

АДАПТИВНАЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКАЯ ШПИНДЕЛЬНАЯ ОПОРА ПОВЫШЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Брунгардт М. В.

Научный руководитель — доцент Пикалов Я.Ю.

Сибирский федеральный университет

Известно, что с ростом требований к производительности и точности обработки на металлорежущих станках снижается возможность эффективного использования в шпиндельных опорах подшипников качения.

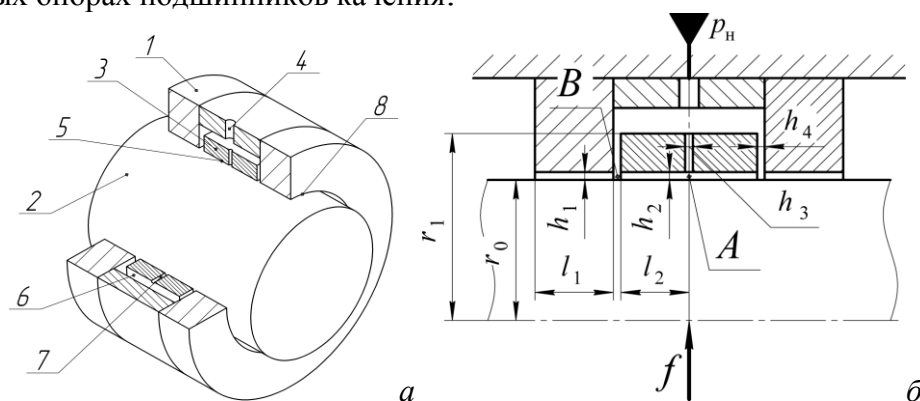


Рис. 1. Конструкция (а) и расчетная схема (б) радиальной адаптивной опоры нового типа

В Сибирском федеральном университете (СФУ) разработаны, исследованы и защищены патентами конструкции радиальных и радиально-осевых шпиндельных опор с плавающими регуляторами нагнетания смазки адаптивные гидростатические шпиндельные опоры.

На рисунке 1 приведены конструктивный вариант *а* радиальной опоры и ее расчетная схема *б*. Рассматриваемый гидростатический подшипник рисунок 1, *а* в отличие от подшипника (патент РФ №2298117, кл. F16C32/06, 17/10, опубл. 2007г.) имеет полость 6 постоянного давления, образованную втулкой 3 и корпусом 1.

Для упрощенного расчета нагрузочных характеристик разработанных вариантов радиальных адаптивных гидростатических опор были составлены математические модели таблица 1 в цилиндрической системе координат φ, r, z (ось z является осью опоры).

1. Условие силового равновесия шпинделя определяли из интегральной формы записи сил и реакций смазочного слоя дросселирующей щели h_2 , которое было преобразовано к численному виду с помощью метода Симпсона.

2. Условие силового равновесия регулятора определял аналогично условию для шпинделя.

3. Условия баланса локальных по φ расходов смазки является частным случаем закона неразрывного потока смазки условия баланса локальных расходов в дифференциальной форме составляется для каждой междроссельной щели А и В рисунок 1б.

4. Значения дросселирующих щелей является функция распределения зазора по координате φ .

Табл. 1. Математическая модель для адаптивной опоры

| № п.п. | Уравнение | Физический смысл |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1 | $F = \frac{2 \cdot \pi \cdot L_1}{3 \cdot n} \cdot \sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot P_B(\varphi_i) \cdot \cos \varphi_i$ $\lambda_0, \lambda_n = 1, \quad \lambda_i = 4, \quad \lambda_{2i} = 2$ | Условие силового равновесия шпинделя |
| 2 | $\sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot (P_B(\varphi_i) + P_A(\varphi_i)) \cdot \cos \varphi_i = 0$ $\lambda_0, \lambda_n = 1, \quad \lambda_i = 4, \quad \lambda_{2i} = 2$ | Условие силового равновесия регулятора |
| 3 | $A_1 = \frac{H_3^3 \cdot L_2}{2 \cdot H_2^3 \cdot \ln R_1 + H_3^3 \cdot L_2}$ $A_2 = \frac{2 \cdot H_2^3 \cdot \ln R_1}{2 \cdot H_2^3 \cdot \ln R_1 + H_3^3 \cdot L_2}$ $P_B = \frac{L_1 \cdot (H_4^3 \cdot L_2 + H_2^3 \cdot A_1 \cdot \ln R_1)}{L_1 \cdot L_2 \cdot H_4^3 + \ln R_1 \cdot (L_2 \cdot H_1^3 + L_1 \cdot H_2^3 \cdot (1 - A_2))}$ $P_A = A_1 + A_2 \cdot P_B$ | Условия баланса локальных по φ расходов смазки |
| 4 | $H_1 = 1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi, \quad H_2 = H_{20} - (\varepsilon - \varepsilon_p) \cdot \cos \varphi, \quad H_3, H_4 = \text{const}$ | Значения дросселирующих щелей |

Чтобы оценить предельно возможные значения характеристик опоры и тем самым оценить ее эксплуатационный потенциал, проведем оптимизацию по статическим характеристикам, сочетанием оптимальных параметров при различных комбинациях значимых критериев, методом простого перебора:

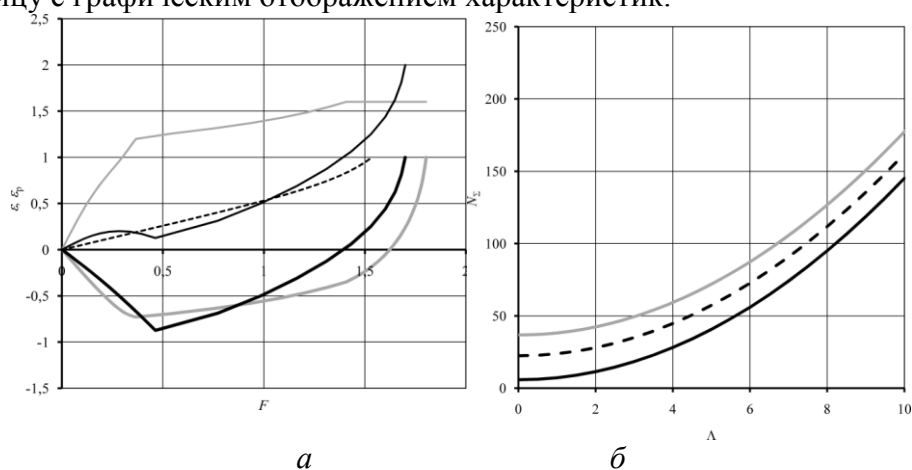
- 1) по нагрузочным характеристикам:
 - а) коэффициент активности - f_{k_a} ;
 - б) активный диапазон нагрузок - $F_{ак}$;
 - в) адаптивный диапазон нагрузок - $F_{ад}$;
 - г) предельная нагрузка - $F_{пр}$;
 - д) отрицательный эксцентриситет - $\varepsilon_{ак}$.
- 2) по энергетическим характеристикам:
 - а) фрикционные потери мощности - $N_{тр}$;
 - б) насосные потери мощности - $N_{н}$.

При этом вид целевой функции будет выглядеть следующим образом:

$$X = \left(\frac{\left(f_{k_a}^{\gamma_{k_a}} \cdot F_{ак}^{\gamma_{ак}} \cdot F_{ад}^{\gamma_{ад}} \cdot F_{пр}^{\gamma_{пр}} \cdot (-\varepsilon_{ак})^{\gamma_{\varepsilon_{ак}}} \right)^{\frac{\gamma_F}{\gamma_{k_a} + \gamma_{ак} + \gamma_{ад} + \gamma_{пр} + \gamma_{\varepsilon_{ак}}}}}{\left(N_{тр}^{\gamma_{N_{тр}}} \cdot N_{н}^{\gamma_{N_{н}}} \right)^{\frac{\gamma_N}{\gamma_{N_{тр}} + \gamma_{N_{н}}}}} \right)^{\frac{1}{\gamma_F - \gamma_N}},$$

где γ_i – степень важности i критерия.

Для расчета характеристик и проведения оптимизации был разработан специальный алгоритм и составлена программа. На первом этапе, диапазон значений относительных эксцентриситетов регулятора разбивается с равным шагом на определенное количество точек и для каждой точки с помощью метода плавающей секущей определяются значения эксцентриситета ε шпинделя. На втором этапе для каждой пары значений эксцентриситетов находят значения нагрузки. На третьем этапе рассчитываются энергетические характеристики опоры. Последним этапом является вывод полученных результатов в таблицу с графическим отображением характеристик.



- характеристики проектируемой опоры;
- эксцентриситет ε_p регулятора проектируемой опоры;
- характеристики базовой опоры;
- эксцентриситет ε_p регулятора базовой опоры;
- - характеристики пассивной опоры;

Рис. 2. Нагрузочные (а) и энергетические (б) характеристики различных конструкций адаптивных опор

Анализируя полученные результаты, можно заключить следующие:

- учет максимально возможного числа оптимизируемых критериев, а также ввод коэффициентов значимости каждого из них, дает возможность полностью раскрыть эксплуатационный потенциал опоры и обеспечить уникальное сочетание характеристик наилучшим образом подходящее для использования в каждом конкретном случае;
 - исследуемая конструкция всего на 10% уступает предыдущему поколению опор;
 - данная опора дает возможность обеспечить предельный отрицательный эксцентриситет шпинделя до 0,67, а также на порядок снизить суммарные потери мощности.
- Вывод. Сравнивая исследуемую опору с предыдущей конструкцией (патент РФ №2298117, кл. F16C32/06, 17/10, опубл. 2007г.), можно увидеть, что новая обладает практически такими же нагрузочными характеристиками, при этом, немного превосходит базовую опору по энергетическим; она является более технологичной, так как в ней значительно меньше дросселирующих щелей, точное изготовление которых вызывает определенные технологические трудности, что дает основание для проведения дальнейших исследований.