

УДК 531.383:621.313

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ
ЭЛЕМЕНТОВ МАКЕТА ГИРОСКОПА
С ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПОДВЕСОМ
ШАРОВОГО РОТОРА**

А.Н. Голиков, А.А. Кузьма, М.С. Плеханов

Томский политехнический университет
E-mail: nilis@tpu.ru

Голиков Алексей Никандрович, доцент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: nilis@tpu.ru

Область научных интересов: геофизическое приборостроение, метрологическое обеспечение геофизических приборов.

Кузьма Анастасия Альбертовна, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: nilis@tpu.ru

Область научных интересов: гироскопические приборы и устройства.

Плеханов Михаил Сергеевич, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: nilis@tpu.ru

Область научных интересов: гироскопические приборы и устройства.

Проанализированы возможности технической реализации чувствительного элемента на основе гироскопа с газодинамическим подвесом шарового ротора для информационно-измерительного комплекса. Приведена оценка некоторых параметров газовой опоры, предложен вариант конструкции макета прибора для дальнейших экспериментальных исследований и определения характеристик газодинамической опоры и чувствительности гироскопического датчика. Показаны экспериментальные разгонные характеристики электропривода ротора гироскопа.

Ключевые слова:

Шаровой гироскоп, газодинамический подвес, электропривод массивного ротора.

Цель исследований предполагает оценку возможности технической реализации чувствительного элемента на основе гироскопа с газодинамическим подвесом шарового ротора для информационно-измерительных комплексов навигационного сопровождения бурения.

Принцип действия газодинамической опоры в следующем. Между цапфой и подпятником, диаметры которых отличаются друг от друга в пределах 5...8 мкм,

при их относительном вращении, в клиновидный зазор вовлекается воздух. Образующееся в зоне малых зазоров повышенное давление обуславливает результирующую подъемную силу, уравнивающую массу ротора.

Основное достоинство газодинамических опор по сравнению с шарикоподшипниковыми заключается в их высокой надежности при эксплуатации в тяжелых условиях.

Газодинамический подвес способен выдерживать большие перегрузки (более 50g), обладает большей жесткостью, чем шарикоподшипники (например, шарикоподшипники 2076083 имеют радиальную жесткость $14 \cdot 10^3$ Н/мм, у газодинамического подшипника при соизмеримых габаритах жесткость достигает $20 \cdot 10^4$ Н/мм). Подвес устойчив к температурным (для газонаполненных сред до 250 °С и выше) и вибрационным воздействиям. Жесткость в этом случае характеризует частоту собственных колебаний, которые могут иметь значение порядка 100 Гц и выше [1].

Для таких опор практически неограничен ресурс работы. Он определяется только количеством пусков/остановов ротора.

Общий вид гироскопа приведен на рис. 1. Конструкция прибора в разобранном виде приведена на рис. 2.

Ротор – 1, представляющий собой стандартный стальной шар, помещен между двумя полусферическими чашами – 2. Шар имеет осевое отверстие, в полюсных частях которого встроены подвижные элементы – 3 датчика угла – 4, вмонтированного в осевое отверстие чаши.

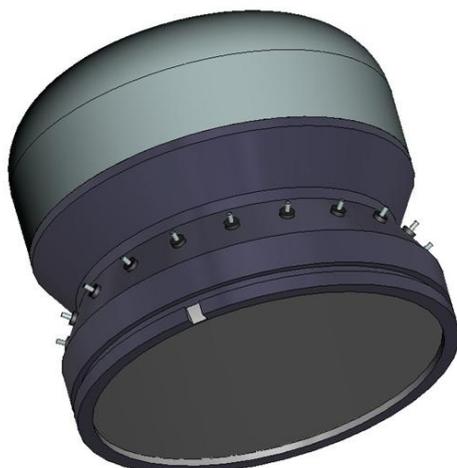


Рис. 1. Трехмерная модель конструкции гироскопа (общий вид)

Датчик углового положения ротора при заданных воздействиях должен обеспечивать чувствительность прибора к горизонтальной составляющей вектора угловой скорости вращения Земли. Диаметр сферических поверхностей чаш больше диаметра шара на 5...8 мкм, за счет чего обеспечивается зазор, необходимый для работы подвеса в режиме газовой смазки.

Ротор приводится во вращение электромагнитным полем статора – 5 асинхронного электропривода. При вращении ротора газ вовлекается в клиновидный зазор между чашами и ротором, создавая в зазоре избыточное давление, вследствие чего ротор «всплывает».

При его вращении с номинальной скоростью постоянно обеспечивается режим газовой смазки.

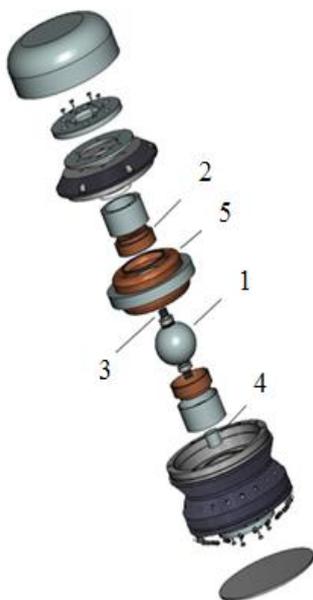


Рис. 2. Трехмерная модель конструкции гироскопа в разобранном виде

Основными параметрами газодинамических опор являются: начальный радиальный зазор, несущая способность (давление в рабочем зазоре), минимальная и максимальная скорости ротора, момент вязкого трения, момент сухого трения.

Момент сухого трения оказывает существенное влияние на работу опоры именно в момент запуска гироскопа, поскольку в нерабочем состоянии присутствует контакт между ротором и чашами. Для уменьшения износа поверхностей газодинамической опоры применяются определенные материалы, которые исключают истирание деталей при пусках и остановках (на-

более стойкими являются: окись алюминия, карбид вольфрама, окись бериллия, карбид бора, нитрид кремния) и форсированный запуск [1].

Параметры опоры в той или иной степени взаимосвязаны следующими соотношениями [2].

Несущая способность газодинамической опоры:

$$P = p_0 \cdot S \cdot \zeta, \text{ МПа,}$$

где p_0 – давление окружающей среды, МПа; S – площадь подвеса, м^2 ; $\zeta = f(\lambda, H, \varepsilon)$ – коэффициент нагрузки, зависящий от геометрических соотношений опоры; λ – удлинение подвеса (аппроксимация сферы цилиндром); ε – относительный эксцентриситет;

$H = \frac{6 \cdot \mu \cdot r^2 \cdot \omega}{p_0 \cdot c^2}$ – безразмерный параметр в уравнении для распределения давлений или число

сжимаемости: где μ – коэффициент вязкого трения газовой среды, Н/м^2 ; ω – угловая скорость ротора, рад/с , c – начальный радиальный зазор, мм ; r – радиус шарового ротора, мм .

Момент вязкого трения определяется соотношением [3]:

$$M_{\text{ВТ}} = \frac{8\pi \cdot \mu \cdot r^4 \cdot \omega}{3 \cdot c}, \text{ Н}\cdot\text{мм.}$$

При расчете подвеса в стационарном режиме за основное положение принимается условие равновесия, при котором подвес должен выдержать нагрузку, величина и направление которой заданы. Из графика зависимости безразмерного коэффициента нагрузки (ζ), равного 0,02, от числа сжимаемости (H) при различных значениях относительного эксцентриситета (ε) и ($\lambda=1$) определяются соотношения (ε) и (H), обеспечивающие требуемую величину коэффициента нагрузки (ζ) [2].

Из выражения числа сжимаемости (H) и значений относительного эксцентриситета (ε) строим семейство зависимостей угловой скорости ротора (ω) от относительного эксцентриситета (ε), которые представлены на рис. 3.

Полученные зависимости дают возможность оценить минимальную скорость ротора при различных значениях относительного эксцентриситета и начального радиального зазора, при которых в опоре при заданной нагрузке обеспечивается режим газовой смазки. Так, исходя из построенного графика, при диаметре ротора 28,529 мм, при начальном радиальном зазоре $c = 4$ мкм и относительном эксцентриситете $\varepsilon = 0,1$, отрыв шара будет происходить при скорости не менее 200 об/мин.

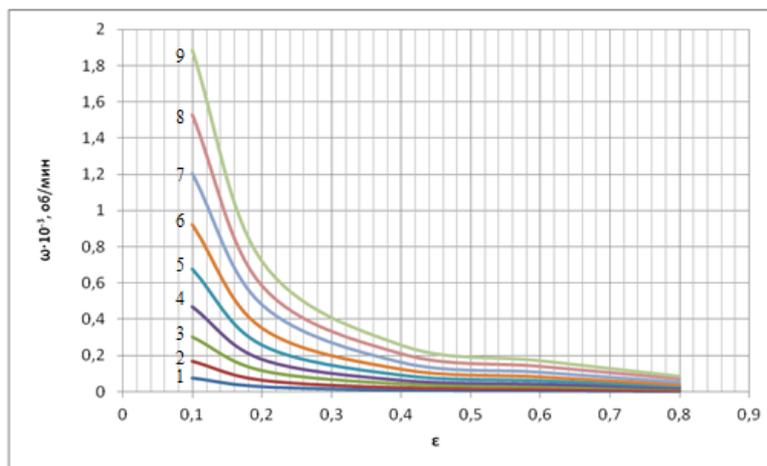


Рис. 3. Зависимость $\omega_1 = f(\varepsilon)$ при c равном: 1) 4; 2) 6; 3) 8; 4) 10; 5) 12; 6) 14; 7) 16; 8) 18; 9) 20 мкм

Для определения характеристик электропривода массивного ротора была разработана экспериментальная установка, общий вид которой представлен на рис. 4.

Объекты исследования – статор и набор сменных массивных роторов:

- Шаровой ротор из стали ШХ15 с твердостью 60-62 HRC.
- Цилиндрический ротор, выполненный из стали 45 без термообработки.

Значения осевых моментов инерции роторов с переходными оправками одинаковые.

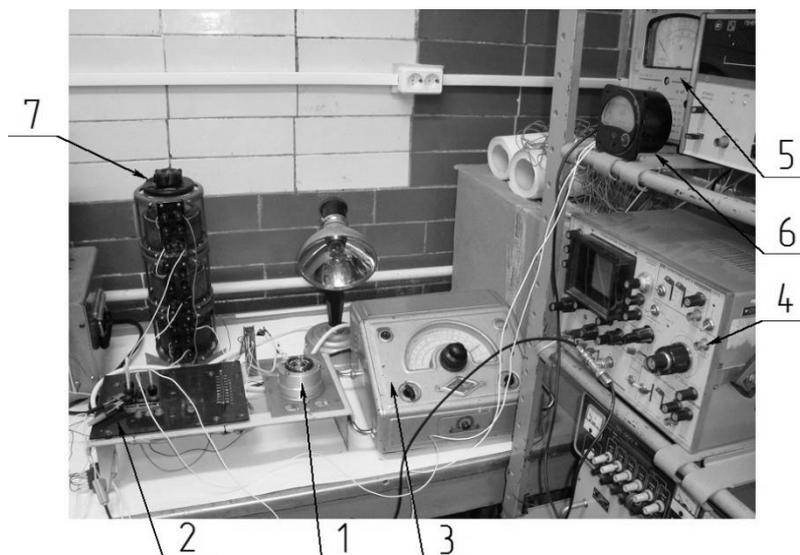


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки: 1 – привод; 2 – пульт управления и коммутации; 3 – строботахометр; 4–6 – контрольно-измерительные приборы; 7 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР)

Основная задача эксперимента – отработка методики разгона роторов.

Статор. Магнитопровод статора шихтованный, из электротехнической стали с обмоткой, выполненной по схеме трехфазной двухполюсной асинхронной электрической машины. Его основные технические характеристики для массивного шарового ротора из стали ШХ15 приведены в таблице.

Таблица. Технические характеристики статора

| Параметр | Значение |
|------------------------------------|-------------|
| Напряжение питания, В | от 40 до 90 |
| Частота питающего напряжения, Гц | 500 |
| Пусковой ток при 40 В (в фазе), мА | 200 |
| Номинальный ток (в фазе), мА | 150 |
| Полная пусковая мощность, ВА | 24 |
| Нагрев обмоток, не более, °С | 55 |

Для определения характеристик разгона привода применялся двигатель-генератор ДГ-1ТА, на выходном валу которого закреплялся исследуемый ротор. Тахогенератор устанавливался в корпус со статором привода так, чтобы ротор находился в его эффективной зоне. Сигнал с генераторной обмотки пропорционален угловой скорости ротора при её подключении к средствам измерений с высоким входным сопротивлением, в качестве которых применялись цифровой милливольтметр или осциллограф с входными сопротивлениями 4,3 и 1 МОм соответственно. Градуировка показаний милливольтметра и осциллографа производилась при помощи строботахометра. Для измерения пусковых и номинальных токов статора применялся миллиамперметр. Для синхронизации показаний средств измерений напротив их шкал устанавливалась цифровая видеокамера. Включение привода производилось в двух режимах: при номинальном напряжении питания и в форсированном – кратковременном включении обмоток статора на 2–3 с к напряжению 90 В.

На рис. 5 приведены характеристики форсированного разгона цилиндрического и шарового роторов.

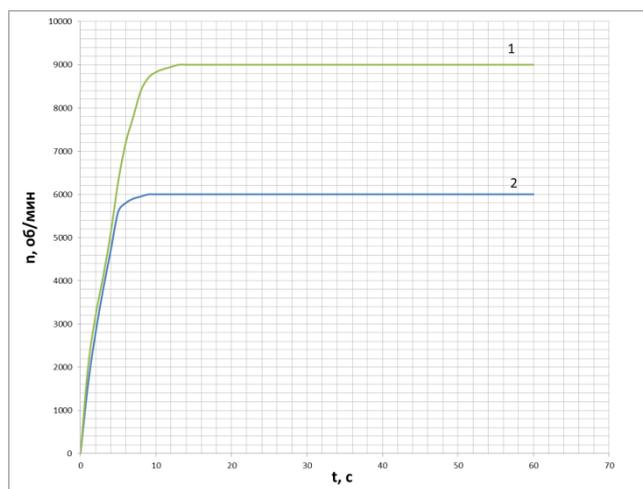


Рис. 5. Характеристики разгона роторов при форсированном запуске: 1 – Цилиндрический ротор; 2 – Шаровой ротор

Исследования показывают, что наилучшие характеристики разгона обеспечиваются в форсированном режиме при напряжениях с частотой питающей сети 500 Гц. В этом режиме роторы набирают номинальные обороты за 10 с. При этом значение скорости вращения 250...300 об/мин достигается за 0,3 с, что позволяет надеяться на возможность выполнения (рис. 3) расчетных условий газовой смазки в опоре при реализации макета гироскопа.

На рис. 6 приведены детали и сборки модели гироскопа, подготовленные для исследований опоры: шаровой ротор из стали ШХ-15, полусферические чаши из сплава БрОФ-1, детали корпуса макета, статор электропривода, двухкоординатный датчик угла.



Рис. 6. Элементы макета гироскопа: 1 – статор; 2 – полусферическая чаша; 3 – датчик угла; 4 – шаровой ротор; 5 – сборный корпус

Для обеспечения требуемого рабочего зазора в газодинамической опоре и минимизации моментов вязкого и сухого трения в ее рабочих режимах к элементам опоры – шаровому ротору и полусферическим чашам – предъявляются высокие требования к качеству их исполнения. Так, предельные отклонения от номинальных значений диаметров и геометрии формы сферических поверхностей не должны превышать от десятых долей до 1...2 мкм. При этом чистота обработки сферических поверхностей должна соответствовать 0,04 мкм по 4–6 качеству.

При контроле геометрических размеров элементов газодинамических опор используют как контактные, так и оптические средства измерений с предельной погрешностью измерений, не превышающей 0,5 мкм [4].

Для контроля элементов опор макета применялись стандартные контактные средства измерений в зависимости от этапа изготовления элементов опоры: на операциях предваритель-

ной и получистой обработки – микрометры со стрелочными индикаторами с ценой деления 10 мкм; при чистовых операциях – микрометры с ценой деления 1...2 мкм.

Например, для предварительной селекции шаров и чаш по номинальным размерам измерения проводились на координатно-измерительной машине EOS Coord 3, общий вид которой представлен на рис. 7.

После чистовых операций для оценки геометрии и отклонений сферических поверхностей используются преимущественно оптические интерферометры [4].

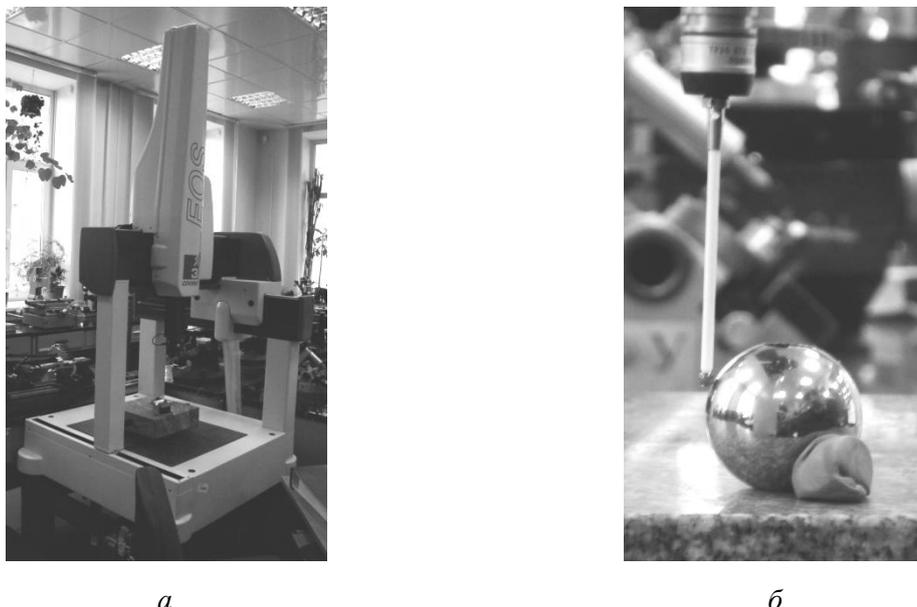


Рис. 7. Координатно-измерительная машина EOS Coord 3: а) общий вид; б) процесс измерения диаметра шарика

Для этих же измерений могут так же использоваться высокоточные координатно-измерительные машины, лазерные 3D-сканеры с высокой разрешающей способностью [5].

В заключение можно отметить следующее, ведется работа по решению принципиальных конструкторско-технологических и других задач по реализации макета гироскопа с газодинамическим подвесом шарового ротора диаметром 28,529 мм. Натурное моделирование позволит отработать математическую модель подвеса для оптимизации характеристик элементов опоры, конструкцию электропривода и элементов управления угловым положением (отклонений) оси вращения шарового ротора, минимизировать массогабаритные характеристики прибора в целом с целью реализации эффективного и надежного гироскопического датчика для скважинных систем ориентации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурин Л.Б., Нестеренко Т.Г., Плотников И.А. Основы конструирования механизмов приборных систем. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 344 с.
2. Подшипники с газовой смазкой / под ред. Н.С. Грессема, Дж. Коуэлла. – М.: Мир, 1966. – 425 с.
3. Гироскопические системы: Элементы гироскопических приборов / под ред. Д.С. Пельпора. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
4. Тимофеев В.А., Леонов Г.М. Обработка внутренних и наружных сферических поверхностей в точном приборостроении. – М.: Высшая школа, 1973. – 80 с.
5. Пекарш А.И., Феоктистов С.И., Колыхалов Д.Г., Шторт В.И. Координатно-измерительные машины и комплексы // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – № 3. – С. 36–48.

Поступила 02.04.2013 г.