

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И КУЛЬТУРЫ  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. И. РАЗЗАКОВА**

*На правах рукописи*

*УДК 621.9.06-52-19*

**Глазунов Александр Владимирович**

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАЗОРОВ В ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ  
ОПОРАХ СТАНКОВ**

**Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и произ-  
водствами**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**БИШКЕК - 2003**

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и автоматизация машиностроения» Кыргызского Технического Университета им. И. Раззакова.

**Научный руководитель:** академик ИА КР, доктор технических наук, профессор *Муслимов А.П.*

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор *Батырканов Ж.И.*

Кандидат технических наук, доцент  
*Миркин Е.Л.*

**Ведущая организация:** Институт автоматики НАН КР

Защита состоится « 29 » марта 2003 г. в 10 ч. 00 м., на заседании диссертационного Совета Д.05.02.177 при Кыргызском техническом университете им. И. Раззакова по адресу: 720044, Бишкек, пр. Мира 66

Диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КТУ им. И. Раззакова



Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » « \_\_\_\_\_ » 200\_ г.

Ученый секретарь диссертационного  
Совета Д.05.02.177 кандидат  
технических наук, доцент

Омуралиев У.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Для улучшения эксплуатационных показателей опорных узлов металлорежущих станков в их конструкцию вводятся элементы, повышающие жесткость узлов, их несущую способность, демпфирование возникающих в процессе работы вибрации, коэффициент полезного действия (КПД), плавность перемещений, точность позиционирования, уменьшающие износ их рабочих поверхностей и сохранять первоначально заданную точность.

Известен ряд инженерных решений и разработок, направленных на улучшение выше названных характеристик станка путем изменения и совершенствования конструкции опорных узлов, использовании в них направляющих качения, скольжения, аэростатических и гидростатических направляющих, а также на применение систем автоматического регулирования основных его параметров, определяющих его качество.

В работе рассматриваются как объект исследования гидростатические опорные узлы (ГО) различных типов, которые нашли широкое применение в современном станочном оборудовании [1, 2, 3]. Однако, на некоторых эксплуатационных режимах, в них возникают погрешности, обусловленные главным образом нестабильностью толщины масляной пленки (зазора) между подвижным и неподвижным элементами ГО. При требованиях высокой точности это негативно сказывается на качестве обрабатываемых деталей и, на производительности оборудования.

На основании изложенного становится очевидной актуальность проблемы автоматической стабилизации толщины зазора в ГО.

**Связь темы диссертации** с крупными научными программами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с проблемой 01-02.Н4 – Разработка технологических методов обеспечения заданной точности и вопросы управления точностью изготовления изделий в машиностроении.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка системы автоматического регулирования, величины зазора в ГО независимо от изменения внешней нагрузки.

При выполнении работы были решены следующие задачи:

1. Исследованы причины появления погрешностей в известных ранее ГО;
2. Разработаны оригинальные системы стабилизации зазора в ГО, новизна которых подтверждена соответствующими патентами;
3. Разработана математическая модель системы электрогидравлической стабилизации зазора в ГО.
4. Теоретически исследованы статические и динамические характеристики системы электрогидравлической стабилизации зазора в ГО. Получены формулы, позволяющие производить настройку параметров системы, исключающую появление статической ошибки;
5. Спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд;

**Объект и методы исследований.** При выполнении диссертационной работы основу методологии составляют основные положения аналитической механики, гидравлики, электромеханики, электроники и теория автоматического регулирования.

### Научная новизна полученных результатов.

1. Разработаны оригинальные автоматические системы стабилизации зазора в ГО, позволяющие поддерживать величину зазора в ГО в пределах необходимой величины независимо от изменения внешней нагрузки. Новизна предложенных систем подтверждена патентами КР (/ 36 /, / 37 /).

2. Разработана математическая модель автоматической системы электрогидравлической стабилизации зазора в ГО, позволяющая производить расчет основных параметров системы с помощью ЭВМ. Получены формулы, позволяющие производить настройку параметров системы, исключающую появление статической ошибки.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные системы автоматической стабилизации зазора в гидростатических опорах металлорежущих станков позволяют повысить его производительность и точность, а следовательно и качество выпускаемой продукции. Результаты работы применимы при разработке высокоточных станков и приборов.

Экономическая значимость полученных результатов. Полученные теоретические и практические результаты будут использованы при создании конкурентоспособных точных станков и приборов, внедрение которых в производство существенно повысит производительность и качество машиностроительной продукции.

Основные положения диссертации выносимые на защиту. Результаты теоретического анализа существующих систем регулирования зазора в гидростатических опорах, исследования причин нестабильности зазора в них при значительном изменении внешней нагрузки;

1. Оригинальные системы автоматической стабилизации зазора в ГО, новизна которых подтверждена соответствующими патентами;

2. Математическая модель системы электрогидравлической стабилизации зазора в гидростатических опорах и пакет прикладных программ для расчета ее основных параметров;

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований разработанной автоматической системы электрогидравлической стабилизации зазора в гидростатических опорах и рекомендации по их использованию при разработке высокоточных станков и приборов.

Личный вклад соискателя. Соискателем выполнены следующие работы: разработка двух систем автоматического регулирования зазоров в гидростатических опорах, теоретическое их исследование, создание экспериментально-стенда и проведение экспериментальных работ.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты доложены на научно-технической конференции в Международном Университете Кыргызстана (май 1998 г.), юбилейной международной конференции Кыргызского Технического Университета (ноябрь 1999 г.), на научных семинарах кафедр и объединенных заседаниях факультета Транспорта и машиностроения в 2000, 2001, 2002 годах.

Публикация результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных трудах в научных журналах КР и зарубежом, в том числе получены 2 патента КР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основной части и выводов общим объемом 128 стр., 43 рисунков, 9

таблиц, списка литературы из 74 наименований и приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены результаты обзора и анализа научнотехнической литературы по теме диссертационной работы. Весьма важным условием эффективной работы ГО является также поддержание величины зазора в ней в пределах выбранной требуемой величины.

Это, в свою очередь, создает предпосылку для разработки систем стабилизации зазора в ГО, при помощи которых толщина масляного зазора в них поддерживалась бы постоянной даже при значительной динамической нагрузке на опору.

Определены критерии, которыми будет характеризоваться качество работы разрабатываемых систем стабилизации зазора в ГО. В нашем случае, оценка проектируемых систем будет проводиться по статическим и динамическим критериям, поскольку они напрямую связаны с экономическими показателями.

При оценке качества системы стабилизации зазора в ГО основным статическим критерием будем считать величину ошибки в установившемся состоянии (статической ошибки). В качестве динамических критериев принимаются: вид и параметры переходного процесса, а также устойчивость работы системы на всем диапазоне рабочих характеристик.

Вторая глава посвящена разработке систем автоматической стабилизации зазора в ГО (системы с механической обратной связью и электрогидравлической системы). Принципиальная схема одной из разработанных новых систем данного типа показана на рис. 1. В данной схеме используется регулятор расхода масла с жесткой механической обратной связью. Предлагаемая замкнутая ГО (см. рис. 1) включает подвижный элемент 1 и неподвижный элемент 2. Подвижный элемент содержит несущие карманы 3 и 4, соединенные с источником питания (масляным насосом) 5 через регулятор расхода масла, в корпусе 6 которого расположен подпружиненный золотник 7. С источником питания регулятор соединен через выпускное отверстие 8, а с несущими карманами опоры - через выпускные отверстия 9 и 10, которые частично перекрыты буртиками 11 и 12 золотника 7. Через отверстие 13 в подвижном элементе опоры золотник 7 взаимодействует с ее неподвижным элементом, прижимаясь к нему пружиной 14.

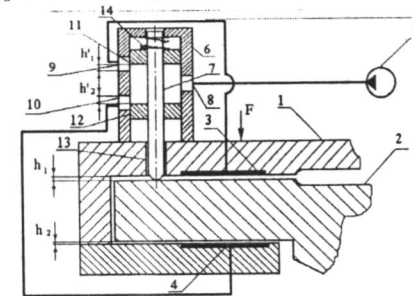


Рис. 1. Система стабилизации зазора в замкнутой ГО

В процессе работы, при отсутствии внешней нагрузки, масло от источника 5, проходя через регулятор расхода, попадает в несущие карманы 3 и 4. Отверстия 9 и 10 частично перекрыты золотником 7 таким образом, что между подвижным и неподвижным элементами опоры, как со стороны кармана 3, так и со стороны кармана 4 под действием давления масла образуются зазоры определенной величины, которые соответствуют заданному режиму работы.

При нагружении опоры внешней силой  $F$  подвижный элемент опоры 1 смещается относительно неподвижного элемента опоры 2 в направлении действия нагрузки. Это приводит к уменьшению зазора между элементами 1 и 2 опоры со стороны несущего кармана 3 и к увеличению зазора со стороны несущего кармана 4. Соответственно корпус 6 регулятора расхода масла, жестко связанный с подвижным элементом опоры 1, смещается относительно золотника 7, буртик 11 приоткрывает отверстие 9, а буртик 12 прикрывает отверстие 10. При этом расход масла через отверстие 9, питающее карман 3 увеличивается, а через отверстие 10, питающее карман 4 уменьшается, что компенсирует соответствующее изменение толщины зазоров между подвижным и неподвижным элементами опоры, вызванное действием внешней нагрузки.

Уравнение равновесия подвижного элемента замкнутой ГО с параметрами и обозначениями аналогичными рассмотренным выше, но с нерегулируемой подачей масла в несущие карманы, имеет вид

$$P + F = K \cdot C \cdot S_{\text{эф}} \left( \frac{h'_1}{(h_1 - \Delta h)^3} - \frac{h'_2}{(h_2 + \Delta h)^3} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta h$  - изменение зазора в опоре под действием внешней нагрузки,

$P$  - сила тяжести подвижного элемента опоры,

$F$  - внешняя нагрузка,

$h_1$  - величина зазора в опоре у поверхности с несущим карманом 3,

$h_2$  - величина зазора в опоре у поверхности с несущим карманом 4,

$K$  - постоянная величина, зависит от геометрических параметров регулятора расхода и вязкости масла,

$h'_1$  - величина пропускной щели отверстия 11,

$h'_2$  - величина пропускной щели отверстия 12.

$S_{\text{эф}}$  - эффективная площадь несущего кармана подвижного элемента опоры.

Теоретический анализ разработанной системы показывает, что основными ее достоинствами являются: обеспечение постоянства зазоров в замкнутой ГО с более высокой точностью, чем при постоянной подаче масла в несущие карманы опоры; простота расчета схемы и высокая надежность устройства.

Однако, рассматриваемая замкнутая ГО имеет следующие недостатки: ошибка в установившемся состоянии; появление автоколебаний на некоторых эксплуатационных режимах.

В предлагающейся системе (рис.2.) вышеотмеченные недостатки в полной мере устраняются. В ней, как и в рассмотренной выше системе стабилизации использована обратная связь по величине зазора в опоре (обратная связь по давлению исключена), однако в данном случае в цепи регулирования системы применена электрическая схема.

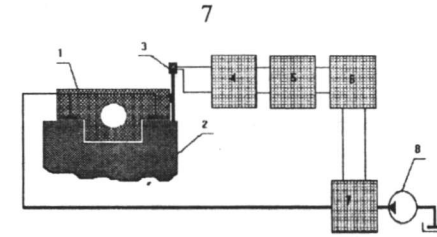


Рис. 2. ГО с электрогидравлической стабилизацией зазора

Сигнал управления в предлагающейся системе возникает при изменении величины зазора в опоре, которое фиксируется *высокочувствительным дифференциальным индуктивным датчиком перемещения*, а управление расходом масла, подаваемого в несущие карманы опоры осуществляется *электрогидравлическим регулятором расхода*.

При нагружении ГО внешней силой подвижный элемент 1 смещается относительно неподвижного элемента 2 в направлении действия нагрузки, зазор между этими элементами уменьшается, ток на выходе индуктивного преобразователя увеличивается, это приращение усиливается УПТ 5 и подается на вход схемы включения электромагнита (СВЭ) 6. Когда входной ток схемы 6 достигает уровня предварительно настроенного порога чувствительности, на выходе СВЭ появляется напряжение, которое подается на вход электрического привода регулятора расхода масла, в качестве привода в данной схеме использован электромагнит. Под действием электромагнитной силы золотник регулятора расхода масла 7 смещается, что изменяет гидравлическое сопротивление потока масла, подаваемого в несущие карманы ГО. Таким образом, подача масла в несущие карманы соответствующим образом корректируется, что компенсирует действие внешней нагрузки и восстанавливает зазор в опоре до первоначальной величины.

Отличительными особенностями данной системы являются:

1. В качестве датчика могут быть использованы как индуктивный, так и емкостной или тензометрический преобразователи.

2. Корректировка подачи масла в несущие карманы опоры осуществляется электрогидравлическим регулятором расхода жидкости, который проектируется и настраивается по специально разработанной методике.

3. Дискретное управление расходом жидкости позволяет регулировать зазор в опоре с высокой точностью и стабильностью.

**Третья глава** содержит разработку и исследование математической модели системы электрогидравлической стабилизации зазора в ГО.

**Регулятор расхода масла.** В системе стабилизации зазора использован регулятор золотникового типа. Для регулятора такого типа справедливо

$$Q = \mu \cdot \pi \cdot d_1 \cdot h_v \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}, \quad (2)$$

где  $\mu = 0,62 \dots 0,65$  - коэффициент расхода регулятора;  $d_1$  - диаметр плунжера золотника;  $\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  - плотность масла;  $\Delta p = p_0 - p_1$  - перепад да-

ления на регуляторе.

**Гидростатическая опора.** Под действием давления масла, подаваемого в несущие карманы опоры, подвижный элемент «всплывает», между рабочими поверхностями опоры образуется масляная пленка толщиной  $h$ . В этом случае уравнение динамического равновесия подвижного элемента ГО

$$M \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} + F = P_{мас}, \quad (3)$$

где  $M$  - масса подвижного элемента;  $F$  - величина нагрузки;  $P_{мас}$  - сила, обусловленная давлением масла.

Зависимость величины зазора в опоре от внешней нагрузки

$$h_o = h_{ин} \sqrt{\frac{P}{P + F_n}}. \quad (4)$$

Расчетные характеристики, полученные при подстановке численных значений параметров системы для различных значений начального зазора в опоре приведены на рис.3.

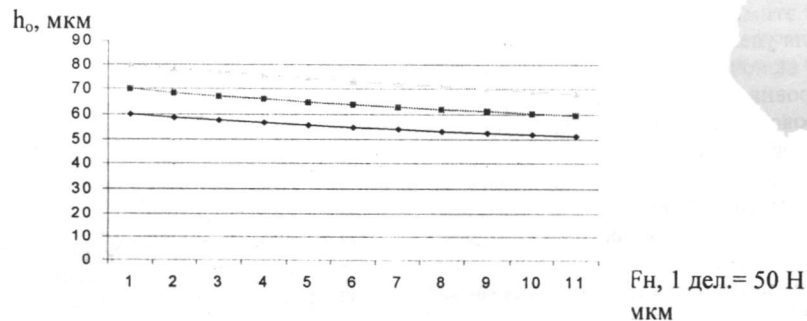


Рис. 3. Изменение зазора в ГО при действии внешне нагрузки

Зависимости ширины пропускной щели регулятора  $h_p$  от внешней нагрузки, полученные из формулы

$$h_p(F_n) = \frac{4524,88 \cdot (P + F_n) \cdot h_o^3}{\mu \cdot \pi \cdot S_{эф} \cdot d_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \left( p_0 - \frac{P + F_n}{S_{эф}} \right)}}, \quad (5)$$

где  $\mu = 0,65$ ;  $S_{эф} = 0,0468 \text{ м}^2$ ;

$d_1 = 0,011 \text{ м}$ ;  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ ;

$p_0 = 151987 \text{ Па}$ ;  $P = 810 \text{ Н}$ .

для различных начальных значений  $h_p$ , приведены на рис.4 (при расчете использовались значения параметров экспериментальной установки).

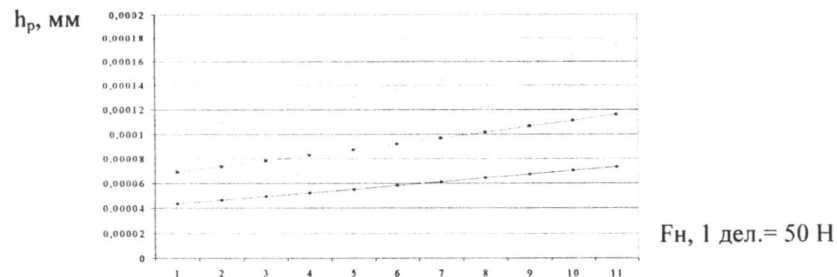


Рис. 4. Открытие пропускной щели регулятора, необходимое для поддержания величины зазора в ГО

**Электромагнит регулятора расхода масла.** Тяговые характеристики электромагнита экспериментальной установки, рассчитанные по формулам, приведенным в диссертации, показаны на рис. 5.

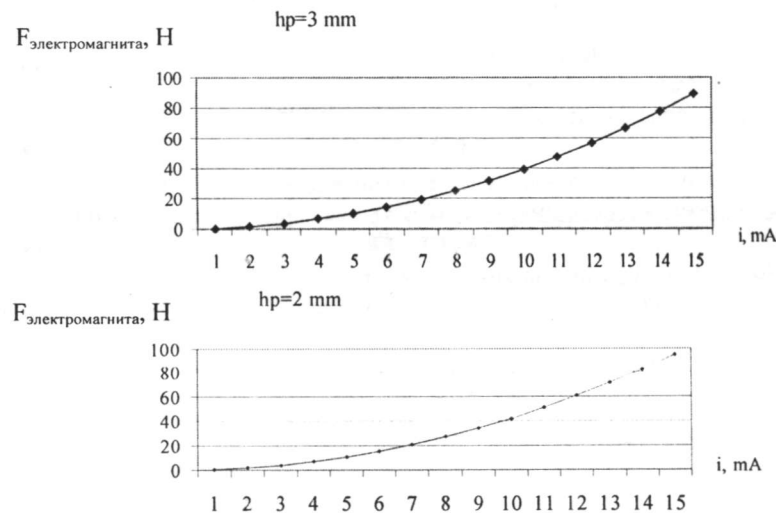


Рис. 5 Тяговые характеристики электромагнита экспериментальной установки для различных значений воздушного зазора

**Измерительный блок.** Измерительный блок предназначен для преобразования изменения зазора в опоре в постоянное напряжение, подаваемое на входы схемы включения электромагнита и самопишущего миллиамперметра.

**Передаточные функции отдельных элементов системы автоматической стабилизации зазора в ГО.** Блок-схема системы приведена на рис. 6., где О - гидростатическая опора, Д- измерительный блок, НЭ - схема включения электромагнита, ЭМ- электромагнит, Р- регулятор расхода масла. Начнем с объекта регулирования.

Гидростатическая опора имеет передаточную функцию:

- по управлению  $W_o(p) = \frac{k_o}{T^2 \cdot p^2 + p},$  (6)

- по возмущению  $W_n(p) = -\frac{k_n}{T^2 \cdot p^2 + p}.$  (7)

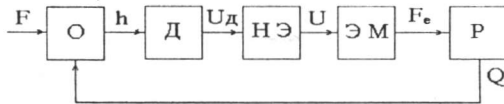


Рис. 6. Блок-схема системы электрогидравлической стабилизации зазоров ГО

**Измерительный блок.** При рассмотрении динамики измерительного блока инерционностью индуктивного преобразователя, выпрямителя и усилителя постоянного тока можно пренебречь, поскольку она значительно меньше инерционности других элементов системы.

Его передаточная функция:

$$W_o(p) = K, \quad (8)$$

где K- статический коэффициент усиления блока.

**Схема включения электромагнита (СВЭ) и ее передаточная функция**

$$W_n(p) = K_n. \quad (9)$$

$K_n$  - Коэффициент усиления этого элемента.

**Электромагнитный регулятор расхода масла. Обмотка электромагнита.** Передаточная функция этого блока имеет вид:

$$Wk(p) = \frac{k_k}{T_k p + 1}. \quad (10)$$

Передаточная функция **якоря электромагнита** имеет вид

$$We(p) = K_e. \quad (11)$$

Для передаточной функции **золотника электромагнита** справедливо:

$$Wz(p) = \frac{k_1}{T_o^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot p + 1}. \quad (12)$$

Передаточная функция **пропускная щели регулятора расхода масла** имеет вид

$$W_g(p) = K_g, \quad (13)$$

где  $K_g$  - коэффициент усиления данного звена.

На рис. 7. представлена структурная схема системы стабилизации зазора в гидростатической опоре.

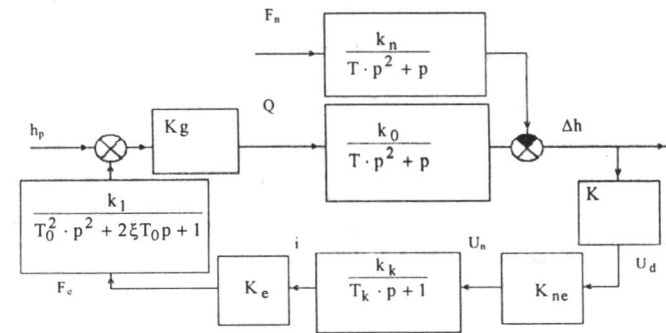


Рис. 7. Структурная схема системы стабилизации зазора в ГО

Используя правило нахождения передаточной функции одноконтурных систем /5, 6/, определяем передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W = \frac{k}{(Tk \cdot p + 1)(T_o^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot p + 1)(T^2 \cdot p^2 + p)}, \quad (14)$$

где K- общий коэффициент усиления разомкнутой системы

$$k = K_g \cdot k_o \cdot K \cdot K_n \cdot k_k \cdot K_e \cdot k_1. \quad (15)$$

- по задающему воздействию ( $h_p$ )

$$Wh_z = \frac{Wh(p)}{1-W} = \frac{K_g \cdot k_o \cdot (Tk \cdot p + 1)(T_o^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot p + 1)}{(Tk \cdot p + 1)(T_o^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot p + 1)(T^2 \cdot p^2 + p) - k}, \quad (16)$$

- по возмущающему воздействию (F) -

$$W(F)_z = \frac{Wf(p)}{1-W} = -\frac{k_n \cdot (Tk \cdot p + 1)(T_o^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot p + 1)}{(Tk \cdot p + 1)(T_o^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot p + 1)(T^2 \cdot p^2 + p) - k}. \quad (17)$$

**Исследование устойчивости системы.** Заменяв в (14)  $p$  на  $j\omega$  определим частотную передаточную функцию линейной части разомкнутой системы, как:

$$W(j\omega) = \frac{k'}{(Tk \cdot j\omega + 1)(T_o^2 \cdot (j\omega)^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot (j\omega) + 1)(T^2 \cdot (j\omega)^2 + j\omega)}, \quad (18)$$

где

$$k' = \frac{k}{k_n}. \quad (19)$$

Для исследования устойчивости рассматриваемой системы регулирования воспользуемся методом, основанным на анализе логарифмических частотных характеристик разомкнутой системы.

Для логарифмической амплитудной частотной функции разомкнутой системы справедливо:

$$20 \cdot \lg k - 20 \cdot \lg \omega - 20 \cdot \lg \sqrt{(Tk \cdot \omega)^2 + 1} - 20 \cdot \lg \sqrt{(1 - T_o^2 \cdot \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot \omega)^2} - 20 \cdot \lg \sqrt{(T \cdot \omega)^2 + 1}. \quad (20)$$

Значения ФЧХ для параметров экспериментального стенда приведены в диссертации.

Для исследования устойчивости системы не имеет смысла строить ФЧХ для частот  $\omega \gg \omega_{cp}$ , поскольку при этом  $|W(j \cdot \omega)| \ll 1$ , т.е. при этих значениях частоты система будет иметь достаточный запас устойчивости по амплитуде, который с увеличением частоты будет увеличиваться (в нашем случае ЛАЧХ при  $\omega > \omega_{cp}$  имеет наклон  $-100$  Дб/дек).

**Оценка и методы повышения качества системы.** При проектировании системы автоматической стабилизации зазора в гидростатической опоре необходимо минимизировать следующие показатели качества:

- статическую ошибку, поскольку она характеризует точность восстановления зазора в опоре после окончания переходного процесса,
- время регулирования, т.к. необходимо, чтобы зазор в опоре восстановился как можно быстрее,
- перерегулирование и колебательность, характеризующие точность зазора в опоре во время переходного процесса.

На рис. 8. изображен приближенный график переходного процесса  $\Delta h_o(t)$ , полученный методом трапеций (автор Солодовников).

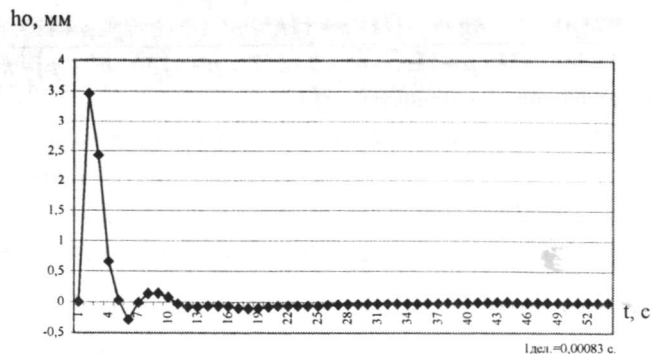


Рис. 8. Переходный процесс в замкнутой системе  $h_o(t)$

При действии на опору нагрузки  $F$  изменение зазора в опоре  $\Delta h_o$  увеличивается и когда достигает значения  $\Delta h_{max}$  (на графике это первый максимум характеристики  $\Delta h_o(t)$ ), происходит срабатывание электромагнита регулятора расхода и зазор в опоре после незначительных колебаний

восстанавливается (установившееся  $\Delta h_o(t) \approx 0$ ). Таким образом, перерегулирование в системе характеризуется величиной  $\Delta h_{max}$ , которая зависит от настройки порога чувствительности СВЭ.

**Четвертая глава** содержит описание и результаты экспериментальных исследований электрогидравлической стабилизации зазора в ГО.

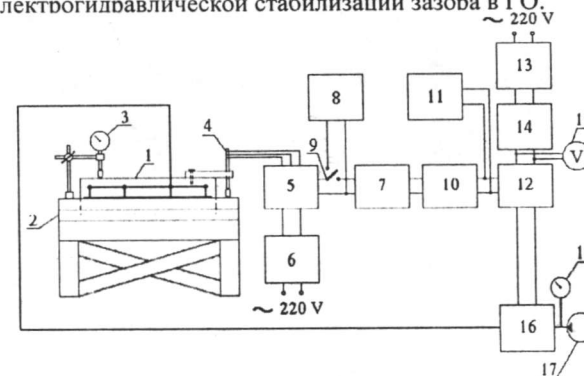
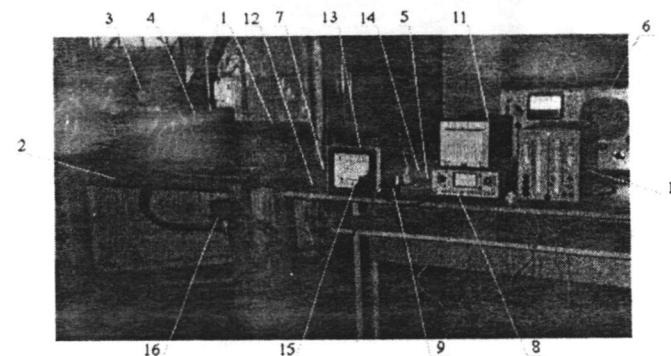


Рис. 9. Схема экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 9. 1 - подвижный элемент ГО экспериментального стенда, 2 - неподвижный элемент ГО экспериментального стенда, 3 - индикатор, 4 - дифференциальный индуктивный датчик, 5 - мостовая схема, 6 - генератор низкой частоты, 7, 8 - выпрямители, 9 - двухпозиционный переключатель, 10 - усилитель постоянного тока (УПТ), 11 - самопишущий миллиамперметр, 12 - схема включения электромагнита, 13 - трансформатор, 14 - выпрямитель, 15 - вольтметр, 16 - электромагнитный регулятор расхода масла, 17 - масляный насос, 18 - манометр.

Статистические характеристики системы по управлению  $h_o(h_p)$ , соответствующее полной компенсации изменения зазора в ГО, вызванного внешней нагрузкой  $F$ , показаны на рис. 11 и 12; статистические характеристики системы по возмущению на рис. 13, 14.



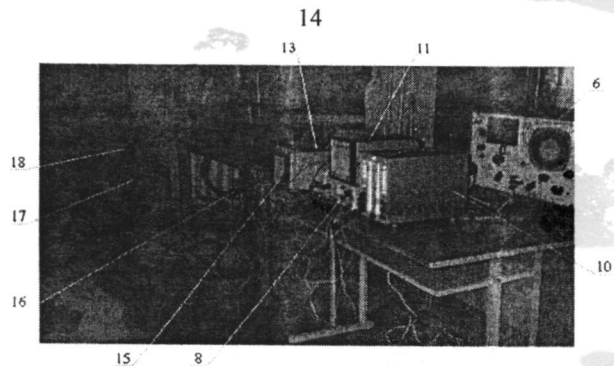


Рис. 10. Экспериментальная установка: а) вид спереди; б) вид сбоку

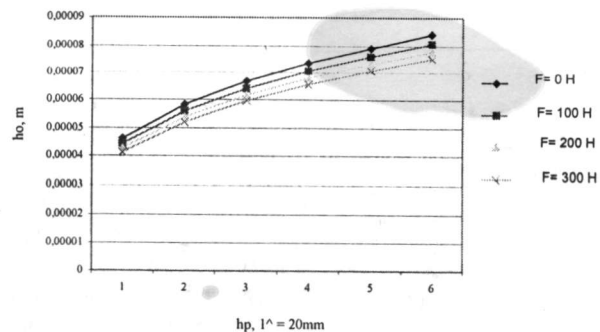


Рис. 12. Статистические характеристики системы по управлению (расчетные данные)

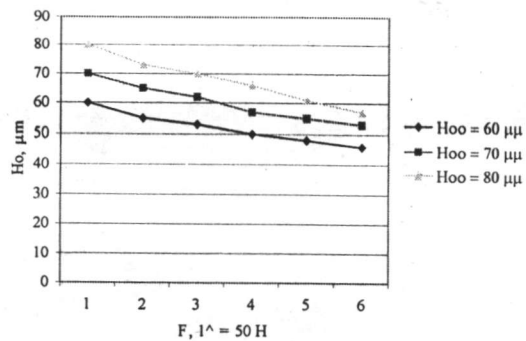


Рис. 13. Статические характеристики системы по-возмущению (экспериментальные данные)

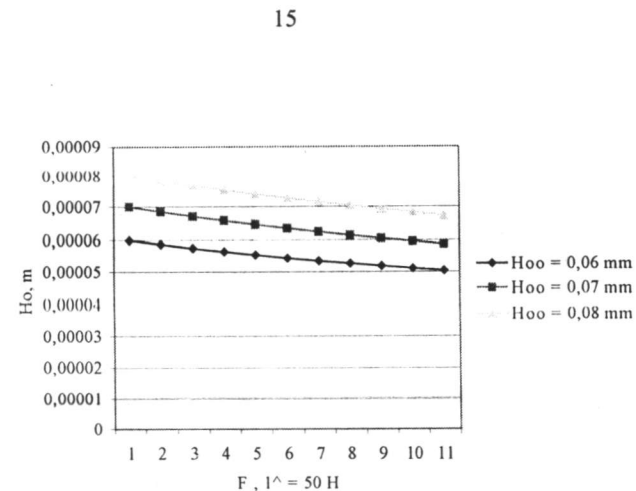


Рис. 14. Статические характеристики системы по возмущению (расчетные данные)

Результаты экспериментов приведены на рис. 15. Теоретически и экспериментально полученные графики имеют аналогичные форму и вид, что доказывает правильность выведенной формулы (3.18). Расхождение между теоретически и экспериментально определенными значениями достигает 9 %.

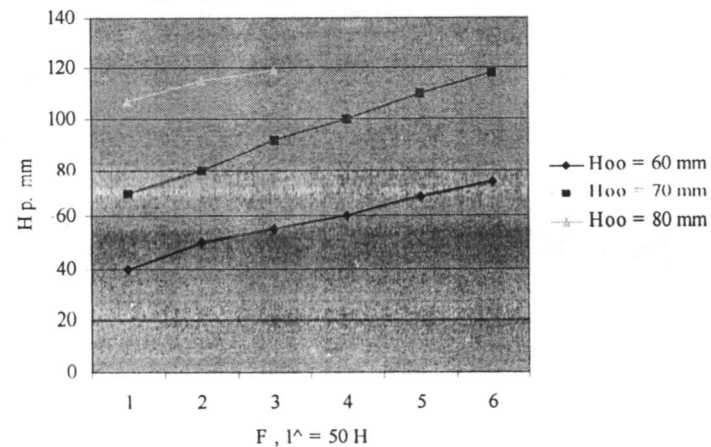


Рис. 15. Открытие пропускной щели регулятора необходимое для компенсации внешней нагрузки



Переходная характеристика разомкнутой цепи по возмущению показана на рис. 16.

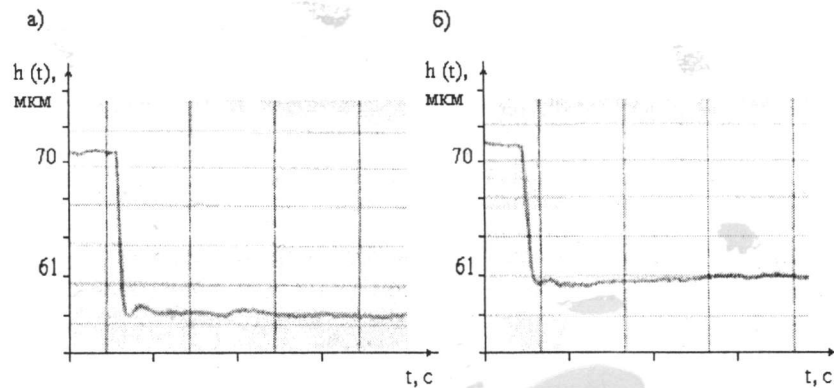


Рис. 16. Переходные процессы в разомкнутой цепи по возмущению (график (а) соответствует большему, в сравнении с (б) значению внешней нагрузки)

Переходный процесс в замкнутой системе. График переходного процесса в системе автоматического регулирования с обратной связью (замкнутой системе), полученный при подаче на подвижный элемент опоры скачкообразной внешней нагрузки, соответствующей настройке пропускной щели регулятора расхода показан на рис. 17.

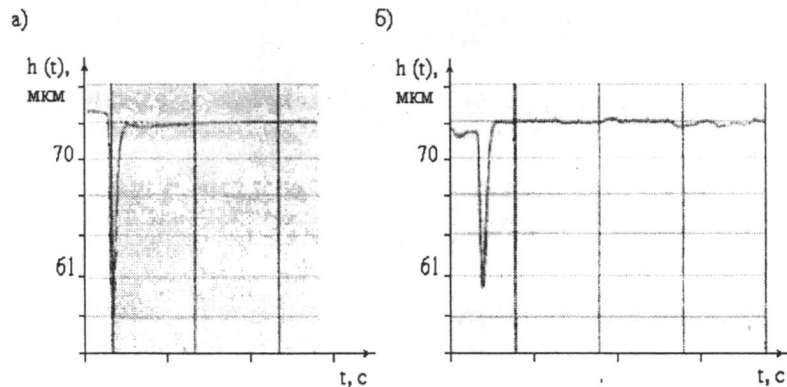


Рис. 17. Переходные процессы в замкнутой системе при оптимальной настройке регулятора

1. Исследованы причины погрешностей, возникающих при использовании ранее известных методов регулирования величины зазора в ГО найден новый подход к решению проблемы, основанный на: бесконтактном отслеживании положения подвижного элемента ГО при помощи высокочувствительных датчиков перемещения; исключении обратной связи по давлению; использовании высокоточных электрогидравлических регуляторов расхода масла метод стабилизации зазоров в ГО.

2. Спроектированы принципиально новые схемы систем регулирования зазоров в ГО: система электрогидравлической стабилизации зазора в ГО с электромагнитным регулятором расхода масла и дифференциальным индуктивным датчиком перемещения, новизна которых подтверждена патентами КР.

3. Разработана и исследована математическая модель системы. Определены условия обеспечения ее эффективной работы путем оптимизации ее основных технических параметров.

4. На основании предложенной математической модели разработана методология проектирования подобных систем стабилизации зазоров в ГО, расчета их статических и динамических характеристик

5. Экспериментальные исследования, проведенные на специально разработанном испытательном стенде доказано правильность теоретических исследований статических и динамических характеристик предложенной системы и возможность производить настройку системы с минимальными статической ошибкой и перерегулированием, исключая возможность появления автоколебаний

6. Доказано, что разработанная система автоматической стабилизации зазора в ГО позволяет сократить не менее, чем в 3...5 раз погрешности, вызванные действием внешней нагрузки, по сравнению с известными аналогами.

7. Разработанная система электрогидравлической стабилизации зазоров в ГО могут быть использованы в высокоточных металлорежущих станках и приборах подвижные узлы которых подвергаются в процессе работы значительным динамическим нагрузкам. Это позволит существенно повысить качество выпускаемых изделий.

#### Список опубликованных работ

1. Муслимов А. П., Глазунов А. В. Автоматические системы регулирования зазора в гидростатических опорах// Вестник Технического Университета.- 1997.- № 1.- с. 29- 31.
2. Кыргызпатент патент № 286 КР, МКИ F 16 С 32/ 06, Гидростатическая опора, с. 6. (Муслимов А. П., Глазунов А. В.)
3. Кыргызпатент патент № 285 КР, МКИ F 16 С 32/ 06, Замкнутая гидростатическая опора, с. 6. (Муслимов А. П., Глазунов А. В.)
4. Муслимов А. П., Глазунов А. В. Система автоматического регулирования зазора в гидростатических опорах// Вестник Международного Университета Кыргызстана.- 1999.- № 1 (5)
5. Муслимов А. П., Глазунов А. В. Электрогидравлическое регулиро-

регулирование зазора в гидростатических опорах // Вестник Технического Университета. - 1998. - № 2 (4). - с. 58- 61.

6. Муслимов А.П., Глазунов А.В. Динамика системы регулирования зазора в гидростатических опорах металлорежущих станков // Проблемы автоматики и управления: Научно-технический журнал / Национальная академия наук Кыргызской Республики. – Бишкек: Илим, 1999. – с. 39-45.

7. Муслимов А.П., Глазунов А.В. Системы автоматической стабилизации зазора в гидростатических опорах металлорежущих станков // Материалы Международной научной конференции №Технология и перспективы современного инженерного образования, науки и производства // Кырг. техн. ун-т. –Б.: 1999. – с. 65-70.

8. Glazunov A.W., Muslimov A.P. Regelung hydrostatischer Elemente erhöht die Genauigkeit von Maschinen // Maschinenmarkt / Das Industriemagazin/ - Wurzburg: 1999. - № 36. - s. 50-53.

9. Glazunov A.W., Muslimov A.P. Das Zueickreissystem der adaptiven Steuerung der hydrostatischen Trager // Technik Report / Beitrage zum stand der Technik / Siemens/ - Berlin und Munchen: 1999. – Jahrgang 2.- № 4. – s. 115-121.

10. Муслимов А.П., Глазунов А.В. Автоматическая система регулирования величины зазора в гидростатических опорах // Изд. Цент. МОК КР: Известия ВУЗов. – 2002. № 1–2. – с. 40-44.

## Резюме

Глазунов Александр Владимировичтин

### Тестердин гидростатикалык таянычтарындагы жылчыктарды башкаруунун автоматташтырылган системасын иштеп табуу жумушуна

Автоматташтыруу, гидростатикалык таяныч, башкаруу, стабилдештирүү, статика, динамика, металлкесүүчү тестер, өтүп кетүүчү процесс, статистикалык каталык, тактык, жылчын.

Бул диссертациялык жумуш сырткы төрмөлүү күчүн көз каранды эмес гидростатикалык таянычтардагы боштуктун өлчөмүн автоматташтырылган система менен башкарууга арналган.

Жумуштун тыянагы болуп боштуктун өлчөмүн стабилдештирүүнүн оригиналдык схемасын түзүүнүн механикалык жана электрогидравликалык жолдору, математикалык моделдерин, массалык геометриялык жана негизги параметрлеринин шарттарын, таяныч конструкциясын жана башкаруу системасын түзүү болуп эсептелет.

Бул иштелип чыккан система жана эсептөө алгоритмы, ошондой эле башкаруунун конструкциялары машинекурууда жогорку тактыктагы станокторду жана приборлорду курууда кеңири колдонулушу мүмкүн.

## Резюме

Глазунов Александр Владимирович

### Разработка автоматических систем регулирования зазоров в гидростатических опорах станков.

Автоматизация, управление, гидростатическая опора, металлорежущие станки, зазор, стабилизация, статика, динамика, переходной процесс, статическая ошибка, точность

Диссертационная работа посвящена разработке автоматической системы регулирования величины зазора в гидростатических опорах независимо от колебания внешней нагрузки.

Результатами работ являются создание оригинальных схем стабилизации величины зазора с механическими и электрогидравлическими связями, математических моделей и алгоритмов расчета основных массово-геометрических и режимных параметров системы и конструкций опор и регуляторов.

Разработанные системы и алгоритмы расчета, а также конструкции регуляторов могут быть широко использованы в создании высокоточных станков и приборов в машиностроении.

## The resume

Glazunov Alexander Vladimirovich

### The development of automatic system of control of clearances in hydrostatic supports of tools

Automation, control, hydrostatic support, metal-cutting tools, clearance, stabilization, statics, dynamics, transitional process, static error, accuracy.

The dissertation is devoted to the elaboration of automatical system of regulation of value of clearance in hydrostatic supports independently of vibration of external loading.

The results of works are the creating of original schemes of stabilization of clearance value with mechanical and electrohydraulic ties, the creating of mathematical models and algorithms of calculation of basic mass-geometrical and regime parameters of system and algorithms of construction of support and regulators.

Worked-out system, algorithms of calculation and also algorithms of regulator construction can be widely used in creating of high-accurate machine-tools and instruments in machinery.

Подписано к печати 21.02.2003 г. Формат бумаги 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офс. Печать офс. Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 66.

720044, Бишкек, ул. Сухомлинова, 20.  
ИЦ "Текник" КТУ, т.: 42-14-55, 54-29-43  
E-mail: [ict@ktu.aknet.kg](mailto:ict@ktu.aknet.kg), [teknik@netbox.ru](mailto:teknik@netbox.ru)