; s – скорость подачи инструмента; S_0 – теоретическая скорость подачи гидросуппорта; a_0 – падение скорости из-за наличия полезной нагрузки и сил трения в гидросуппорте, получим математическую модель гидросуппорта станка:

$$T_{\text{кц}}^2 \frac{d^2 s}{dt^2} + T_{\text{дц}} \frac{ds}{dt} + s = S_0 - a_0. \quad (27)$$

Характеристическое уравнение (27) представляется в виде:

$$T_{\text{кц}}^2 p^2 + T_{\text{дц}} p + 1 = 0. \quad (28)$$

Его корни:

$$p_{1,2} = \frac{-T_{\text{дц}} \pm \sqrt{T_{\text{дц}}^2 - T_{\text{кц}}^2}}{2T_{\text{кц}}^2}.$$

При $T_{\text{дц}} > 2T_{\text{кц}}$ – корни $p_{1,2}$ будут вещественными с отрицательным знаком, а при $T_{\text{дц}} < 2T_{\text{кц}}$ – корни будут комплексными сопряженными с отрицательной вещественной частью.

Введем следующие обозначения: $T_{\text{дц}} = T_1 + T_2$; $T_{\text{кц}}^2 = T_1 T_2$.

Тогда характеристическое уравнение примет вид:

$$T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) p + 1 = 0.$$

Его корни:

$$p_1 = -\frac{1}{T_1} = \frac{-T_{\text{дц}} + \sqrt{T_{\text{дц}}^2 - T_{\text{кц}}^2}}{2T_{\text{кц}}^2},$$

$$p_2 = -\frac{1}{T_2} = \frac{-T_{\text{дц}} - \sqrt{T_{\text{дц}}^2 - T_{\text{кц}}^2}}{2T_{\text{кц}}^2}$$

При $T_{\text{дц}} > 2T_{\text{кц}}$ имеем следующее решение:

$$s = (S_0 - \alpha_0) \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{t/T_2} \right). \quad (29)$$

При $T_{\text{дц}} < 2T_{\text{кц}}$ имеет место решение:

$$s = (S_0 - \alpha_0) \left(1 - e^{-t/T} + \left(\cos \omega t + \frac{1}{T\omega} \right) \right), \quad (30)$$

где: $T = \frac{2T_{\text{кц}}^2}{T_{\text{дц}}}$, $\omega = \sqrt{\frac{4T_{\text{кц}}^2 - T_{\text{дц}}^2}{2T_{\text{кц}}^2}}$ – корни являются комплексными сопря-

женными $p_{1,2} = -\frac{1}{T} \pm j\omega$, где $j = \sqrt{-1}$.

Разработка математической модели регулятора расхода. Математическая модель строилась на основе принципиальной расчетной схемы регулятора расхода для управления подачей инструмента гидросуппорта, представленной на рисунке 7.

Расход Q , поступающий в гидросуппорт, как известно, равен:

$$Q = K_3 \cdot h, \quad (31)$$

где: $K_3 = \mu \pi d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P}$ – коэффициент усиления расхода регулятора; d – диаметр золотника, h – величина открытия рабочей щели.

Уравнение действующих сил на золотник регулятора, составленное на основании принципа Даламбера:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + \alpha \frac{dh}{dt} + ch = R_{\text{уп}}, \quad (32)$$

где m – масса золотника; α – коэффициент вязкого трения, зависящий от сорта рабочей жидкости; c – коэффициент жесткости пружины.

Делим каждый член уравнения (32) на c и введем следующие обозначения: $T_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{m}{c}}$; $T_{\text{др}} = \frac{\alpha}{c}$; $K_{\text{рег}} = \frac{1}{c}$,

где $T_{\text{кр}}$ – постоянная времени регулятора, способствующая колебательному процессу в переходном режиме; $T_{\text{др}}$ – постоянная времени, способствующая демпфированию колебаний в переходном процессе; $K_{\text{рег}}$ – коэффициент усиления регулятора.

С учетом введенных обозначений уравнение (32) примет вид:

$$T_{\text{кр}}^2 \frac{d^2 h}{dt^2} + T_{\text{др}} \frac{dh}{dt} + h = K_{\text{рег}} R_{\text{уп}}, \quad (33)$$

Решая совместно уравнения (31) и (33), получим математическую модель регулятора расхода:

$$T_{\text{кр}}^2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + T_{\text{др}} \frac{dQ}{dt} + Q = K_{\text{рег}} K_3 R_{\text{уп}}. \quad (34)$$

Уравнение в приращениях объекта – гидросуппорта имеет вид:

$$T_{\text{кр}}^2 \frac{d^2 \Delta S}{dt^2} + T_{\text{др}} \frac{d\Delta S}{dt} + \Delta S = -K_0 \Delta Q + f(t), \quad (35)$$

а регулятора расхода представляется в виде:

$$T_{\text{кр}}^2 \frac{d^2 \Delta Q}{dt^2} + T_{\text{др}} \frac{d\Delta Q}{dt} + \Delta Q = K_{\text{рег}} \Delta S. \quad (36)$$

Совместное решение их позволяет получить математическую модель всей системы:

$$\begin{aligned} T_{\text{кц}}^2 T_{\text{кр}}^2 \frac{d^4 \Delta S}{dt^4} + (T_{\text{кц}}^2 T_{\text{дц}} + T_{\text{др}} T_{\text{кц}}^2) \frac{d^3 \Delta S}{dt^3} + (T_{\text{кр}}^2 + T_{\text{дц}} T_{\text{др}} + T_{\text{кц}}^2) \frac{d^2 \Delta S}{dt^2} + \\ (T_{\text{др}} + T_{\text{дц}}) \frac{d\Delta S}{dt} + (1 + K_0 K_{\text{рег}}) \Delta S = T_{\text{кр}}^2 \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + T_{\text{др}} \frac{df(t)}{dt} + T_{\text{кц}}^2 + f(t). \end{aligned} \quad (37)$$

Условие устойчивой работы такой системы можно оценить по критериям, разработанными Гурвицем и Раусом.

Если представить характеристическое уравнение по (37) в виде:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0, \quad (38)$$

где $a_0 = T_{\text{кц}}^2 T_{\text{кр}}^2$; $a_1 = T_{\text{кц}}^2 T_{\text{дц}} + T_{\text{др}} T_{\text{кц}}^2$; $a_2 = T_{\text{кр}}^2 + T_{\text{дц}} T_{\text{др}} + T_{\text{кц}}^2$;
 $a_3 = T_{\text{др}} + T_{\text{дц}}$; $a_4 = 1 + K_0 K_{\text{рег}}$.

Критериями устойчивости являются:

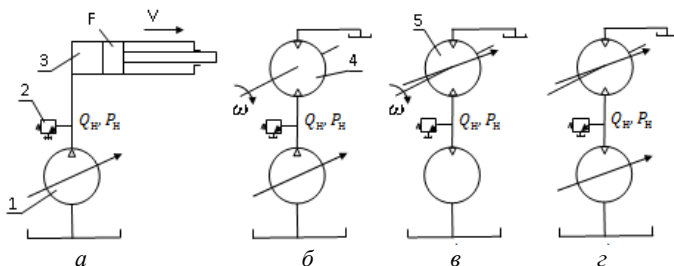
а) положительность всех коэффициентов:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0. \quad (39)$$

б) выполнение неравенства:

$$a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1^2 a_4 > 0. \quad (40)$$

В третьей главе «Результаты собственных исследований и их обсуждение» представлены способы регулирования скорости движения гидросуппорта.



1 – регулируемый насос; 2 – предохранительный клапан; 3 – силовой цилиндр;
 4 – гидромотор; 5 – регулируемый гидромотор

Рисунок 16 - Способы объемного регулирования скоростей движения гидродвигателя

В схеме на рисунке 8, а регулирование скорости движения силового цилиндра осуществляется за счет изменения производительности насоса, т.е. $Q_n = \text{var}$; $F = \text{const}$, скорость силового цилиндра $v = Q_n / F$.

В схеме на рисунке 8, б в качестве двигателя применен гидромотор, объем рабочей камеры является постоянным, а его скорость регулируется за счет изменения производительности насоса, т.е. $Q_n = \text{var}$; $F = \text{const}$ и $n = Q_n / q_m$, где q_m – объем рабочей жидкости, необходимый на один оборот гидромотора.

В схеме на рисунке 8, *в* гидромотор является регулируемым, т.е. объем его рабочей камеры может измениться, $q_m = \text{var}$, а $Q_n = \text{const}$, поскольку применен насос постоянной производительности.

В схеме на рисунке 8, *г* регулирование скорости движения гидродвигателя может осуществляться одновременно за счет изменения рабочих камер насоса и гидромотора, т.е. $Q_n = \text{var}$ и $q_m = \text{var}$.

Существует проблема получения малых перемещений при непрерывном дроссельном регулировании из-за зарастивания пропускной щели, так называемое явление облитерации.

Для ликвидации облитерации применяются дискретные способы регулирования расходов.

На рисунке 9 представлены его принципиальные схемы. Гидросуппорт подачи инструмента с частотно-импульсным регулированием

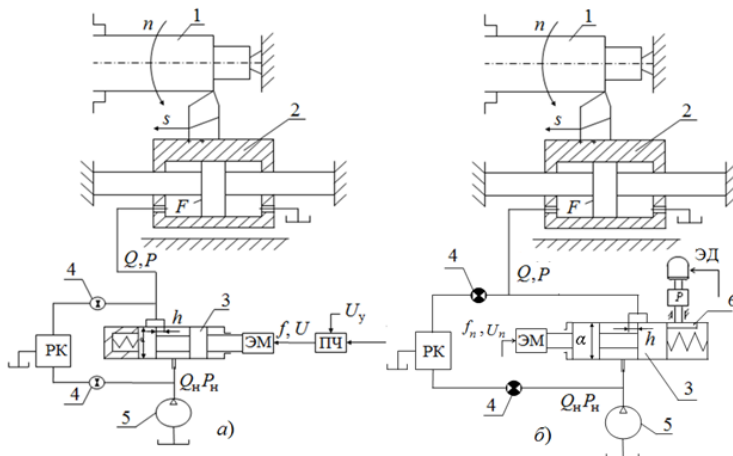


Рисунок 9 - Принципиальные схемы гидросуппорта подачи инструмента токарного станка, расход жидкости которых регулируется: *а*) частотно-импульсным; *б*) амплитудно-импульсным способами силового цилиндра с помощью гидравлической обратной связи

расхода жидкости (рис. 9, *а*) состоит из следующих элементов: обрабатываемая деталь 1 закрепляется на шпинделе и пиноли задней бабки станка. Гидросуппорт 2 осуществляет подачу инструмента s с помощью силового цилиндра, куда поступает расход Q от дискретного регулятора 3. Золотник регулятора совершает возвратно-поступательное движение от электромагнита ЭМ, частота колебания f и напряжение U регулируется преобразователем частоты ПЧ путем изменения управляющего

напряжения U_y . Подача расхода в гидросистему осуществляется насосом 5 с постоянной производительностью.

Подача инструмента гидросуппорта определяется следующей формулой:

$$S = \frac{\mu\pi d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P \cdot h} \cdot \frac{\Delta t}{T}}{F} - K_{yt} \frac{(P_x + \Sigma R_t)}{F^2}. \quad (41)$$

Из формулы (41) видно, что подача инструмента зависит от нагрузки P_x при условии, что все другие параметры будут постоянными.

С другой стороны, расход, поступающий в силовой цилиндр, от которого зависит подача инструмента, равен:

$$Q = Q_{\max} \cdot \Delta t \cdot f, \quad (42)$$

где $Q_{\max} = \mu\pi d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P \cdot h} = \text{const}$ – амплитудное значение расхода жидкости; f – частота колебания электромагнита.

На рисунке 9, б представлена принципиальная схема амплитудно-импульсного регулирования подачи инструмента гидросуппорта токарного станка, составленная из следующих элементов: обрабатываемая деталь 1; гидросуппорт с силовым цилиндром 2; дискретный регулятор расхода жидкости 3; демпферы для гашения колебания давления в гидросистеме 4; насос постоянной производительности 5; эксцентрик 6, служащий упором и составляющим величину h – открытия рабочей щели регулятора расхода жидкости; ЭД – электродвигатель с редуктором; P – поворачивающий эксцентрик; ЭМ – электромагнит, осуществляющий возвратно-поступательное движение золотника регулятора расхода с частотой 50 Гц.

Подача расхода от регулятора в силовой цилиндр гидросуппорта в принципе можно менять по любому заранее заданному закону.

Формулу (42) можно представить в следующем виде:

$$Q = Q_{\max} \frac{\Delta t}{T}, \quad (43)$$

где амплитудное значение расхода равно:

$$Q_{\max} = \mu\pi d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p \cdot h}, \quad (44)$$

$K_3 = \mu \pi d \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} \Delta p = const$ – коэффициент усиления дискретного регулятора расхода жидкости, т.е. $Q_{\max} = K_3 h$, отсюда средний расход жидкости, поступающей в силовой цилиндр, равен:

$$Q = K_3 \cdot h \cdot \frac{\Delta t}{T}. \quad (45)$$

$$S = \frac{Q}{F} - K_{yt} \frac{R_x + R_{np}}{F^2}. \quad (49)$$

В четвертой главе «Разработка комплекса универсальных автоматических систем управления технологическими процессами, обеспечивающих качественное изготовление изделий при механической обработке» представлен комплекс автоматических систем регулирования технологическими процессами.

На рисунке 10 представлена разработанная оригинальная гидравлическая система,

предназначенная для стабилизации значения радиальной составляющей силы резания.

Это достигается за счет автоматической системы, которая работает следующим образом: при обработке детали 1 возникает сила резания и её радиальные составляющие P_y , вызывая упругую деформацию системы СПИД, приводит к

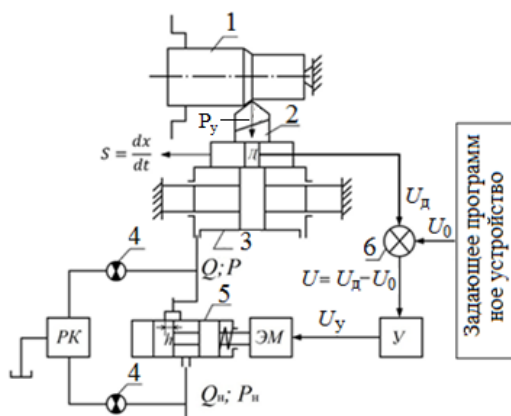


Рисунок 10 - Принципиальная схема гидравлической автоматической системы стабилизации радиальной составляющей силы резания

настроенных параметров резца 2 относительно детали, что приводит к изменению сигнала U_d на выходе датчика D .

Сигнал от датчика поступает в сумматор 6, где происходит сравнение этого сигнала с задающим – U_0 . Далее сигнал рассогласования $U = U_d - U_0$, поскольку он слаб по мощности, усиливается усилителем U

до значения U_y , и тяговое усилие электромагнита $\mathcal{E}M$ возрастает и золотник регулятора расхода перемещается слева направо, что приводит к уменьшению величины открытия рабочей щели h регулятора и расход Q , поступающий в рабочую полость цилиндра 3 также уменьшается, следовательно и S подача инструмента снижается ровно на столько, чтобы обеспечить постоянство радиальной составляющей силы резания.

Таким образом, радиальная составляющая сила резания стабилизируется в ходе всего технологического процесса обработки изделия, что обеспечивает точность его геометрических размеров и при этом повышается стойкость резца, поскольку он работает в стабильных условиях резания.

С помощью задающего программного устройства представляется возможность обрабатывать различные изделия с разными материалами и типом размеров, изменяя по заданному закону значение U_0 .

Вывод математической модели гидросуппорта подачи инструмента, предназначенного для выполнения чистовых обработок изделия, была произведена во второй главе диссертации:

$$T_{\text{мех}} \frac{d\Delta S}{dt} + \Delta S = k_{\text{ц}} \Delta Q. \quad (46)$$

где: $T_{\text{мех}} = \frac{k_{\text{yt}} M}{F^2}$ – постоянная времени, характеризующая инерционность гидросуппорта; k_{yt} – коэффициент утечек; M – масса гидросуппорта; F – эффективная площадь силового цилиндра; $k_{\text{ц}} = 1/F$ – коэффициент усиления силового цилиндра гидросуппорта.

Структурная схема автоматической системы регулирования радиальной составляющей силы резания, представленная в диссертации, позволяет возможность составить передаточную функцию всей системы:

$$W(p) = \frac{k_y k_3 k_p k_3 k_{\text{ц}}}{(T_{\text{кр}}^2 p^2 + T_{\text{др}} p + 1)(T_{\text{мех}} p + 1) \pm k_y k_3 k_p k_3 k_{\text{ц}} k_{\text{д}}}, \quad (47)$$

где k_y – коэффициент усиления усилителя; k_3 – коэффициент усиления электромагнита; k_p – коэффициент усилителя регулятора; k_3 – коэффициент усиления по расходу; $k_{\text{ц}}$ – коэффициент усиления силового цилиндра; $k_{\text{д}}$ – коэффициент усиления датчика; $T_{\text{кр}}$, $T_{\text{др}}$, $T_{\text{мех}}$ – постоянные времени соответственно регулятора расхода и силового цилиндра.

Расчет системы на устойчивость. Критерий устойчивости Рауса-Гурвица является одним из способов анализа линейной автоматической системы на устойчивость, достоинством которого является его простота.

Произведем замены в уравнении (47) временные характеристики числовыми значениями, полученные путем вычисления их по параметрам системы.

$$3,425 \cdot 10^{-5} p^3 + 4,25 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,32 p + 1 = 0.$$

Матрица этого уравнения и вычисленные значения диагональных миноров представлены в диссертации:

$$|\Delta 3| = 1,107 \cdot 10^{-4}; |\Delta 2| = 1,107 \cdot 10^{-4}; |\Delta 1| = 4,25 \cdot 10^{-4}$$

Поскольку $\Delta 1 > 0$, $\Delta 2 > 0$ и $\Delta 3 > 0$, автоматическая система является устойчивой. При применении данной автоматической системы для черновой механической обработки изделий следует учесть математическую модель силового цилиндра гидросуппорта, выведенную с учетом сжимаемости рабочей жидкости:

$$W(p) = \frac{k_u}{T_{кц}^2 p^2 + T_{лц} p + 1}.$$

Её передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{k_y k_z k_p k_u}{(T_{кр}^2 p^2 + T_{др} p + 1)(T_{кц}^2 p^2 + T_{лц} p + 1) \pm k_y k_z k_p k_u k_d}. \quad (48)$$

Из (48) видно, что система имеет характеристическое уравнение четвертого порядка, заменив временные характеристики числовыми значениями, получим:

$$2,75 \cdot 10^{-7} p^4 + 2,865 \cdot 10^{-6} p^3 + 8,906 \cdot 10^{-3} p^2 + 0,025 p + 1 = 0.$$

Матрица и значения диагональных миноров представлены в диссертации:

$$|\Delta 4| = 4,265 \cdot 10^{-10}; |\Delta 3| = 4,265 \cdot 10^{-10}; |\Delta 2| = 2,15 \cdot 10^{-8}; |\Delta 1| = 2,865 \cdot 10^{-6}$$

В связи с тем, что: $\Delta 1 > 0$, $\Delta 2 > 0$, $\Delta 3 > 0$ и $\Delta 4 > 0$, автоматическая система регулирования радиальной составляющей силы резания при черновой механической обработке изделий на токарном станке работает устойчиво.

Желаемый вид переходного процесса и длительности его могут быть обеспечены соответствующими расчетами и выборами массо-геометрических параметров, входящих в постоянные времени $T_{кр}$, $T_{др}$, $T_{мех}$, $T_{ку}$, $T_{дц}$.

Универсальная гидравлическая автоматическая система с обрат-

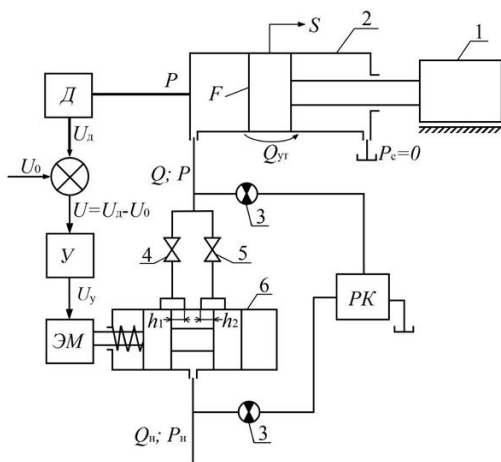


Рисунок 11 - Принципиальная схема гидравлической автоматической системы с электрогидравлической связью по давлению

ной электрогидравлической связью для регулирования подачи инструмента представлена на рисунке 11 отличается наличием отдельного канала управления – электрогидравлическая обратная связь, содержащая следующие элементы: датчик давления D , который измеряет давление в рабочей полости силового цилиндра и преобразует его в электрический сигнал U_d .

Сигнал от датчика в сумматоре 7

сравнивается с задающим сигналом U_0 и на выходе имеем сигнал рассогласования $U = U_d - U_0$, который усиливается усилителем Y и усиленный сигнал U_y , воздействуя на электромагнит тянущего типа, перемещает его подвижный элемент, в результате которого изменяется соответствующая величина открытия рабочей щели h_1 и h_2 .

При чистовой обработке кран 4 открыт, а кран 5 закрыт. В связи с увеличением величины h_1 происходит компенсация $Q_{ут}$ при возрастании нагрузки и подача инструмента стабилизируется.

При черновой обработке кран 4 закрыт, а кран 5 открыт и при движении якоря электромагнита слева направо величина открытия рабочей щели h_2 уменьшается, что в конечном счете приводит к уменьшению подачи инструмента при обработке деталей и этим самым обеспечивается повышенная стойкость инструмента и предотвращается его поломка.

Передаточная функция всей автоматической системы с электрогидравлической связью по давлению определяется из структурной схемы, представленной в диссертации:

$$W(p) = \frac{k_y k_{эм} k_p k_3 k_{ц}}{(T_{кр}^2 p^2 + T_{др} p + 1)(T_{мех} p + 1) \pm k_y k_{эм} k_p k_3 k_{ц} k_d k_{ут}}. \quad (49)$$

где k_d – коэффициент усиления датчика давления; k_y – коэффициент усиления усилителя.

Полученная передаточная функция (49) позволяет произвести расчет и анализ динамических характеристик разработанной системы: построение переходных процессов, оценка быстродействия и её устойчивость.

Если рассматривается черновая обработка изделий необходимо в структурной схеме передаточную функцию силового цилиндра представить в виде:

$$W(p) = \frac{S(p)}{Q(p)} = \frac{k_{ц}}{T_{кц}^2 p^2 + T_{дц} p + 1}. \quad (50)$$

поскольку при этом учитывается сжимаемость рабочей жидкости.

Используя разработанную универсальную автоматическую систему регулирования режимами работ токарного станка по двум параметрам: по скорости резания и подаче инструмента, а также ее структурной схемы, представленной в диссертации, с учетом (50), составим передаточную функцию для всей системы управления при чистовой обработке подачей инструмента:

$$W_{п}(p) = \frac{k_{y1} k_{эм} k_p k_3 k_{ц}}{(T_{кр}^2 p^2 + T_{др} p + 1)(T_{мех} p + 1) \pm k_{y1} k_{эм} k_p k_3 k_{ц} k_d k_{ут}}, \quad (51)$$

по скорости резания:

$$W_c(p) = \frac{k_{y2} k_{пч} k_{эд} k_{кс}}{(T_{кэ}^2 p^2 + T_{дэ} p + 1) \pm k_d k_{y2} k_{пч} k_{эд} k_{кс}}. \quad (52)$$

При черновой обработке передаточная функция системы по управлению подачей будет иметь вид:

$$W_{п}(p) = \frac{k_{y1} k_{эм} k_p k_3 k_{ц}}{(T_{кр}^2 p^2 + T_{др} p + 1)(T_{кц}^2 p^2 + T_{дц} p + 1) \pm k_{y1} k_{эм} k_p k_3 k_{ц} k_d k_{ут}}. \quad (53)$$

Расчет системы на устойчивость. Воспользуемся критерием Рауса, поскольку этот способ анализа линейной динамической системы на устойчивость отличается от других предельной простотой.

Для системы управления подачей инструмента при чистовой обработке (51) характеристическое уравнение представляет собой уравнение третьего порядка и после подстановки числовые значения постоянных времени $T_{кр}$, $T_{др}$, $T_{мех}$ имеет следующий вид:

$$3,485 \cdot 10^{-3} p^3 + 4,55 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,28 p + 1 = 0. \quad (54)$$

Матрица и вычисленные значения диагональных минор представлены в диссертации:

$$|\Delta_3| = 1,108 \cdot 10^{-4}; |\Delta_2| = 1,15 \cdot 10^{-4}; |\Delta_1| = 4,55 \cdot 10^{-4}$$

В связи с тем, что $\Delta_1 > 0$, $\Delta_2 > 0$ и $\Delta_3 > 0$ система работает устойчиво после окончания переходных процессов.

Для системы управления скоростью резания характеристическое уравнение электропривода вращения шпинделя представляется в следующем виде:

$$T_{кэ}^2 p^2 + T_{дэ} p + 1 = 0, \quad (55)$$

где $T_{кэ}$ – постоянная времени электродвигателя, способствующая к колебательным процессам в переходном режиме; $T_{дэ}$ – постоянная времени электродвигателя, от значения которого зависит демпфирующая способность системы.

Корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = \frac{-T_{дэ} \pm \sqrt{T_{дэ}^2 - 4T_{кэ}^2}}{2T_{кэ}^2}, \quad (56)$$

При выполнении условия $T_{дэ} > 2T_{кэ}$ корни характеристического уравнения будут вещественными и отрицательными, а $T_{дэ} < 2T_{кэ}$ – корни комплексные сопряженные с отрицательной вещественной частью, кроме того $T_{кэ} > 0$ и $T_{дэ} > 0$, что доказывают устойчивую работу системы.

При черновой обработке система, управляющая подачей инструмента характеристическое уравнение по (53) представляется в виде после подстановки числовых значений:

$$2,22 \cdot 10^{-7} p^4 + 2,645 \cdot 10^{-6} p^3 + 9,875 \cdot 10^{-3} p^2 + 0,03 p + 1 = 0. \quad (57)$$

Матрицу и вычисленные значения диагональных миноров представлены в диссертации:

$$|\Delta 4| = 4,175 \cdot 10^{-10}; |\Delta 3| = 4,175 \cdot 10^{-10}; |\Delta 2| = 2,01 \cdot 10^{-8}; |\Delta 1| = 2,645 \cdot 10^{-6}.$$

Система работает устойчиво, поскольку: $\Delta 1 > 0$, $\Delta 2 > 0$, $\Delta 3 > 0$ и $\Delta 4 > 0$.

Вид переходных процессов и их длительность оптимизируется расчетами и выборами значений параметров систем, входящие в соответствующие постоянных времен: $T_{рк}$, $T_{др}$, $T_{мех}$, $T_{кэ}$, $T_{дэ}$, $T_{кц}$, $T_{дц}$, по методике, изложенной в главе 2 диссертации.

Применительно к технологической операции сверления в сплошном металле в диссертационной работе составлена структурная схема для разработанной системы.

Для операций растачивания в структурной схеме следует заметить передаточную функцию силового цилиндра на следующую:

$$W(p) = \frac{S(p)}{Q(p)} = \frac{k_{ц}}{(T_{мех}p + 1)}. \quad (58)$$

Система управления при обработке отверстий при сверлении имеет следующие передаточные функции:

1) по подаче инструмента

$$W(p) = \frac{k_{д}k_{y1}k_{эм}k_{р}k_{ц}}{(T_{кр}^2p^2 + T_{др}p + 1)(T_{кц}^2p^2 + T_{дц}p + 1) \pm k_{y1}k_{эм}k_{р}k_{д}k_{м}k_{ут}k_{ц}}, \quad (59)$$

2) по скорости сверления

$$W(p) = \frac{k_{пч}k_{э}k_{шк}}{(T_{кэ}^2p^2 + T_{дэ}p + 1) \pm k_{д}k_{пч}k_{э}k_{шк}}, \quad (60)$$

3) при развертывании отверстий:

$$W(p) = \frac{k_{д}k_{y1}k_{эм}k_{р}k_{ц}}{(T_{кр}^2p^2 + T_{др}p + 1)(T_{мэх}p + 1) \pm k_{y1}k_{эм}k_{р}k_{д}k_{м}k_{ут}k_{ц}}. \quad (61)$$

Следует иметь в виду, что передаточные функции отдельных элементов системы были представлены выше, кроме передаточной функция шпиндельной коробки, которую можно представить, как:

$$W_{шк}(p) = \frac{n_{и}(p)}{n_{дв}(p)} = k_{шк}, \quad (62)$$

где $n_{и}$ – число оборотов вращения инструмента; $n_{дв}$ – число оборотов выходного вала электродвигателя.

Передаточная функция, связывающая функционально давление и момент:

$$W(p) = \frac{P(p)}{M_{кр}(p)} = k_m. \quad (67)$$

На рисунке 12 приведена принципиальная схема управления подачей инструмента гидросуппорта токарного станка с амплитудно-импульсным регулированием,

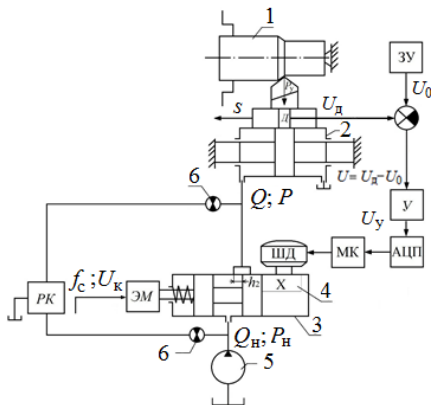


Рисунок 12 - Принципиальная схема управления подачей инструмента гидросуппорта токарного станка амплитудно-импульсным регулированием расхода

которая включает обрабатываемую деталь 1, гидросуппорт с инструментом 2, регулятор расхода 3, эксцентрик 4, насос 5, демпфер 6. На рисунке обозначены: P_y – радиальная составляющая силы резания, S – подача инструмента, D – силотрический датчик, $3У$ – задающее устройство, U_d и U_0 – сигналы датчика и $3У$, $У$ – усилитель, U_y – усиленный сигнал, $АЦП$ – аналого-цифровой преобразователь, $МК$ – микроконтроллер, $ШД$ – шаговый электродвигатель, $РК$ – редукционный клапан, $ЭМ$ – электромагнит, h – величина открытия щели, Q_n ; P_n и Q ; P – соответственно расходы и давления.

Автоматическая система работает следующим образом. При возрастании радиальной составляющей силы резания изменяется выходной сигнал силотрического датчика U_d , что приводит к изменению сигнала рассогласования $U = U_d - U_0$.

В связи с тем, что сигнал рассогласования U слаб по мощности применен усилитель $У$. Сигнал от усилителя U_y поступает в $АЦП$ – цифро-аналоговый преобразователь, далее $МК$ – микроконтроллер, который управляет шаговым двигателем.

Шаговый двигатель поворачивает эксцентрик, имеющий соответствующий профиль. При этом уменьшаются величина открытия рабочей щели регулятора и расход, поступающей в силовой цилиндр, что ведет

к снижению подачи инструмента гидросуппорта и радиальная составляющая сила резания P_y становится постоянной.

При уменьшении силы P_y все процессы в автоматической системе происходят в обратном порядке и в конечном итоге за счет увеличения величины открытия щели регулятора расхода подача инструмента возрастает до установленного значения.

Формула для определения подачи инструмента при наличии обратной связи примет следующий вид:

$$S = \frac{Q}{F} - k_{yt} \frac{(P_x \pm \Delta P_x)}{F^2} \pm k_3 \Delta h, \quad (64)$$

где P_x – нагрузка в гидросуппорте; ΔP_x – изменение нагрузки в гидросуппорте; Δh – изменение щели регулятора расхода под действием электромеханической обратной связи; $k_3 = \mu \pi d \sqrt{(2g/\gamma)} \cdot (\Delta t/T)$ – коэффициент усиления регулятора расхода.

В пятой главе «Разработка информационно-измерительных устройств и оригинальных элементов автоматических систем управления технологическими процессами при механической обработке изделий на станках» разработаны следующие информационные устройства: динамометрические резцедержатели с пьезоэлектрическим и дифференциальными датчиками, предназначенные для измерения составляющих

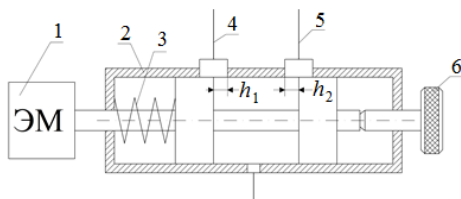


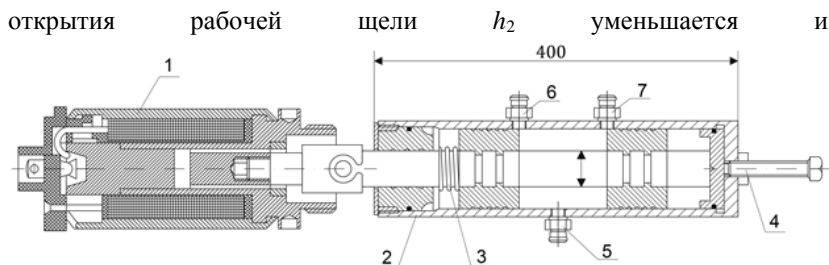
Рисунок 13 - Конструктивная схема регулятора расхода с электромагнитным управлением

сил резания при токарной обработке, тензометрический датчик для измерения давлений в рабочей полости цилиндра гидросуппорта, которые представлены в диссертации в виде материалов проектирования их конструкций и математиче-

ские модели для расчета параметров.

Принципиальная схема регулятора расхода для разработанных автоматических систем представлена на рисунке 13. Конструкция регулятора расхода с электромагнитным управлением показана на рисунке 14.

Регулятор расхода работает следующим образом. При появления электрического сигнала в электромагните 1 подвижный элемент регулятора смещается справа налево сжимая пружину 3. При этом величина



1 – электромагнит; 2 – регулятор расхода; 3 – пружина; 4 – винт регулирования

Рисунок 14 - Конструкция регулятора расхода с электромагнитным управлением

расход, поступающей в силовой цилиндр гидросуппорта уменьшается и скорость подачи инструмента также снижается, что приводит к уменьшению сил резания при черновой обработке. При этом щель h_1 перекрыт соответствующим краном.

При чистовой обработке при срабатывании электромагнита 1, золотник регулятора также смещаясь справа налево увеличивает величину проходной щели h_1 и расход, поступающей в рабочую полость силового цилиндра несколько возрастает для компенсации возросших утечек в нём и этим самым происходит стабилизация подачи инструмента.

В шестой главе «Разработка стендов и методики проведения экспериментов разработанных систем управления технологическими процессами при механической обработке изделий на станках» в диссертационной работе представлены разработанные на базе существующего стенды: экспериментальный стенд для определения сил резания, универсальный гидравлический стенд, стенд для исследования технологических процессов при сверлении.

Разработаны методики проведения экспериментов на этих стендах, описание которых подробно представлены в диссертации.

Эксперименты проводятся поэтапно: исследование качества изготовленных деталей с применением разработанных автоматических систем и без нее.

В седьмой главе «Результаты экспериментального исследования автоматических систем управления технологическими процессами, разработка рекомендаций и экономическое обоснование по их использованию в производстве» представлены полученные результаты экспериментальных исследований разработанных автоматических систем управления технологическими процессами обработки изделий на станках:

а) исследование гидросуппорта подачи инструмента с обратной гидравлической связью и без нее и при этом получены следующие результаты, представленные в диссертации в соответствующих таблицах.

Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что стабилизация скорости при наличии обратной гидравлической связи при изменении нагрузки в широких пределах составляет 0,05-0,4% и при этом существенно уменьшается длительность переходного процесса (рисунок 15);

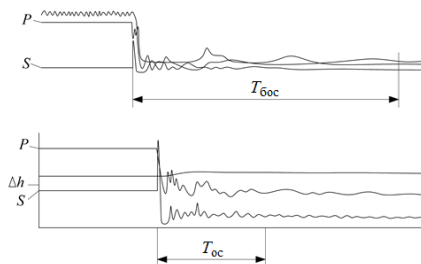


Рисунок 15 - Осциллограммы переходных процессов

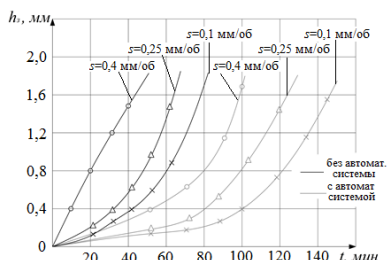


Рисунок 16 - Износ сверла по задней грани при применении автоматических систем и без нее

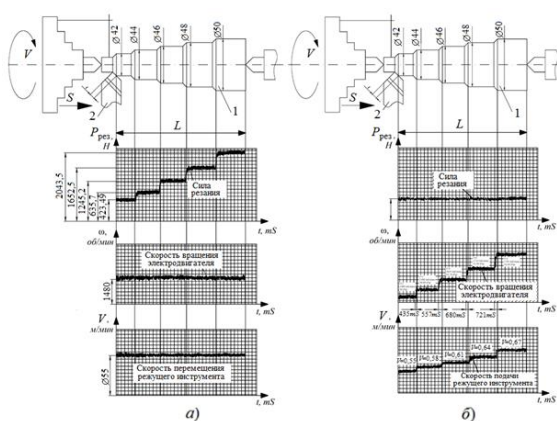


Рисунок 17 - Обработка ступенчатой детали:
а) без автоматической системы;
б) с применением автоматической системы

Уменьшение износа сверла по задней грани при применении разработанной автоматической системы (рисунок 16).

При токарной обработке по исследованию эффективности применения разработанной системы были получены следующие экспериментальные результаты, представленные на рисунке 17.

сунке 17.

Поле рассеивания полученных размеров обработанных изделий показаны на рисунке 18.

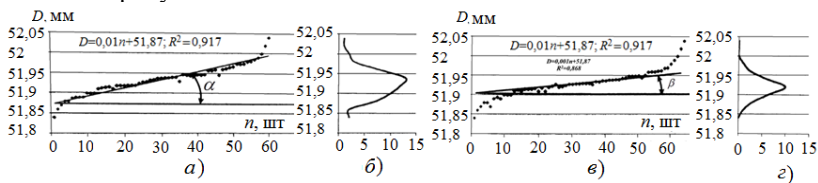


Рисунок 18 - Поле рассеивания, полученных размеров при точении:

а), б) без автоматической системы;
в), г) с применением автоматической системы

В диссертации приведены гистограммы полей рассеивания, а также расчеты по экономической эффективности внедрения автоматической системы управления технологическими процессами в производстве. В диссертации приведена информация о перспективе применения разработанного комплекса универсальных автоматических систем в машиностроении.

ВЫВОДЫ Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблеме в области управления технологическим процессом с целью повышения качества обработки изделий на металлорежущих станках путем автоматического управления технологическими процессами.

Основные научные и практические результаты исследования состоят в следующем:

1. Установлены на основании проведенных экспериментов следующие закономерности:

а) при токарной обработке: возрастания сил резания при увеличении подачи инструмента и снижение их при увеличении скорости резания с 50 м/мин до 250 м/мин;

б) при сверлении отверстий величина осевой силы и крутящего момента падает при возрастании скорости резания;

в) при фрезеровании величина износа фрезы по задней грани уменьшается, а стойкость инструмента возрастает при снижении скорости фрезерования.

2. Разработаны теоретические основы построения автоматических систем управления технологическими процессами, состоящих из объекта регулирования, автоматического регулятора и задающего программного устройства, составлены их математические модели элементов и всей системы, решения которых позволило теоретически исследо-

вать и произвести расчет их статических и динамических характеристик: коэффициентов усиления, вид переходного процесса, его длительность и устойчивость.

3. Разработана классификация способов регулирования скорости подачи инструмента гидросуппорта, приведены результаты анализа их по различным критериям, что позволяет научным и инженерно-техническим работникам сделать правильный выбор способа регулирования применительно к конкретному оборудованию.

4. Разработаны и исследованы комплекс универсальных оригинальных автоматических одноконтурных и двухконтурных систем управления технологическими процессами обработки изделий на токарном и сверлильном станках. Универсальность систем обеспечивается путем простого переключений кранов на чистовую и черновую виды механических обработок, новизна которых подтверждена тремя патентами Кыргызпатента.

5. Разработаны математические модели элементов и всей системы комплекса универсальных автоматических систем, позволяющие произвести расчет массо-геометрических и режимных параметров, необходимых для их выбора, проектирования и изготовления.

6. Разработана оригинальная автоматическая система управления подачей инструмента гидросуппорта с амплитудно-импульсным регулированием с программным обеспечением, позволяющая обеспечить стабильные равномерные подачи инструмента при чистовой обработке, подана заявка для получения патента в Кыргызпатенте.

7. Разработаны оригинальные информационные устройства: динамометрические резцедержатели с пьезоэлектрическим и дифференциальным датчиками для измерения составляющих сил резания при токарной обработке и преобразования сигналов в электрические, а также датчик давления, на которые поданы заявки на получение патента в КР.

8. Разработан и исследован регулятор расхода жидкости с электромагнитным управлением применительно к универсальным автоматическим системам управления технологическими процессами черновой и чистовой обработок на станках.

9. Для выявления работоспособности разработанного комплекса автоматических систем управления технологическими процессами при механической обработке были модернизированы стенды и составлены методики для проведения экспериментальных исследований.

10. Экспериментальными исследованиями доказана эффективность разработанных автоматических систем управления технологическими процессами при механической обработке изделий на станках: стабилизация скорости подачи инструмента составила 96-98 %, длитель-

ность переходного процесса уменьшилась в 3 раза; наблюдается значительное снижение износа и повышение стойкости режущего инструмента; повысилась точность геометрических размеров изделия; уменьшена трудоемкость изготовления деталей на 25 %, рост производительности составил 30 %, снижение себестоимости деталей – 20 %, условная затратная годовая экономия составила 8 276 400 сомов.

Таким образом, результаты диссертационной работы могут эффективно использованы при модернизации существующего парка станков, но и также при создании нового автоматизированного оборудования различного назначения, а также в учебном процессе.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Рекомендации по практическому использованию полученных результатов в диссертации:

1. Разработанные основы теории, методов построения гидравлических автоматических систем управления технологическими процессами, составленные математические модели элементов и всей системы рекомендуются использовать при модернизации существующего парка станков, а также при проектировании нового оборудования с целью обеспечения высокого качества машиностроительной продукции.

2. Разработанные классификации способов регулирования подачи инструмента гидросуппорта токарного станка и результаты проведенных исследований их позволяет научно-техническим работникам сделать правильный выбор способа регулирования применительно к конкретному оборудованию и произвести необходимые расчеты параметров, необходимые для их проектирования.

3. Разработанный комплекс универсальных автоматических систем автоматического управления технологическими процессами одноконтурные и двухконтурные рекомендуется использовать для оптимального управления режимами работ как при чистовой, так и при черновой видах обработок на разных типах станков, что позволяет решать проблему качества изготовления продукции.

4. Универсальные гидроприводы, имеющих гидравлические и электрогидравлические связи, рекомендуется использовать для автоматизации технологических процессов на различных типах станках при металлообработке, а также гидравлических силовых головок и столов агрегатных станков и автоматических линиях, что позволяет существенно повысить качество изготовления деталей, производительность и стойкость режущего инструмента.

5. Универсальный гидропривод с электрогидравлической обратной связью рекомендуется применить в гидропрессах при обработке деталей давлением, поскольку его применение позволяет автоматически осуществлять равномерный процесс деформирования металла, что позволяет получение изделий с оптимальной структурой и с высокими физико-механическими характеристиками.

6. Разработанные информационно-измерительные устройства для измерения составляющих сил резания при токарной обработке с соответствующими преобразованием их в электрические сигналы, а также тензометрический датчик давления могут быть использованы как измерительные устройства для проведения научно-исследовательских работ в области машиностроения, так и при разработке автоматических систем управления технологическими процессами. Представленные в диссертации математические модели и конструкции решают проблему их изготовления.

7. Следует отметить, что все перечисленные выше результаты, полученные в диссертации, могут быть эффективно использованы как в учебном процессе при чтении специальных дисциплин в области автоматизации технологических процессов и при выполнении учебно-исследовательских и научных работ, так и в машиностроительных предприятиях для решения проблем получения качественной продукции.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Турусбеков, Б. С.** Экспериментальное исследование влияния технологических параметров на качество изготовления изделия при токарной и шлифовальной обработке [Текст] / И. Ш. Кадыров, Б.С. Турусбеков // Известия КГТУ. – 2019. – Выпуск 3 (51). – С. 11-17.

2. **Турусбеков, Б. С.** Анализ достоинств и недостатков гидропривода, применяемого на станках [Текст] / Б. С. Турусбеков // Известия КГТУ. – 2019. – № 3 (51). – С. 95-105.

3. **Турусбеков, Б. С.** Разработка автоматической системы управления технологическим процессом при токарной обработке [Текст] / И. Ш. Кадыров, Ж. Т. Темирбеков, Б.С. Турусбеков // Вестник КНАУ. 2019. – № 2 (51). – С. 126-131.

4. **Турусбеков, Б. С.** Разработка математической модели гидроуппора станка с безынерционным регулятором [Текст] / И. Ш. Кадыров, Ж. Т. Темирбеков, Б. С. Турусбеков и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 12. – С. 63-67.

5. **Турусбеков, Б. С.** Разработка математической модели гидроуппора станка с инерционным регулятором [Текст] / И. Ш. Кадыров,

Б. С. Турусбеков, У. Р. Давлятов // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 11 (часть 2). – С. 280-285.

6. **Турусбеков, Б. С.** Разработка математической модели гидросуппорта станка с автоматическим регулятором второго порядка [Текст] / И. Ш. Кадыров, Ж. Т. Темирбеков, Б. С. Турусбеков и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 12. – С. 115-119.

7. **Turusbekov, B.** Development of an automatic system of stabilization thrust force at the turning operations and its mathematical model [Текст] / I. Kadyrov, B. Turusbekov // 1 st international conference on control systems, mahematical modelling, automation and energy efficiency (SUMMA), IEEE – Lipetsk, 2019. – PP. 255-257.

8. **Турусбеков, Б. С.** Методика определения жёсткости технологической системы токарного станка [Текст] / Б. С. Турусбеков, И. Ш. Кадыров // Вестник КРСУ. – 2019. – № 12. Т.19. – С. 109-112.

9. **Турусбеков, Б. С.** Экспериментальное исследование гидросуппорта подачи инструмента токарного станка с обратной гидравлической связью и без нее [Текст] / Б. С. Турусбеков // Вестник КРСУ. – 2019. – № 12, Т. 19. – С. 103-108.

10. **Турусбеков, Б. С.** Динамометрический резцедержатель с индуктивным дифференциальным датчиком для измерения тангенциальной составляющей силы резания [Текст] / Б. С. Турусбеков // Известия КГТУ. – 2019. – № 52. – С. 21-27.

11. **Турусбеков, Б. С.** Исследование способов регулирования и стабилизации скорости движения гидропривода металлорежущих станков [Текст] / Б. С. Турусбеков // Известия КГТУ. – 2019. – № 52. – С. 28-36.

12. **Турусбеков, Б. С.** Разработка автоматической системы управления подачей инструмента гидросуппорта токарного станка [Текст] / И. Ш. Кадыров, Ж. Т. Темирбеков, Б. С. Турусбеков // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 1. – С. 10-16.

13. **Турусбеков, Б. С.** Экспериментальные стенды для исследования технологических процессов механической обработки деталей на токарном станке [Текст] / Б. С. Турусбеков, И. Ш. Кадыров // Вестник КГУСТА. – 2019. – № 4 (66). – С. 594-598.

14. **Турусбеков, Б. С.** Экспериментальное исследование эффективности системы автоматического управления технологическим процессом на токарном станке [Текст] / Б. С. Турусбеков, И. Ш. Кадыров // Вестник КГУСТА. – 2019. – № 4 (66). С. 599-604.

15. **Турусбеков, Б. С.** Экспериментальное исследование влияния скорости резания на осевую силу и крутящий момент при сверлении и

фрезеровании. [Текст] / И. Ш. Кадыров, Ж. Т. Темирбеков, Б. С. Турусбеков и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 12 (часть 2). – С. 212-217.

16. **Турусбеков, Б. С.** Разработка универсальной автоматической системы управления технологическим процессом обработки отверстий многолезвийным инструментом [Текст] / Ж. Т. Темирбеков, И. Ш. Кадыров, Б. С. Турусбеков и др. // Аграрный Вестник Верхневолжья. – 2020. – № 1 (30) – С. 114-119.

17. **Турусбеков, Б. С.** Разработка информационных устройств систем автоматического управления [Текст] / И. Ш. Кадыров, Ж. Т. Темирбеков, Б. С. Турусбеков и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 2. – С. 25-29.

18. Пат. 2208 Кыргызская Республика, KG № 2208, С1, кл В 23Q 15/00, 30/09, 2019. Способ регулирования подачи инструмента гидросуппорта с частотно-импульсным регулированием расхода жидкости [Текст] / Б. С. Турусбеков, И. Ш. Кадыров; Бишкек. КНАУ. – № 20190068.1; заявл. 30.09.19; опубл. 31.07.20, Бюл. №7. – 4 с.: ил.

19. Пат. 291 Кыргызская Республика, KG № 291, кл В 23Q 15/00, В 23Q 15/14, 30/09, 2019. Универсальная гидравлическая автоматическая система с обратной гидравлической связью [Текст] / Б. С. Турусбеков, И. Ш. Кадыров; Бишкек. КНАУ. – № 20200015.2; заявл. 30.09.19; опубл. 31.07.20, Бюл. №7. – 5 с.: ил.

20. Пат. 292 Кыргызская Республика, KG № 292, кл В 23Q 15/00, В 23Q 15/14, 30/09, 2019. Гидравлическая автоматическая система стабилизации радиальной составляющей силы резания [Текст] / Б. С. Турусбеков, И. Ш. Кадыров; Бишкек. КНАУ. – № 20200016.2; заявл. 30.09.19; опубл. 31.07.20, Бюл. №7. – 4 с.: ил.

21. **Turusbekov, B.** Universal automatic process control system for turning machines [Текст] / I. Kadyrov, B. Turusbekov, Zh. Temirbekov, U. Davlatov // 3 st international conference on control systems, mahematical modelling, automation and energy efficiency (SUMMA), IEEE – Lipetsk, 2021. – PP. 1229-1232.

Турсубеков Бактыбек Сагындыковичтин «Машина куруу технологиялык жараяндарды автоматтык башкаруу гидравликалык тутумдары менен түзүлүштөрүн куруу теориясы, усулдарынын негиздерин иштеп чыгуу» деген темадагы 05.02.08 – машина куруу технологиясы адистиги боюнча техника илимдеринин доктору окумуштуу даражасын издеп алуу үчүн жазылган диссертациясынын

РЕЗЮМЕСИ

Түйүндүү сөздөр: теория, автоматтык система, технология, станок иштетүү шарты, гидро жана электрокыймылдаткычтар, маалыматтык түзүлүштөр, иштетүүнүн сапаты, универсалдуу автоматтык тутумдар.

Изилдөөнүн объектиси: металл кесүүчү станоктордон жана тиешелүү автоматтык тутумдардан турган технологиялык тутум.

Изилдөөнүн предмети: металл кесүүчү станоктордо буюм кесүү жараяндарын башкаруунун универсалдуу автоматтык тутумдары.

Иштин максаты: буюмдарды сапаттуу даярдоо технологиялык жараяндарын башкаруунун автоматтык тутум комплексин иштеп чыгуу.

буюмдарды сапаттуу даярдоо технологиялык жараяндарын башкаруунун автоматтык тутум комплексин иштеп чыгуу

Изилдөөнүн усулдары жана аппаратурасы: машина куруу технологиясын, автоматтык башкаруу, гидравлика, физика, электрониканын негизги мыйзамдарында, жана метафизика, статистиканын усулдарында аткарылган.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы: буюмдарды механикалык иштетүү технологиялык жараяндарын автоматташтыруу жаатындагы жаңы илимий багыт – металл кесүүчү станоктордун колдонмолуу буюмдарды даярдоо технологиялык жараяндарын башкаруу, көп контурлуу жана универсалдуу автоматтык тутумдарын түзүү иштелип чыкты. Иштетүүлөрдүн эки – таза жана жумушчу түрүндө колдонмолуу токардык көзөөчү станоктордо буюмдарды иштетүүнүн, башкаруунун универсалдык тутумдары комплекси иштелип чыкты.

Автоматтык тутумдардын жаңылыгы КРнын Интеллектуалдык менчик жана инновациялар кызматынын патенттери менен тастыкталды.

Колдонуу боюнча сунуштар: диссертациялык иштин натыйжалары технологиялык жараяндарды окуп жаткан бакалавр, магистрант, аспиранттарга атайын дисциплиналарды окууда колдонулат, БМЗ ААК ДАСТАН ААК ишканаларында негизги товарды өндүрүүдө автоматташтыруу технологиясында колдонулат.

Колдонуу аймагы: буюмдарды механикалык иштетүү технологиялык жараяндарын автоматташтыруу, башкаруу, тоо-кен өндүрүшүндө металлдарды басым менен иштетүү.

РЕЗЮМЕ

диссертации Турусбекова Бактыбека Сагындыковича на тему: «Разработка основ теории, методов построения гидравлических систем и устройств автоматического управления технологическими процессами в машиностроении» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения

Ключевые слова: теория, методы построения автоматических систем, технология обработки, станок, инструмент, гидропривод, информационные устройства, качество обработки, стойкость инструмента.

Объект исследования: технологические системы, состоящие из металлорежущих станков и соответствующих автоматических систем, управляющих процессом обработки изделий.

Предмет исследования: универсальные автоматические системы управления технологическими процессами механической обработки изделий.

Цель работы: разработка методов построения гидравлических систем и устройств автоматического управления технологическими процессами по параметрам: подача инструмента и скорость резания для повышения качества изготовления изделий.

Методы исследования и аппаратура: теоретические исследования проводились разработкой математических моделей, экспериментальные данные обрабатывались методами математической статистики с использованием теории корреляции. При проведении экспериментов использовалось оборудование: стенды, электроизмерительная аппаратура.

Полученные результаты и их новизна: разработано новое научное направление в области технологии машиностроения, созданы многоконтурные и универсальные автоматические системы управления технологическими процессами изготовления изделий для различных типов металлорежущих станков, разработан комплекс универсальных автоматических систем управления технологическими процессами обработки изделий на токарном, сверлильном и шлифовальном станках, применительно к двум видам обработок – чистовой и черновой.

Рекомендации по использованию: результаты диссертационной работы используются при чтении специальных дисциплин бакалаврам, магистрантам и аспирантам, изучающих вопросы технологии машиностроения, а также внедрены на предприятиях ОАО БМЗ и ОАО ДАСТАН. Акты внедрения представлены в приложении диссертации.

Область применения: технология машиностроения, процессы механической обработки изделий.

RESUME

Thesis by Turusbekov Baktybek Sagyndykovich “Development of Fundamentals of Theory and Methods for Building of Hydraulic Systems and Devices for Automatic Process Management in Mechanical Engineering” for the academic degree of Doctor of Engineering, specialty 05.02.08 – mechanical Engineering Technology

Key words: theory, methods of building of automatic systems, technology, mechanical conversion, machine tool, processing mode, hydraulic and electrical drives, information equipment, processing quality, tool life, universal automatic systems.

Research object: technological systems consisting of metal-cutting machine tools and related automatic systems managing the conversion process.

Research subject: universal automatic process management systems of product machining using metal-cutting machine tools.

Purpose: to develop a set of universal automatic process management systems for high-quality item manufacturing using metal-cutting machine tools.

Research methods and equipment: the research is performed based main laws and provisions of the cutting theory, mechanical engineering theory, automatic management, hydraulics, physics, electronics, and methods of mathematical physics and statistics.

Results achieved and their novelty:

A new research area has been developed in the field of automatic process management of product machining: development of multiloop and universal automatic process management systems of manufacturing applicable to various types of metal-cutting machine tools ensuring better performance and product quality.

A set of universal automatic process management systems has been designed for turning machine and drilling machine operations applicable to the two types of processing, i.e. finishing and rough machining.

The novelty of the abovementioned automatic systems has been certified by patents issued by the Kyrgyz Republic Patent Agency.

Recommendations for use: the results of the thesis work may be used in the reading of specialized subjects to BE, ME, and post-graduate students studying the aspects of process automation. The results have also been introduced at the BMZ OJSC and Dastan OJSC industrial facilities for core product process automation.

Scope of application includes process automation and management in mechanical machining, pressure metal treatment, and mining operations.

