

УДК 621.6

Исследование электромагнитных опор для высокоскоростных шпиндельных узлов

Никитина Л.Г.

Описана конструкция электрошпинделя на электромагнитных подшипниках. Экспериментальные исследования показали, что электромагнитные подшипники обладают высоким скоростным фактором, достаточно высокой несущей способностью и жесткостью, не требуют больших затрат энергии и высокой точности обработки деталей. Однако вопросы их использования в шпиндельных узлах станков и обеспечения высокой эксплуатационной надежности требуют дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: электрошпиндель, электромагнитная опора.

Повышение быстроходности шпинделей при шлифовании вызывает необходимость создания опор со скоростным фактором $d \times n = (3 \dots 4) \times 10^6$ мм×об/мин (где d - диаметр, мм; n - частота вращения, об/мин) или с окружной скоростью на шейке вала ротора 150-200 м/с и более. Высоким скоростным фактором обладают воздушные и магнитные опоры.

Перспективным является применение электромагнитных опор (ЭМО) с системой авторегулирования [1]. Действие ЭМО основано на принципе электромагнитной стабилизации положения ферромагнитного тела установленного с зазором между диаметрально расположенными электромагнитами, каждый из которых притягивает тело к себе. Очевидно, если не регулировать ток в обмотках электромагнитов, то положение тела не будет устойчивым даже при равенстве притягивающих сил.

Ток регулируется электронной следящей системой, датчики перемещения которой контролируют отклонение тела от положения равновесия. Сигнал с датчиков усиливается, детектируется и подается на усилитель мощности, который питает ток обмотки электромагнитов. При уменьшении зазора между телом и электромагнитом индукция в зазоре уменьшается, и наоборот. Под действием результирующей силы тело возвращается в ис-

ходное положение, для обеспечения устойчивого равновесия тела в следящую систему дополнительно вводят сигнал, пропорциональный скорости смещения тела, а для увеличения статической жесткости опоры — сигнал, пропорциональный интегралу от величины перемещения. Для полной подвески вращающегося ротора необходимо иметь пять пар электромагнитов и пять каналов регулирования: четыре из них удерживают ротор в радиальных направлениях и один — в осевом направлении.

В Псковском филиале ЛПИ им. М. И. Калинина разработана и испытана модель высокоскоростного электрошпинделя с ЭМО (рис. 1) (выполненная на базе внутришлифовального электрошпинделя ЭШ-120/0,4) с встроенным асинхронным электродвигателем мощностью 0,4 кВт и номинальной частотой вращения 120000 об/мин. Шарикоподшипниковые опоры базового электрошпинделя заменены электромагнитными [2].

Система электромагнитной подвески ротора состоит из двух радиальных электромагнитных подшипников (ЭМП). Для упрощения конструкции в разработанной модели нет упорного подшипника, и ротор удерживается в осевом направлении благодаря эффекту электромагнитного центрирования. Основными частями ЭМП [2] являются механическая, воспринимающая нагрузки (расположе-

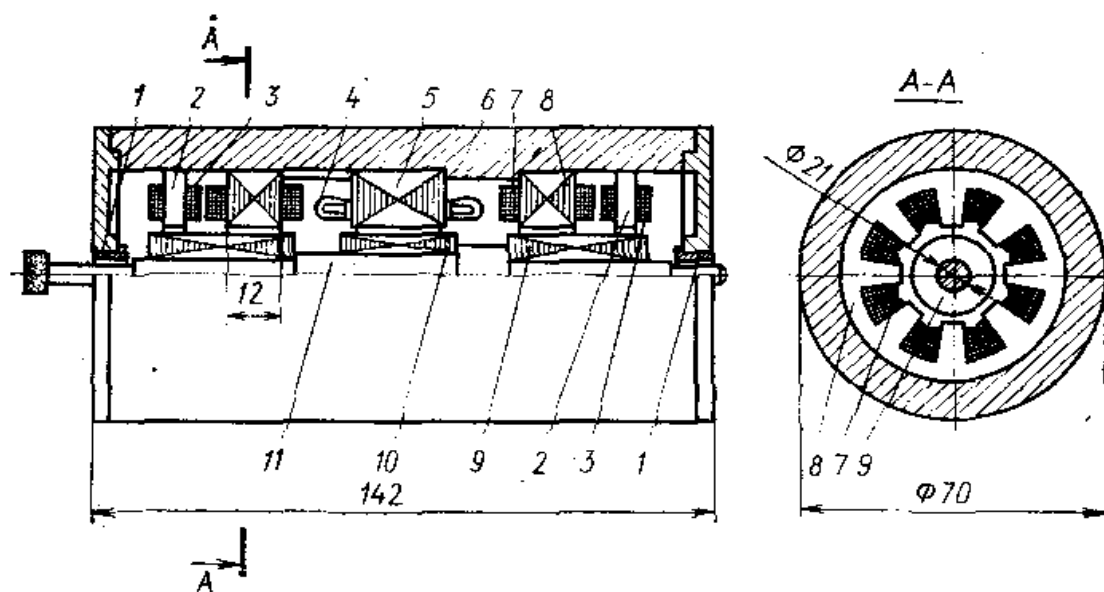


Рис.1. Конструкция модели электрошпинделя

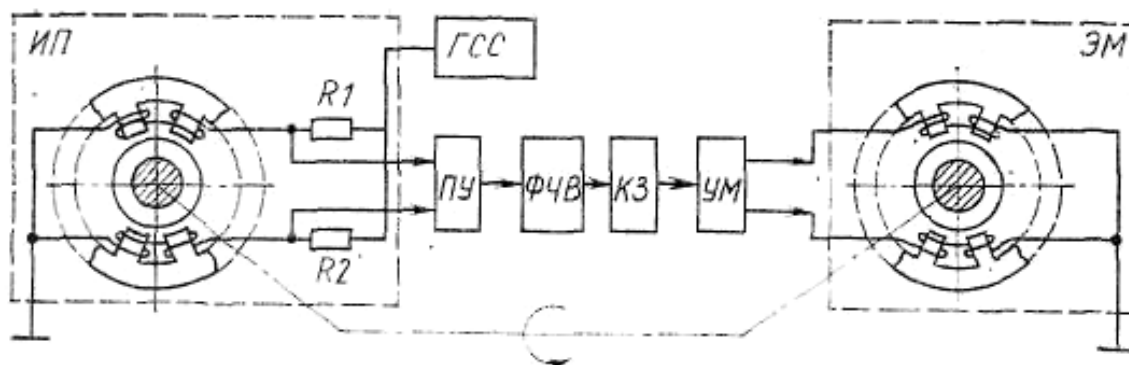


Рис.2. Блок-схема канала регулирования.



Рис.3. Амплитудно-частотная характеристика цапфы ротора (x – амплитуда колебаний цапфы относительно положения равновесия)

на непосредственно в корпусе шпинделя), и регулятор тока электромагнитов (находится в блоке управления).

Механическая часть ЭМП состоит из корпуса 6, статора 8, цапфы 9, насаженной на вал 11, индуктивного датчика 2 перемещений и аварийных подшипников 1. Статор набран из листов электротехнической стали Э44 толщи-

ной 0,35 мм, в которых выполнено восемь полюсов. В пазах статора уложены обмотки 7 электромагнитов. В обмотках из провода ПЭВ-2 - 032 мм содержится по 150 витков на полюс. Парно соединенные между собой обмотки и полюса образуют четыре электромагнита, которые удерживают цапфу в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Цапфа набрана из той же стали в форме колец. Индуктивный датчик перемещений цапфы представляет собой статор из пакета листов, отличающийся от статора электромагнитов только меньшей толщиной материала. Обмотки 3 датчика, выполненные из провода ПЭЛ 0.12 мм, содержат по 200 витков на полюс. Аварийные подшипники (выполненные в виде подшипников скольжения с бронзографитовыми вкладышами) удерживают ротор при работе в аварийном режиме, когда по какой-либо причине не функционируют несущие электромагниты, а также при полностью отключенном шпинделе.

Привод шпинделя осуществляется от асинхронного электродвигателя, включающего статор 5 с обмотками 4 и короткозамкнутый ротор 10.

Система стабилизации ротора в двух радиальных ЭМП содержит четыре канала регулирования тока в электромагнитах. Блок-схема отдельного канала представлена на рис. 2. Индуктивный преобразователь (ИП) имеет пару индуктивных датчиков, которые вместе с резисторами R1 и R2 образуют мост переменного тока, сбалансированный при центральном положении ротора. Чувствительность ИП 0,4 мВ/мкм. Опорное напряжение частотой 36 кГц подается на мост с генератора ГСС синусоидального сигнала.

Фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ) предназначен для демодуляции сигнала. При изменении фазы входного сигнала на 180° полярность сигнала на выходе ФЧВ становится противоположной. Усилитель УМ мощности с обратной связью по току имеет два выхода, подключенных к обмоткам диаметрально противоположных силовых электромагнитов ЭМП.

Стендовые испытания модели электрошпинделя показали следующее [3]:

1. ЭМП допускают сравнительно большие радиальные зазоры между цапфой и статором и малочувствительны к их изменению. Уве-

личение зазоров от номинального значения 0,24 мм до 0,52 мм после соответствующей настройки регулятора привело лишь к некоторому снижению несущей способности и жесткости ЭМП. Благодаря этому не требуется высокая точность обработки деталей;

2. Несущая способность радиального ЭМП составляет 25 Н на 1 см площади продольного диаметрального сечения цапфы. Несущую способность можно повысить до 50 Н/см², если в качестве ферромагнитного материала использовать кобальтовое железо;

3. Статическая жесткость ЭМП, составляющая в исследуемой модели (при зазоре 0,24 мм) 2,2 Н/мкм, сравнима с жесткостью подшипников качения и легко регулируется;

4. Потери на трение в ЭМП обусловлены потерями на вихревые токи и на перемагничивание в пакете листов цапфы. Для исследуемого ЭМП при $n = 120000$ об/мин эти потери составляют 10,5 Вт, что примерно на порядок меньше потерь на трение в подшипниках качения базового электрошпинделя. Цапфы при работе практически не нагреваются;

5. Электронная схема модели потребляет из сети активную мощность 15,3 Вт, что значительно меньше мощности, потребляемой на трение и образование масляного тумана в базовом электрошпинделе;

6. ЭМП позволяют работать при очень высоких окружных скоростях. Допускаемая окружная скорость в зазоре определяется механической прочностью электротехнической стали и равна 200 м/с, что соответствует скоростному фактору $d \times n = 4 \times 10^6$ мм $\times$ об/мин;

7. При использовании ЭМП не требуется тщательная балансировка ротора, как в случае применения подшипников качения. На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика цапфы ротора, имеющего эксцентриситет центра масс 3 мкм. Достигнув частоты 50000 об/мин, ротор начинает вращаться вокруг своей главной оси инерции, т.е. самоцентрируется. Система регулирования хоро-

шо демпфирует колебания ротора, что позволяет легко проходить критические частоты вращения.

Таким образом, по результатам экспериментального исследования можно сделать вывод о том, что электромагнитные подшипники обладают высоким скоростным фактором, достаточно высокой несущей способностью и жесткостью, не требуют больших затрат энергии и высокой точности обработки деталей. Однако вопросы их использования в шпиндельных узлах станков и обеспечения высокой эксплуатационной надежности требуют дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Литература

1. Журавлев Ю.Н. Экспериментальный электромагнитный подшипник. - В кн.: Материалы конференции «Наука на службе повышения качества и надежности». - Псков: НТО Машпром. 1979, с. 72-78.
2. Хаберман Х., Лиард Г. Активный магнитный подшипник. - Детали машин: Экспресс-информ. - М.: ВИНТИ, 1978, №12. с.1-7.
3. Бушуев В.В., Чернусь Г.В. Экспериментальное исследование электромагнитных опор для высокоскоростных роторов // «Станки и инструмент», 1993, №2. с.26-28.

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2011 г.

The electrospindle design on electromagnetic bearings is described. Experimental researches have shown that electromagnetic bearings possess the high high-speed factor, enough high bearing ability and rigidity, don't demand the big expenses of energy and split-hair accuracy of processing of details. However questions of their use in шпиндельных knots of machine tools and maintenance of high operational reliability demand further theoretical and experimental researches.

Keywords: electrospindle, electromagnetic support.

Никитина Любовь Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»