На правах рукописи

Чернов Иван Александрович

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И СРЕДСТВА ИХ КОРРЕКЦИИ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

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

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Бундур Михаил Семенович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Максаров Вячеслав Викторович

– кандидат технических наук, доцент
Хитрик Валерий Эмильевич

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет» («Военмех»)

Защита состоится « 21 » декабря 2010 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корп. I, ауд. 41.

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

Автореферат разослан « 18 » ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Ушомирская Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задачи, связанные с повышением технического уровня металлорежущих станков (МРС), а вместе с тем производительности и качества металлообработки, являются одними из наиболее актуальных для современного машиностроения, и в частности станкостроения.

Совершенствование МРС требует улучшения конструкции отдельных узлов и, в частности, шпиндельных узлов (ШУ), которые определяющим образом влияют на динамические свойства МРС. Использование в опорах ШУ традиционных типов подшипников качения в известной степени препятствует увеличению диапазонов воспринимаемых нагрузок и частот вращения, а также затрудняет максимальную реализацию возможностей современного режущего инструмента. Помимо этого, существует необходимость регулировки шпиндельных подшипников как для работы на тяжелых режимах резания, происходящих при низких оборотах и не требующих высокой точности, так и для чистовой обработки на максимально возможных частотах вращения с высокой точностью. Это также является проблемой при автоматизации процесса металлообработки. В связи с этим перспективным становится использование и совершенствование других типов шпиндельных опор и, прежде всего, гидростатических (особенно для ШУ тяжелых МРС). В гидростатических подшипниках (ГСП) практически полностью исключается износ опор шпинделя. Кроме того, существенно повышаются виброустойчивость (за счет более высокой демпфирующей способности), точность и длительность ее сохранения, термостабильность и другие характеристики.

К настоящему времени выполнено значительное количество как теоретических, так и экспериментальных работ, освещающих создание и совершенствование ШУ на гидростатических опорах (ГСО). Однако, вопросы, связанные с повышением производительности, точности, долговечности, надежности, а также технологичности конструкций ШУ на ГСП требуют дальнейших разработок. Это делает изучение характеристик ГСП весьма актуальной задачей станкостроения.

Целью работы является исследование динамических характеристик ГСП с последующей оценкой качества управления (точности, устойчивости, запаса устойчивости и быстродействия) с помощью компьютерных средств; разработка способов повышения динамического качества ГСП; анализ конструкций ШУ, обладающих более высокими эксплуатационными характеристиками; разработка научно обоснованных рекомендаций для автоматизированного проектирования и промышленной реализации ШУ на ГСП.

Методы и средства исследований. Данная работа предусматривает комплексные исследования динамических свойств ГСП с использованием аппарата теории автоматического управления (ТАУ) и теории колебаний.

Анализ динамических процессов выполнен на базе различных математических моделей ШУ на ГСП. Расчеты основных рабочих характеристик ГСП при различных способах коррекции динамического качества ГСП произведены на ЭВМ с помощью программной системы Mathcad компании PTC (номер лицензии MNT-PKG-TL7540-FN-T2) и специализированных программных комплексов, предназначенных для динамического моделирования систем (SIAM, «МВТУ» и др.)

Новые научные результаты:

– разработана методика расчета геометрических параметров ГСП с учетом основных критериев работоспособности, включающая многопараметрический анализ ГСП при проектировании и расчете его основных рабочих характеристик;

– создана математическая модель, описывающая поведение ШУ на ГСП при приложении внешней нагрузки и учитывающая криволинейность сопряженных поверхностей;

– разработаны алгоритмы динамических расчетов и различные методы коррекции динамического качества ГСП.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

– на основе проведенных комплексных исследований динамических свойств ГСП по ряду показателей разработаны рекомендации по проектированию ШУ;

– выполнена оценка динамического качества ГСП используемого в промышленности серийно выпускаемого станочного оборудования;

– разработаны и внедрены инженерные методики для многопараметрического анализа динамических свойств ШУ на ГСП;

– разработаны различные способы улучшения динамического качества ГСП, пригодные для проектирования, модернизации и моделирования ШУ.

– результаты работы приняты в ЗАО «АВА Гидросистемы» для использования в проектно-конструкторских, исследовательских работах и в процессе изготовления высокоскоростных шпиндельных головок современных средних и тяжелых МРС;

– разработано программное обеспечение для динамического расчета ГСП с построением переходных процессов и логарифмических частотных характеристик;

– разработанные методики исследования ГСП внедрены в учебный процесс в виде методических материалов для подготовки студентов по соответствующим дисциплинам кафедры «Гибкие автоматические комплексы» СПбГПУ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Гибкие автоматические комплексы» ММФ СПбГПУ; на ежегодно проводимом

«Политехническом симпозиуме» в 2006, 2009 и 2010 г. (СПбГПУ); на Всероссийском форуме «Наука и инновации в технических университетах» в 2007-2008 г.г. (СПбГПУ); на Научно-методической конференции ММФ в 2007 г. (СПбГПУ); на 7-й Международной конференции «Research and Development in Mechanical Industry» RaDMI в 2007 г. (Белград, Сербия); на Международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития» в 2008 г. (СПбГПУ); на XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» в 2008 г. (СПбГПУ); на Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Неделя науки СПбГПУ» в 1997-1999, 2006-2009 г.г. (СПбГПУ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 32 работы, в том числе 30 статей и 2 методических пособия.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Содержит 125 страниц машинописного текста, 15 таблиц, 36 рисунков, списка использованной литературы из 181 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, определены основные задачи, решаемые в ходе исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ конструкций шпиндельных опор жидкостного трения, конструкций ШУ на ГСП тяжелых МРС, а также типов систем управления ГСП. Проанализированы основные тенденции в совершенствовании ШУ МРС в условиях перехода к автоматизированным системам металлообработки. Сравнительные испытания ШУ на различных типах подшипников показывают, что ГСП превосходят другие типы опор по быстроходности, нагрузочной способности, виброустойчивости и ряду других показателей. ГСП находят широкое применение как в иностранном, так и в отечественном станкостроении. Среди зарубежных научных центров и фирм, использующих ГСП, можно выделить следующие: Bryant, Turchan, Lockheed, NAGA, Timken, Wotan (США), Высшее техническое училище а Дармштадте, FAG, Fortuna, INA, Schiess Froriep (ФРГ), Центр исследований по станкостроению, CERMO, Renault, S2M (Франция), SKF (Швеция), RHP (Великобритания), NTN Toyo (Япония), Innocenti, Fiat (Италия), Sacem (Испания), VUOSO (Чехия), Научно-исследовательский центр прецизионных станков (КНР). В России разработкой и исследованием гидростатических опорных систем занимаются многие исследователи, среди которых можно выделить Абрамова В.Г.,

Айзенштока Г.И., Алексеева П.И., Белоусова А.К., Болотникова М.А., Бушуева В.В., Гордеева А.Ф., Захарова П.А., Налетова С.П., Потапова В.А., Прокопенко В.А., Решетова Д.Н., Соколова Ю.Н., Файнгауза В.М., Фигатнера А.М., Шимановича М.А., Яцкевича А.А. и др.

В последние десятилетия возросла актуальность разработок в области создания ШУ для высокоскоростного резания ввиду появления сверхтвердых инструментальных материалов. Однако для тяжелых МРС достижение такого уровня быстроходности является весьма сложной технической задачей, т.к. при этом необходимо также обеспечивать высокий уровень нагрузочной способности. В связи с развитием высокоавтоматизированных гибких производств и, как следствие, с возможностью использования гидростатических опор ШУ в качестве датчиков всевозможных систем контроля, диагностики и адаптивного управления возрастает важность такого требования как простота реализации ШУ. Стремление достичь в конструкции ШУ многих, зачастую исключающих друг друга качеств, обусловливает необходимость дальнейшего совершенствования ШУ.

Как показывают результаты исследований, динамические характеристики ГСП не всегда удовлетворяют заданным критериям, т.е. система автоматического регулирования (САР) ГСП может быть не устойчивой или находиться на границе устойчивости. Улучшение динамических свойств (т.е. снижение или устранение колебательности) САР ГСП во многих случаях становится необходимым. Широко известно из ТАУ, что значительное повышение динамических показателей может быть достигнуто путем вариаций соотношений величин коэффициентов и постоянных времени передаточных функций исследуемых САР. При этом также используются различные средства динамической коррекции (подключение гидравлической емкости C, сопротивления R, их различных комбинаций, а также вариаций других параметров САР). Известные методы синтеза САР ГСП имеют определенные ограничения в области применения (только геометрической емкости и подключения RC-цепей) и далеко не всегда дают нужный эффект.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать основные задачи исследования:

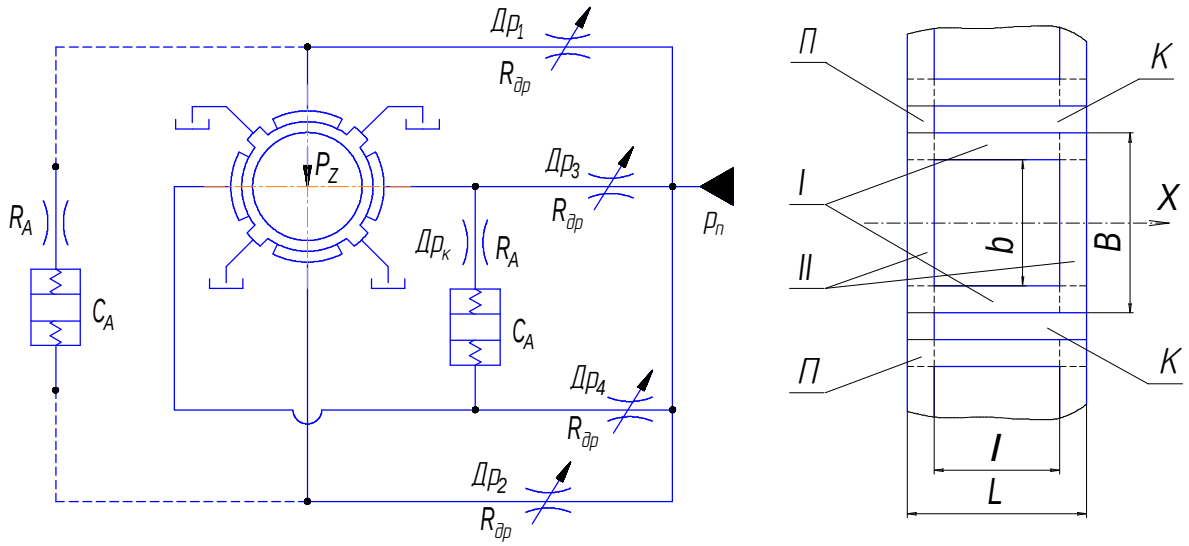
1. Разработка методики расчета и многопараметрического анализа динамических характеристик ШУ на ГСП с последующей оценкой качества управления САР ГСП при использовании программных средств.
2. Исследование возможностей различных методов (способов) коррекции для улучшения динамических качеств САР ГСП и разработка научно обоснованных рекомендаций по их применению.
3. Разработка рекомендаций по автоматизированному проектированию ШУ в условиях модульного построения МРС.

4. Разработка рекомендаций по внедрению расчетно-аналитических методик исследования ГСП.

5. Разработка рекомендаций по конструктивному исполнению ШУ и приводов главного движения.

<u>Во второй главе</u> излагается методика проведения исследований. Объектом исследований служат современные варианты ШУ невыдвижного (станка модели 22912Н7Ф4) и выдвижного исполнения (станка модели ЛР400ПМФ4М) на ГСП. Анализ существующих методов исследований станков позволил выбрать основные характеристики ШУ: податливость, мощность холостого хода, геометрическая точность вращения шпинделя и предельная глубина резания. Помимо этого, разработана методика многопараметрического анализа ШУ и определения его динамических характеристик посредством компьютерного моделирования (с помощью таких программных средств как Mathcad, SIAM, «МВТУ», а также программного обеспечения, разработанного за время исследований).

В соответствии с методиками ТАУ, в качестве объекта регулирования САР ГСП выбран ШУ. Входной величиной САР является нагрузка $R_h(t)$, выходной – радиальный зазор $h(t)$. Расчетная гидравлическая схема дроссельного ГСП показана на рис. 1.а.



а) б)

Рис. 1. Расчетная гидравлическая схема ГСП с дроссельной схемой управления (а) и развертка опоры ГСП на плоскость (б)

Математическая модель, описывающая поведение ШУ на ГСП, включает в себя уравнения равновесия шпинделя и расходов рабочей жидкости через опоры ГСП:

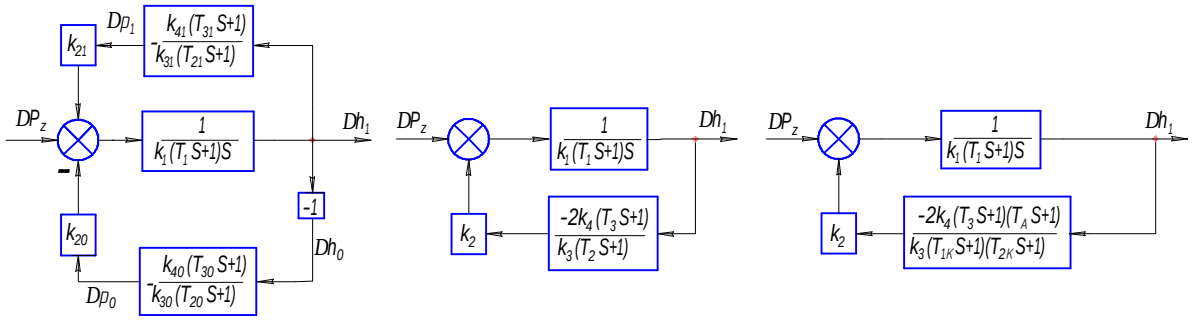
$$
\begin{cases}
M\ddot{h}_1 = R_h - \dfrac{p_0 - p_1}{2}(lB + bL) - \mu\dot{h}_1\left(\dfrac{1}{4h_0^3} + \dfrac{1}{4h_1^3}\right)\left((B-b)^3 l + (L-l)^3 b\right) \\
\dfrac{p_н - p_1}{R_{др1}} = \dfrac{p_1 h_1^3}{3\mu}\left(\dfrac{l}{B-b} + \dfrac{b}{L-l}\right) + \dfrac{V_{пр1}}{E_м}\dot{p}_1 + \dot{h}_1(Bl + bL - 2bl) \\
\dfrac{p_н - p_0}{R_{др2}} = \dfrac{p_0 h_0^3}{3\mu}\left(\dfrac{l}{B-b} + \dfrac{b}{L-l}\right) + \dfrac{V_{пр0}}{E_м}\dot{p}_0 + \dot{h}_0(Bl + bL - 2bl)
\end{cases}
\qquad (1)
$$

где M – приведенная масса ШУ; p_0 – давление в базовой ГСО; p_1 – давление в замыкающей ГСО; h_0 – зазор в базовой ГСО; h_1 – зазор в замыкающей ГСО; B, L, b, l – геометрические параметры ГСО (рис. 1.б); μ – динамическая вязкость жидкости; $R_{др1}$, $R_{др2}$ – гидравлическое сопротивление дросселей; $V_{пр1}$, $V_{пр2}$ – приведенные объемы карманов ГСО; $E_м$ – модуль объемной сжимаемости жидкости; $h_0 + h_1 = h_\Sigma$ – суммарный зазор в ГСП. Система дифференциальных уравнений (1) представляет собой полное математическое описание нелинейной модели ГСП, которое отражает их реальные динамические характеристики.

С целью упрощения анализа проводится линеаризация данной системы нелинейных уравнений разложением в ряд Тейлора. Если ввести условные обозначения и провести преобразования по Лапласу, то система (1), описывающая САР ГСП, может быть представлена в виде:

$$
\begin{cases}
k_1(T_1 S + 1)S\Delta h_0 = \Delta R_h + k_{21}\Delta p_1 - k_{20}\Delta p_0 \\
-k_{41}(T_{31}S + 1)\Delta h_0 = k_{31}(T_{21}S + 1)\Delta p_1 \\
-k_{40}(T_{30}S + 1)\Delta h_1 = k_{30}(T_{20}S + 1)\Delta p_0
\end{cases}
\qquad (2)
$$

где T_{ij} – постоянные времени; k_{ij} – коэффициенты САР ГСП.



а) б) в)

Рис. 2. Структурные схемы САР ГСП в общем случае (а), при концентричном положении шпинделя (б) и при подключении RC-цепи (в)

Полученная система записана в приращениях и является линейной относительно значений зазоров h и давления p в системе. Структурная схема, соответствующая системе уравнений (2), приведена на рис. 2.а. При

концентричном расположении оси шпинделя в ГСП структурная схема упрощается, как показано на рис. 2.б.

Передаточные функции разомкнутой САР ГСП, соответствующие структурным схемам на рис. 2.а и рис. 2.б, имеют вид:

а) для неконцентричного положения шпинделя

$$W_{\text{раз}}(S) = -k_0 \frac{T^2 S^2 + 2Tx S + 1}{S\left(T_1 S + 1\right)\left(T_{20} S + 1\right)\left(T_{21} S + 1\right)}; \tag{3}$$

б) для концентричного положения шпинделя

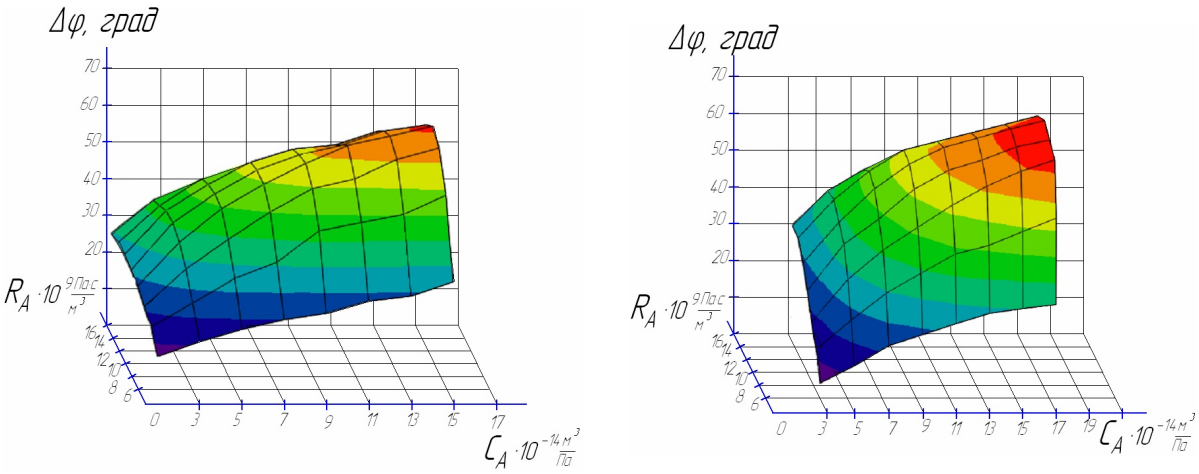
$$W_{\text{раз}}(S) = -k_0 \frac{T_3 S + 1}{S\left(T_1 S + 1\right)\left(T_2 S + 1\right)}. \tag{4}$$

Выполнение динамических расчетов проводится с использованием программных средств. Предварительную оценку динамического качества САР ГСП удобно выполнять с использованием программ SIAM или «МВТУ», которые позволяют получать как частотные характеристики, так и переходные процессы (для систем с заданной структурой). По графику переходного процесса можно оценить устойчивость системы, а также показатели качества переходного процесса – постоянная времени переходного процесса, перерегулирование, декремент колебаний, собственные частоты колебаний системы и др. Если такая предварительная оценка выявляет высокие показатели динамического качества исследуемой САР ГСП (апериодический переходный процесс, достаточный запас по фазе и т.п.), то дальнейший анализ САР не требуется. В противном случае (колебательный переходный процесс, низкий запас по фазе и т.д.), необходимо продолжить исследование динамического качества.

Для построения логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ) и фазочастотных (ЛФЧХ) характеристик используется предварительно полученная математическая модель САР, ее структурная схема и передаточная функция соответствующей разомкнутой (и в случае необходимости замкнутой) САР. Однако типовые неасимптотические ЛАЧХ, полученные с помощью SIAM и «МВТУ», не всегда удобны для анализа и в случае необходимости коррекции САР, на них не всегда явно видны сопрягающие частоты (особенно при большом числе постоянных времени, близких друг к другу по величине). В этом случае весьма удобным будет использование асимптотических ЛАЧХ, которые представляют собой кусочно-линейную функцию. Такие ЛАЧХ можно построить, например, с помощью Mathcad или Matlab.

Одним из эффективных способов повышения динамического качества является динамическая коррекция САР ГСП посредством подключения т.н. RC-цепи в гидравлическую схему параллельно опорам ГСП (RC-коррекция). Подключаемая RC-цепь (обозначена пунктиром на рис. 1.а) представляет собой контур из гидравлического сопротивления R и гидравлической емкости C. В качестве сопротивления может быть

использован дроссель, а в качестве емкости – стандартный металлический сильфон. Интерес представляют те значения R и C, для которых вычисленный запас по фазе $\Delta\varphi$ будет наибольшим. Для удобного и наглядного определения оптимальных значений параметров коррекции строится трехмерная зависимость запаса по фазе $\Delta\varphi = f(R,C)$ с последующим исследованием на наличие точек локального максимума (см. рис. 3). Данный анализ проделан для станков ЛР-400 и ЛР-520.



а) б)

Рис. 3. Трехмерные зависимости запаса по фазе $\Delta\varphi$ при подключении RC-цепи: для дроссельной схемы (а) и для схемы «насос-карман» (б).

В ряде случаев, когда вычисление $\Delta\varphi$ является затруднительным, можно исследовать значения логарифмического декремента колебаний λ в зависимости от параметров коррекции. Для этого строится трехмерная поверхность $\lambda = f(R,C)$.

В качестве перспективных способов анализа областей устойчивости ШУ на ГСП можно использовать построение корневого годографа. Линеаризация исходной системы дифференциальных уравнений, описывающей математическую модель ШУ, дает систему линейных дифференциальных уравнений, которая может быть сведена к одному линейному уравнению четвертого порядка. Соответствующее ему характеристическое уравнение представляет собой полином 4-й степени:

$$\Phi(l) = j_4 l^4 + j_3 l^3 + j_2 l^2 + j_1 l + j_0 = 0. \qquad (5)$$

Корни этого уравнения могут быть как вещественными, так и комплексными (в зависимости от параметров ГСП и вида нагружения). Корневым годографом (рис. 4) является множество точек комплексной плоскости, соответствующих корням характеристического уравнения (5).

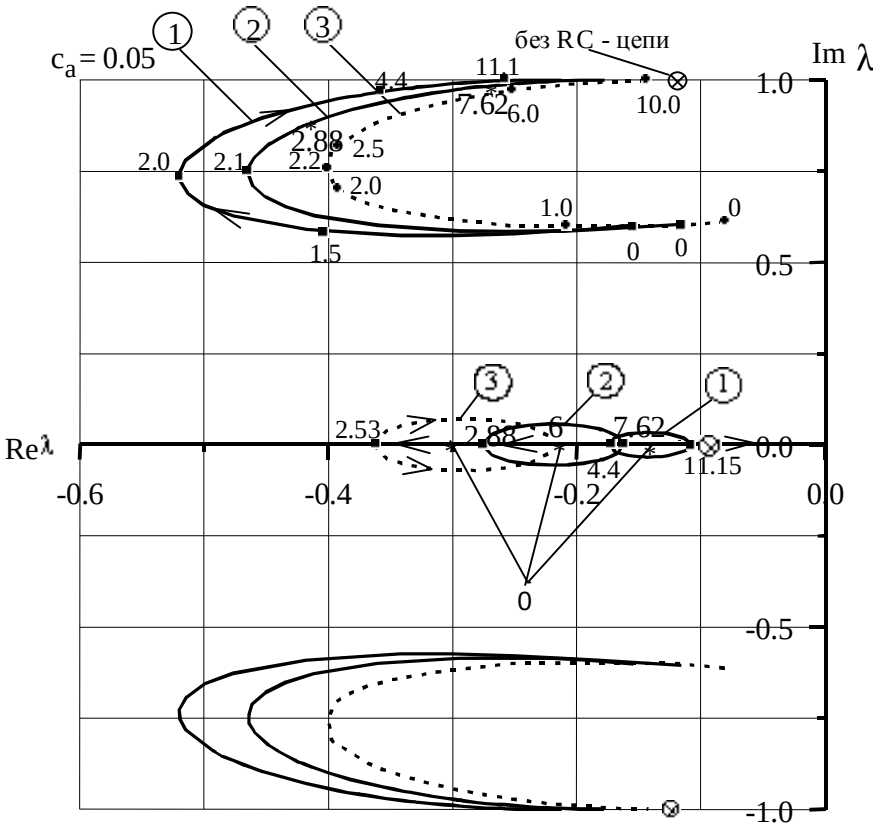


Рис. 4. Корневые годографы для ГСП при различных нагрузках

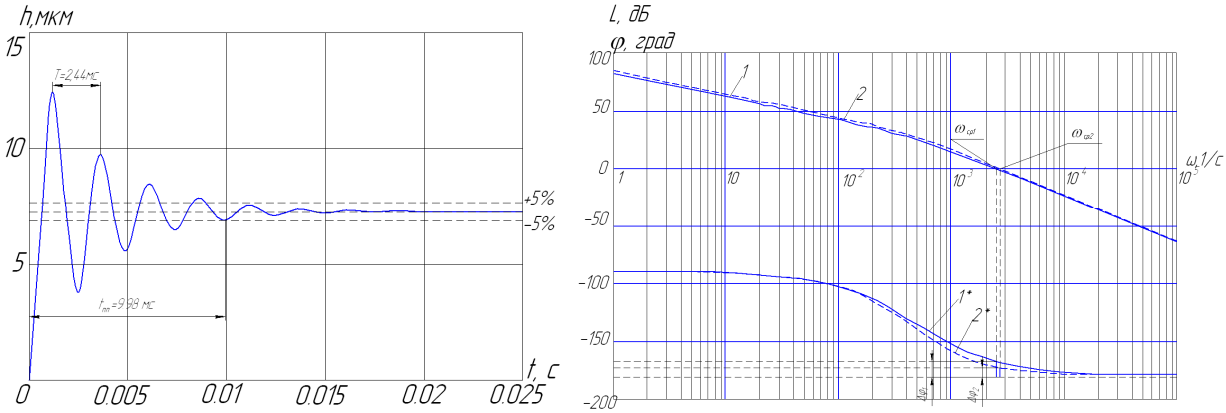
Чем дальше расположены корни от мнимой оси, тем устойчивее система. Чем ближе корни к вещественной оси, тем меньше частота возникающих колебаний. Вещественные корни соответствуют случаю апериодического движения. Т.о., анализируя расположение корней на комплексной плоскости, можно подобрать оптимальные значения параметров коррекции.

В третьей главе проводится приближенный расчет ГСП путем его представления в виде плоской ГСО для оценки возможности исключения громоздкого учета влияния криволинейности рабочих поверхностей опор. Результаты упрощенного расчета показывают, что отклонение характеристик плоской ГСО от ГСП составляет меньше 7%, что является допустимым для предварительной оценки динамического поведения ГСП.

Как уже сказано в гл. 2, для САР ГСП с низкими динамическими показателями необходима динамическая коррекция. Для оценки способов улучшения динамических показателей САР ГСП в диссертационной работе рассмотрены 6 возможных вариантов динамической коррекции:

1) параллельно подключаемой к опоре геометрической емкостью;
2) подключением параллельно карманам гидравлической емкости;
3) подключением емкости между противолежащими карманами;
4) подключением между карманами *RC*-цепей (см. на рис.1.а);
5) подключением параллельно карманам дросселей;
6) подключением дросселей между карманами.

Проведены корректирующие расчеты динамических характеристик САР ГСП для исходного варианта $D = 125$ мм (переходный процесс и асимптотическая ЛАЧХ для исходного варианта ГСП показаны на рис. 5).



а) б)

Рис. 5. Переходный процесс (а) и ЛАЧФХ для базового варианта ГСП

По полученным результатам исследований сделаны следующие выводы:

а) переходный процесс САР в случае применения 1-го, 2-го и 3-го способов становится менее колебательным (с большим коэффициентом демпфирования) при неизменной статической жесткости ГСП, кроме того, значение гидравлической емкости C в 3-ем способе в 2 раза меньше, чем во 2-ом, что является более предпочтительным;

б) 4-й способ является более эффективным, т.к. при его использовании может быть обеспечен апериодический (неколебательный) переходный процесс при сохранении статической жесткости ГСП;

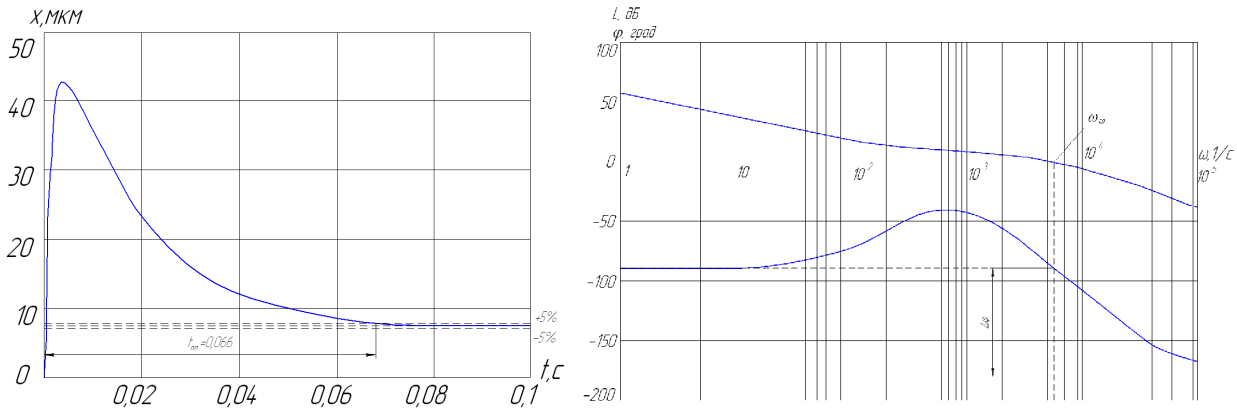
в) при определенных значениях сопротивления R 5-й способ позволяет устранить колебательность САР ГСП, но при этом статическая жесткость многократно уменьшается, что практически исключает целесообразность его применения;

г) при использовании 6-го и 7-го способов можно обеспечить меньшую колебательность САР ГСП при незначительном снижении ее статической жесткости (на 20 ÷ 30 %).

Также было выявлено, что вариация значения давления питания $p_н$ не дает ощутимого улучшения динамических свойств.

Таким образом, из всех исследованных способов коррекции подключение RC-цепей является наиболее предпочтительным по совокупности статических и динамических характеристик, а также возможности конструктивной реализации. Структурная схема САР ГСП при концентричном положении шпинделя после подключения RC-цепей представлена на рис. 2.в.

В ходе исследований предложена методика определения параметров коррекции, позволяющая одновременно с синтезом улучшенной ЛАЧХ сразу определять значения параметров корректирующей RC-цепи. Графики переходного процесса и ЛАФЧХ для САР ГСП, корректированной RC-цепью, приведены на рис. 6.



а) б)

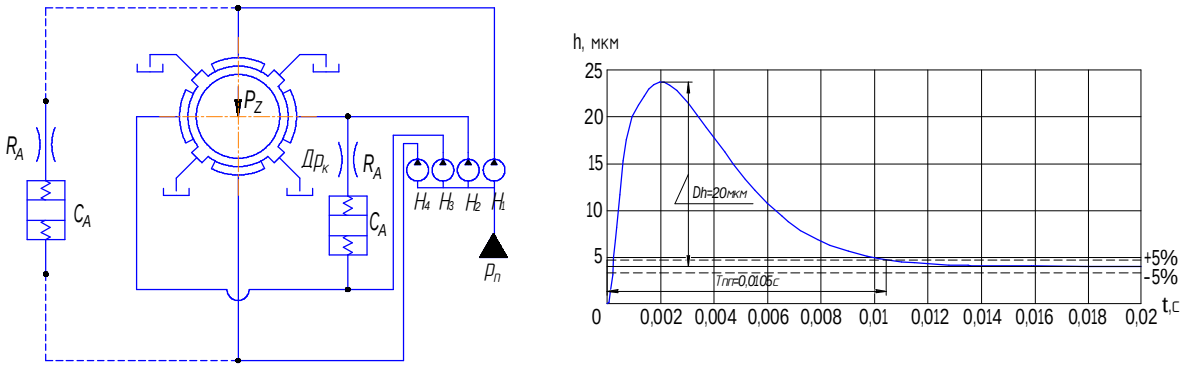
Рис. 6. Переходный процесс (а) и ЛАЧФХ для варианта ГСП с использованием корректирующей RC-цепи

<u>В четвертой главе</u> проводится исследование влияния различных вариантов схем управления на динамические характеристики ГСП.

Известно, что схема «насос-карман» (рис. 7,а) является наиболее выгодным способом управления питанием ГСП с точки зрения динамических свойств. Однако дальнейшее исследование возможностей различных вариантов схем управления и определение условий достижения максимальных демпфирующих свойств является необходимым.

Для проведения исследований выбраны следующие семь вариантов реализации схем управления: 1) в передней (ПО) и задней (ЗО) опорах ШУ используются по два дросселя по каждой координатной оси (канал управления); 2) в ПО и ЗО ШУ используются по два отдельных насоса одинаковой производительности; 3) в ПО и ЗО ШУ используются по одному дросселю и одному насосу на каждый канал управления; 4) в ПО и ЗО ШУ используются по два дросселя с радиальным смещением Δ оси шпинделя относительно оси ШУ за счет соответствующей настройки дросселей; 5) в ПО и ЗО ШУ используются по два отдельных насоса различной производительности, что также обеспечивает радиальное смещение оси шпинделя; 6) в ПО и ЗО ШУ используются по одному дросселю и одному насосу со смещением оси шпинделя в сторону дросселя; 7) в ПО и ЗО ШУ используются по одному дросселю и одному насосу со смещением оси шпинделя в сторону насоса. Необходимость рассмотрения двух последних вариантов обусловлена возможностью осуществления несимметричной схемы управления и неодинаковых

статических и динамических характеристик ГСП по каждой из координатных осей. Требуемая величина радиального смещения оси шпинделя обеспечивается для дроссельной схемы соответствующей настройкой дросселей с установкой рабочей точки по давлению, для схемы «насос-карман» – выбором производительности насосов, а в комбинированных вариантах – одновременным варьированием сопротивления дросселей и рабочего расхода насосов.



а) б)

Рис. 7. Расчетная гидравлическая схема (а) и переходный процесс (б) для ГСП со схемой управления «насос-карман»

Для каждого из исследуемых вариантов проведены соответствующие вариации математической модели с последующей линеаризацией и получением передаточной функции.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать заключение, что при прочих равных условиях схема управления «насос-карман» с радиальным смещением оси шпинделя относительно ШУ имеет наиболее высокие показатели динамического качества по сравнению с другими исследованными вариантами (величина запаса по фазе достигает значения $\Delta\varphi = 123°$). Переходный процесс для ГСП при использовании данной схемы управления приведен на рис. 7,б.

Существенное снижение колебательности и увеличение запаса устойчивости обеспечивается при смещении оси шпинделя для всех вариантов исполнения схем управления. Использование корректирующих RC-цепей во всех исследованных вариантах также позволяет повысить динамическое качество САР ГСП.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе использования программных средств (SIAM, «МВТУ», Mathcad и др.) разработана методика анализа и расчета ШУ ГСП, которая

может быть рекомендована для применения на этапах автоматизированного проектирования ШУ.

2. Разработана уточненная математическая модель ГСП, учитывающая кривизну сопряженных поверхностей и повышающая точность расчета динамических характеристик (на 20 % для некоторых типоразмеров ШУ).

3. Выполнена оценка динамического качества ШУ на ГСП некоторых серийных МРС, в ходе которой установлено, что во всех рассмотренных случаях запас по фазе $\Delta\varphi$ разомкнутой САР ГСП не является удовлетворительным (составляет приблизительно от 4° до 22°).

4. Выполнена оценка влияния вариации параметров ГСП на его динамическое качество. Для этого с помощью разработанной методики исследовано влияние изменений в возможном диапазоне рабочих параметров ГСП. Установлено, что значительное снижение качества происходит при увеличении рабочего зазора (при увеличении на 10 мкм запас по фазе снижается в 2 раза), уменьшении вязкости рабочей жидкости (при нагреве на 20°С – в 4 раза) и увеличении приведенной массы (при увеличении в 2 раза – снижение на 40 %), а увеличение приведенного объема и внешней нагрузки ведут к увеличению $\Delta\varphi$.

5. С помощью системы Mathcad разработана программа расчета асимптотических ЛАЧХ, которая позволяет выбирать параметры коррекции различными способами. Установлено, что из рассмотренных средств динамической коррекции наиболее эффективным является подключение RC-цепей.

6. Разработанная методика коррекции проверена на различных исполнениях ГСП с диаметрами от 65 до 200 мм. Установлено, что на рассмотренных серийных ГСП без дополнительных конструктивных изменений (например, оптимизация по межопорному расстоянию, оптимизация по размерам перемычек и т.п.) запас по фазе может быть повышен от 30° до 54°. Даны рекомендации по выбору компонентов RC-цепей.

7. Выполнена оценка влияния подключения корректирующих RC-цепей на динамическое качество САР ГСП при эксцентричном расположении оси шпинделя. Установлено, что введение RC-цепей приводит к существенному улучшению динамических характеристик ГСП и для неконцентричного случая (для рассмотренного варианта ГСП запас по фазе повышается с 34° до 100°, а переходный процесс при этом становится апериодическим).

8. Проанализировано влияние различных схем управления ГСП (а также их комбинаций) на динамическое качество САР ГСП. Показано, что в ряде случаев (например, схема управления «насос-карман» со смещением оси шпинделя) дают весьма высокие значения запаса по фазе (до 123°), что позволяет заметно повысить виброустойчивость системы ШУ на ГСП.

Публикации автора по теме диссертации:

1. Бундур М. С. Возможности схемы управления «насос-карман» в станочных гидростатических подшипниках / М. С. Бундур, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Теория механизмов и машин. – 2008. – № 2. – С. 91-99.
2. **Бундур М. С. Моделирование шпиндельных гидростатических подшипников и исследование возможностей повышения их динамического качества / М. С. Бундур, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 6(64). – С. 32-37.**
3. **Бундур М. С. Повышение виброустойчивости процесса резания путем улучшения динамических характеристик шпиндельных гидростатических подшипников / М. С. Бундур, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Металлообработка. – 2009. – № 1(49). – С. 10-15.**
4. **Бундур М. С. Расчетно-аналитические особенности проектирования гидростатических подшипников для станочного оборудования / М. С. Бундур, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 1(74). – С. 72-77.**
5. Бундур М. С. Сравнительные исследования динамического качества при выборе системы управления шпиндельных гидростатических подшипников / М. С. Бундур, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Теория механизмов и машин. – 2009. – № 2(14). – С. 19-27.
6. Лю Вэй. Анализ влияния изменения параметров работы гидростатических подшипников и их динамические характеристики / Лю Вэй, И. А. Чернов, В. А. Прокопенко // XXVII Неделя науки СПбГТУ : материалы межвуз. науч. конф. Ч. II. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1999. – С. 76.
7. Лю Вэй. Расчет статических и динамических характеристик гидростатических направляющих с помощью пакета MathCAD / Лю Вэй, И. А. Чернов, В. А. Прокопенко // XXVI Неделя науки СПбГТУ : материалы межвуз. науч. конф. Ч. II. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1998. – С. 210-211.
8. Металлорежущие станки. Проектирование гидростатических направляющих металлорежущих станков и станочных комплексов : метод. указ. / сост.: М. С. Бундур, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 28 с.
9. Петков П. П. Аналитические исследования возможностей повышения виброустойчивости шпиндельных узлов станков на гидростатических опорах / П. П. Петков, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Труды СПбГТУ. – № 504. – 2007. – С. 137-148.
10. Петков П. П. Вынужденные колебания в гидростатических подшипниках шпиндельных узлов / П. П. Петков, В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Конструктор-машиностроитель. – 2007. – № 1. – С. 26-27.
11. Проектирование и исследование гидростатических несущих систем с помощью пакета Mathcad : метод. указ. / В. С. Бурлуцкий [и др.]. – СПб. : СПбГТУ, 1997. – 22 с.
12. Прокопенко В. А. Динамика шпиндельных гидростатических подшипников при использовании схемы управления с регуляторами / В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Теория механизмов и машин. – 2007. – № 1. – С. 45-50.
13. Прокопенко В. А. Динамическое качество корректированных RC-цепью шпиндельных гидростатических подшипников в различных областях колебательных движений / В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Теория механизмов и машин. – 2005. – № 2. – С. 54–58.

14. Чернов И. А. Анализ динамических процессов в гидростатических опорах со схемой управления «насос-карман» // Новые промышленные технологии. – 2009. – № 6. – С. 60-62.

15. Чернов И. А. Аналитические и экспериментальные исследования систем управления гидростатических подшипников повышенной виброустойчивости для современного металлообрабатывающего оборудования // XIV Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов : аннотации работ победителей конкурса грантов Санкт-Петербурга 2009 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 98.

16. Чернов И. А. Динамическая коррекция гидростатических подшипников шпиндельных узлов металлорежущих станков // Наука и инновации в технических университетах : материалы Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 23-24.

17. Чернов И. А. Исследование влияния положения рабочей точки по давлению на характеристики гидростатического подшипника / В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Фундаментальные исследования в технических университетах : материалы XII Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 196-197.

18. Чернов И. А. Исследование влияния RC-коррекции на динамическое качество гидростатических подшипников модуля ЛР400ПМФ-4 / И. А. Чернов, В. А. Прокопенко // XXXV Неделя науки СПбГПУ : материалы межвуз. науч. конф. Ч.III. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 16-17.

19. Чернов И. А. Компьютерное моделирование динамических процессов в гидростатических подшипниках металлорежущих станков / И. А. Чернов, М. С. Бундур // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона : материалы конф. политехн. симп. Декабрь 2006 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 99-100.

20. Чернов И. А. Методические проблемы подготовки специалистов в области динамического моделирования и возможности использования при этом программного комплекса «МВТУ» / И. А. Чернов, В. А. Прокопенко // Проблемные вопросы подготовки бакалавров, инженеров и магистров на ММФ в условиях реформы высшего образования : материалы науч.-метод. конф. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 12-13.

21. Чернов И. А. Особенности нелинейной динамики гидростатических подшипников / И. А. Чернов, В. А. Прокопенко // XXVIII Неделя науки СПбГТУ : материалы межвуз. науч. конф. Ч. II. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2000. – С. 34.

22. Чернов И. А. Особенности разработки и аналитических исследований динамики гидростатических опор шпиндельных узлов // Наука и инновации в технических университетах : материалы Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 15-16.

23. Чернов И. А. Особенности расчетных методов оптимизации параметров коррекции гидростатических подшипников // XXXVII Неделя науки СПбГПУ : материалы Всерос. межвуз. науч. конф. студентов и аспирантов. Ч. IV. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 22-23.

24. Чернов И. А. Особенности реализации корректирующих RC-цепей в гидравлических схемах / В. А. Прокопенко, И. А. Чернов // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: современное состояние и перспективы развития : труды междунар. науч.-техн. конф. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 220-222.

25. Чернов И. А. Программные средства анализа динамических свойств шпиндельных гидростатических опор // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ : материалы межвуз. науч.-практ. конф. Ч. IV. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 23-24.

26. Чернов И. А. Программные средства динамического моделирования шпиндельных гидростатических опор // Наука и инновации в технических университетах : материалы Третьего Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 40-41.

27. Чернов И. А. Разработка и использование программных средств для исследования динамики гидростатических подшипников // XXXVI Неделя науки СПбГПУ : материалы Всерос. межвуз. науч. конф. студентов и аспирантов. Ч. III. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 20.

28. Чернов И. А. Разработка и исследование систем повышенного технического уровня для гидростатических подшипников металлорежущих станках // XIII Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов : аннотации науч. работ победителей конкурса грантов Санкт-Петербурга 2008 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук. – СПб. : Фонд «Гаудеамус», 2008. – С. 124.

29. Чернов И. А. Расчет динамических характеристик опорных узлов с помощью пакета MathCAD / И. А. Чернов, В. А. Прокопенко // XXVII Неделя науки СПбГТУ : материалы межвуз. науч. конф. Ч. II. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1999. – С. 75.

30. Чернов И. А. Регулирование шпиндельных гидростатических подшипников в современных металлорежущих станках // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона : материалы конф. политехн. симп. Май 2010 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 23-126.

31. Чернов И. А. Схемы управления гидростатических подшипников для современного металлообрабатывающего оборудования // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона : материалы конф. политехн. симп. Май 2009 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 151-154.

32. Dynamics of hydrostatic bearings of spindle with control system based on the regulators / Dudeski Lj [и др.]. // 7th International Conference Research and Development in Mechanical Industry. RaDMI 2007, Belgrade, Serbia, September 16-20, 2007. – Trstenik : High Technical Mechanical School of Trstenik, 2007. – P. 154-159.