

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
МЕХАТРОННЫХ МОТОР-ШПИНДЕЛЕЙ С БЕСКОНТАКТНЫМИ  
АДАПТИВНЫМИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ**

**Аспирант Брунгардт М.В.**

**Научные руководители: канд. техн. наук, доцент Пикалов Я.Ю.,  
д-р. техн. наук, профессор Шатохин С.Н.**

*Сибирский федеральный университет*

Непрерывно растущие требования к качеству и производительности обработки на металлорежущих станках при растачивании и фрезеровании обеспечиваются главным образом за счет повышения скорости резания. В ближайшей перспективе намечается выход на скорости резания до 4000 м/мин при обработке черных металлов и до 8000 м/мин при обработке цветных металлов, легких сплавов и композиционных материалов. Поэтому в мировом станкостроении имеется устойчивая тенденция повышения частоты вращения шпинделей фрезерных и расточных станков, в том числе станков с параллельной кинематикой (гексаподов и др.). Она решается за счет использования главных приводов, выполненных в виде мотор-шпинделей, которые состоят из шпинделя с короткозамкнутым ротором регулируемого асинхронного электродвигателя и корпуса, в котором размещены обмотки статора электродвигателя и шпиндельные опоры.

Применение сверхтвёрдых режущих инструментов (эльбор, гексанит, минералокерамика) позволяет после термообработки вместо шлифования использовать финишное точение закалённых стальных деталей (твёрдое точение). Для сверхтвёрдых режущих инструментов необходима не только высокая точность и частота вращения, но и высокая виброустойчивость шпинделя, которую могут обеспечить только бесконтактные гидростатические шпиндельные опоры. Регулируя давление нагнетания рабочей жидкости можно в широких пределах изменять нагрузочную способность, податливость и демпфирующую способность гидростатических шпиндельных опор, чтобы избежать опасных резонансных эффектов, например при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов. Точность вращения шпинделя с гидростатическими опорами в 10 и более раз превышает точность деталей самой опоры и сохраняется неограниченно долго. Кроме того, гидростатические шпиндельные опоры можно одновременно использовать как бесконтактные динамометрические преобразователи для синхронного мониторинга сил резания и виброскоростей шпинделя, а также для адаптивного управления процессом обработки. Однако гидростатические шпиндельные опоры не производятся централизованно и не являются покупными изделиями. Поэтому станкостроительные предприятия вынуждены самостоятельно решать весь комплекс проблем рационального проектирования, изготовления и эксплуатации таких опор.

Анализ зарубежных источников показывает, что для высокоскоростных мотор-шпинделей с гидростатическими опорами эффективно применение в качестве рабочей жидкости не минеральных масел, а воды или водной эмульсии, которая имеет большую теплоемкость и значительно меньшую динамическую вязкость с пологой температурной характеристикой. Применение таких гидростатических (аквастатических) опор позволяет существенно уменьшить суммарные потери мощности на нагнетание рабочей жидкости и вращение шпинделя, а также упростить конструкцию мотор-

шпинделя за счет использования интегрированной системы нагнетания рабочей жидкости для аквастатической опоры, термостабилизации корпуса мотор-шпинделя и охлаждения зоны резания.

Мотор-шпиндель фирмы *Fischer* (рисунок 1-а) имеет две гидростатические (аквастатические) опоры, применение которых дает увеличение рабочих нагрузок в два раза по сравнению с опорами качения. Мотор-шпиндель фирмы *IBAG Switzerland AG* (рисунок 1-б) при мощности  $N = 40$  кВт и наибольшей частоте вращения  $n_{\max} = 40\,000$  мин<sup>-1</sup> имеет одну замкнутую радиально-осевую гидростатическую (аквастатическую) опору в передней части шпинделя. Стабилизация радиального положения задней части шпинделя осуществляется за счёт гироскопического эффекта, возникающего при высокой частоте вращения.



а – Fischer

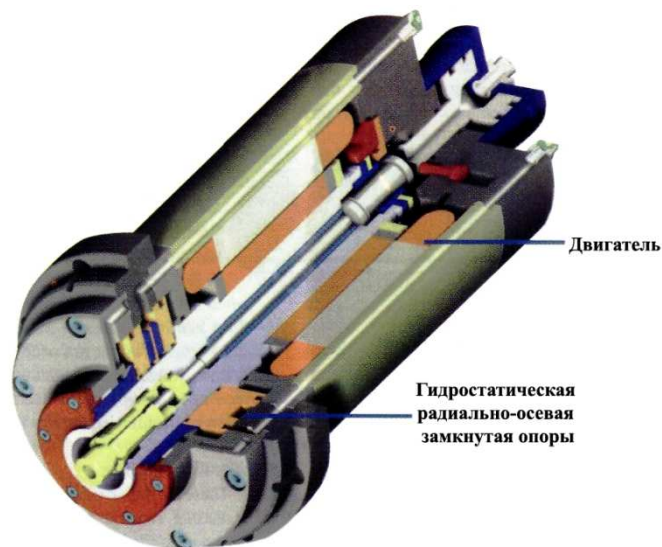


Рисунок 1 – Высокоскоростные мотор-шпиндели с гидростатическими (аквастатическими) опорами

В опубликованных рекламных материалах даны только технические характеристики разработанных зарубежными фирмами высокоскоростных мотор-шпинделей с

гидростатическими (аквастатическими) опорами, но не приводятся результаты их исследования, оптимальные параметры и методика проектирования. Неизвестны также отечественные и зарубежные разработки высокоскоростных мехатронных мотор-шпинделей, имеющих: адаптивные аквастатические опоры; интегрированную систему нагнетания рабочей жидкости; систему синхронной диагностики нагрузок и виброскоростей шпинделя.

Проведенные в СФУ исследования позволили разработать высокоскоростные адаптивные гидростатические шпиндельные опоры нового типа, которые: имеют компактную и технологичную конструкцию с встроенным плавающим кольцевым регулятором активного нагнетания рабочей жидкости; обеспечивают высокую несущую способность, малые потери мощности, адаптивную нагрузочную характеристику с большим диапазоном отрицательной податливости, позволяющим компенсировать влияние упругих деформаций технологической системы станка на точность обработки. Конструкция одной из таких опор представлена на рисунке 1.

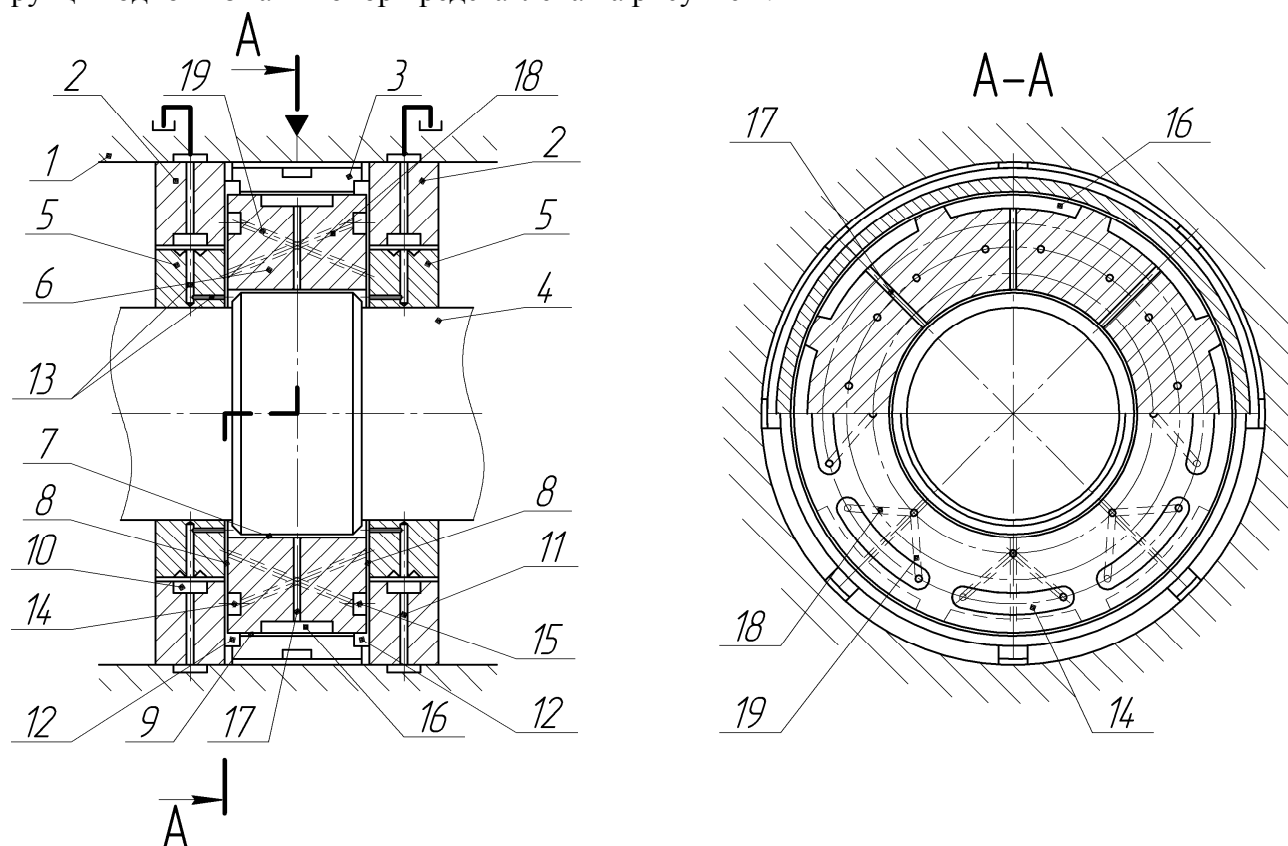


Рисунок 2 – Радиально-осевая адаптивная гидростатическая шпиндельная опора  
Основные части опоры: 1 – сборный корпус; 2 – боковые втулки; 3 – центральная втулка; 4 – вал; 5 – боковые кольца; 6 – подвижная втулка.

Радиально-осевая опора, представленная на рисунке 2, содержит сборный корпус 1, состоящий из пары боковых 2 и центральной 3 втулок, ступенчатый вал 4, с опорными кольцами 5 и подвижную втулку 6. Радиальный несущий слой 7 опоры образован сопряженными цилиндрическими поверхностями подвижной втулки 6 и вала 4, а осевой несущий слой 8 – между торцами подвижной втулки 6 и боковых колец 5. Сопряженные торцы подвижной 6 и боковых втулок 2 образуют управляющие щелевые дроссели для осевого несущего слоя. Прилегающие цилиндрические поверхности подвижной 6 и центральной 3 втулок образуют управляющий щелевой дроссель радиального несущего слоя 9. Для сбора и отвода смазки из опоры на внутренней цилиндриче-

ской поверхности боковых втулок 2 выполнены кольцевой 10 и дренажный каналы 11. Центральная втулка 3 содержит систему проточек для нагнетания смазки в кольцевые каналы 12. Опорные кольца 5 имеют каналы 13 для отвода смазки из радиального и осевого несущих слоев опоры. На внешней цилиндрической и на торцевых поверхностях подвижной втулки 6 выполнены карманы 14, 15, 16 соединенные с радиальным 7 и осевыми несущими слоями 8, дросселирующими каналами 17, 18, 19.

Опора работает следующим образом.

Смазка, нагнетаемая в кольцевой канал, через щелевые дросселирующие зазоры втекает в карманы 16, откуда, через дросселирующие каналы 17 поступает, в радиальный несущий слой 7 и, проходя через него, отводится на слив.

Радиальная нагрузка, действуя на вал 4, увеличивает (уменьшает) давление смазки в нагруженной (разгруженной) области несущего слоя 7. Через радиальные каналы 17 изменения давлений передаются в карманы 16 подвижной втулки 6. Возникшая разность давлений между нагруженными и разгруженными карманами 16 смещает подвижную втулку 6 навстречу нагрузке. При этом, в соответствующей области несущего слоя, сопротивление щелевого дросселирующего зазора 9 уменьшается (увеличивается), что вызывает возрастание (снижение) расхода смазки, поступающей через карманы 16 подвижной втулки 6 и радиальные каналы 17 в нагруженную (разгруженную) часть несущего слоя, а дросселирующий зазор 7 уменьшается (увеличивается), локально снижая (увеличивая) расход смазки. Это приводит к дополнительному увеличению разности давлений между нагруженной и разгруженной областями несущего слоя подшипника, смещающей вал 4 в направлении противоположном действию нагрузки, чем обеспечивается отрицательная податливость. При действии осевой нагрузки принцип работы опоры аналогичен радиальной.

В процессе дальнейших исследований и опытно-конструкторских разработок планируется:

1. Разработка и патентно-правовая защита эффективных технических решений для высокоскоростных мехатронных мотор-шпинделей нового типа, имеющих:
  - встроенный асинхронный электропривод с частотным регулированием скорости вращения шпинделя;
  - радиально-осевую гидростатическую (аквастатическую) опору передней и гироскопическую стабилизацию задней части шпинделя;
  - интегрированная система нагнетания рабочей жидкости (водная эмульсия) для гидростатической (аквастатической) опоры шпинделя, термостабилизации корпуса мотор-шпинделя и охлаждения зоны резания;
  - систему синхронной диагностики нагрузок и виброскоростей шпинделя.
2. Создание математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов и компьютерных программ для исследования и параметрической оптимизации функциональных систем высокоскоростного мехатронного мотор-шпинделя нового типа.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование статических и динамических характеристик высокоскоростных аквастатических шпиндельных опор, в том числе адаптивных, имеющих встроенный плавающий регулятор активного нагнетания рабочей жидкости.
4. Разработка прикладной методики оптимального проектирования высокоскоростных адаптивных аквастатических шпиндельных опор со встроенным плавающим регулятором активного нагнетания рабочей жидкости.
5. Разработка конструкторской документации, изготовление и испытание экспериментального образца высокоскоростного мехатронного мотор-шпинделя нового типа.

6. Проведение работ по коммерциализации полученных результатов и их использованию в учебно-научном процессе.