

УДК 621.9: 621.89

Characteristics of Radial Gas-Static Bearing of Step Type

Vladimir A. Kodnyanko

Siberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 22.01.2015, received in revised form 20.02.2015, accepted 14.03.2015

The design of step gas-static bearing is considered. In comparison with conventional throttle gas-static bearings the device is characterized by simplicity of design and manufacturability. Bearing is always stable. Decrease of compliance of the carrier gap is accompanied by increase of speed of the bearing. Dependencies of degree of stability in a number of parameters have a global maximum, what allows design optimal constructions based on dynamic calculations.

Keywords: gas-static bearing of step type, step gas-static bearing.

Характеристики радиального газостатического подшипника ступенчатого типа

В.А. Коднянко

Сибирский федеральный университет

Россия, 660044, Красноярск, пр. Свободный, 79

Рассмотрена конструкция радиального газостатического подшипника ступенчатого типа. В сравнении с традиционными дроссельными газостатическими подшипниками устройство отличается простотой конструкции и технологичностью. Подшипник всегда устойчив. Уменьшение податливости несущего слоя, как правило, сопровождается ростом быстродействия подшипника. Зависимости степени устойчивости по ряду параметров имеют глобальный максимум, что позволяет, основываясь на динамических расчетах, проектировать оптимальные по быстродействию конструкции.

Ключевые слова: газостатический подшипник ступенчатого типа, ступенчатый газостатический подшипник.

Введение

В практике применения газостатических подшипников в металлорежущих станках обычно используют конструкции, в которых несущая способность создается за счет применения

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: kowlad@rambler.ru

дросселей. Такие подшипники имеют относительно низкую податливость, однако сложны в изготовлении. Альтернативой являются ступенчатые подшипники, которые хотя и имеют несколько большую податливость, отличаются простотой конструкции и технологичностью [1].

В статье приведены результаты расчета и исследования статических и динамических характеристик ступенчатого газостатического подшипника, полученные на основе применения численно-аналитической методики, позволяющей выполнить их расчет с требуемой точностью.

Постановка задачи и метод ее решения

На рис. 1 показан продольный разрез подшипника ступенчатого типа. Конструкция содержит вал 1 и ступенчатый корпус 2, рабочие поверхности которых образуют входной зазор $h_1(\varphi, t) = h_0 - e(t) \cos(\varphi)$ и выходной $h_2(\varphi, t) = h_1(\varphi, t) - \delta$ несущие смазочные зазоры длины l_1 и $l_2 = l - l_1$ соответственно, где φ – окружная координата, t – текущее время, δ – высота ступени, l – длина подшипника, h_0 – толщина входного зазора при соосном расположении вала и корпуса, e – эксцентриситет вала. Газовая смазка поступает в подшипник через его торец под постоянным давлением p_s . Преодолев гидравлическое сопротивление входного зазора, газ дросселирует на стыке ступеней, обеспечивая на нем переменное давление $p_k(\varphi, t)$ и, следовательно, несущую способность подшипника в целом, затем через выходной зазор истекает в окружающую среду под давлением p_a .

При моделировании движения подшипника полагали, что соблюдается параллельность осей корпуса и вала. Исследование характеристик подшипника проведено с использованием безразмерных величин. За масштабы приняты: радиус вала r_0 – для линейных размеров; входное давление p_a – для давлений; $\pi r_0^2 p_a$ – для сил; $h_0^3 p_a^2 / \mu R T$ – для массовых расходов газа; h_0 – для зазоров и эксцентриситета вала, где μ – вязкость смазки, R, T – универсальная газовая постоянная и абсолютная температура газа [2]. Далее безразмерные величины обозначены прописными буквами.

При расчете статических и динамических характеристик подшипника рассматривали малые радиальные колебания вала относительно его центрального равновесного положения.

Безразмерную функцию распределения давления во входном и выходном зазорах находили с помощью численно-аналитической методики. Методика позволяет выполнить конечно-

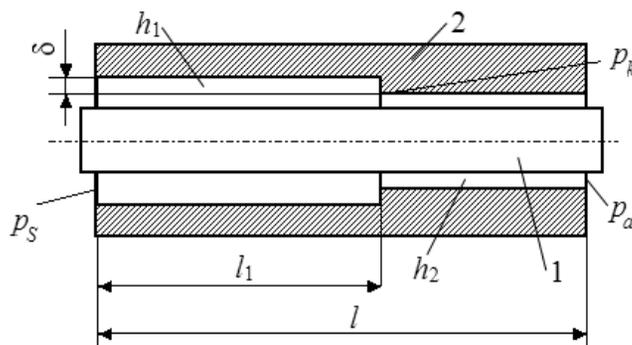


Рис. 1. Расчетная схема подшипника

разностный расчет статических и динамических характеристик универсального радиального газостатического блока, математическая модель которого в безразмерном виде представляет краевую задачу для дифференциального уравнения Рейнольдса [2], описывающего течение газовой смазки в зазоре блока

$$\begin{cases} \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(H^3 \frac{\partial P^2}{\partial \varphi} \right) + H^3 \frac{\partial^2 P^2}{\partial Z^2} = 2\sigma \frac{\partial(PH)}{\partial \tau}, \\ P(0, \varphi, \tau) = P_1(\varphi, \tau), P(L, \varphi, \tau) = P_2(\varphi, \tau), \\ P(Z, 0, \tau) = p(Z, 2\pi, \tau), \frac{\partial P}{\partial \varphi}(Z, 0, \tau) = \frac{\partial P}{\partial \varphi}(Z, 2\pi, \tau), \\ P(Z, \varphi, 0) = P_0(Z), \end{cases} \quad (1)$$

где $H(\varphi, \tau) = H_0 - \varepsilon(\tau) \cos(\varphi)$ – безразмерная толщина смазочного слоя блока, ε – эксцентриситет вала, $L = l/r_*$, $R = r/r_*$ – безразмерные длина блока и радиус вала; Z, τ – безразмерная продольная и временная координаты; r_*, h_* – масштабы линейных размеров и зазора блока;

$\sigma = \frac{12\mu r_*^2}{p_a h_*^2 t_*}$ – число сдвливания газовой пленки.

Используя методику решения линеаризованной задачи (1), находили лапласовы трансформанты несущей способности в соответствующих зазорах подшипника и предельные значения массовых расходов на стыке ступеней конструкции.

Математическая модель динамики подшипника включает также уравнение силового равновесия вала 1 с учетом его силы инерции при единичной безразмерной массе совершающего радиальные колебания вала

$$M = mh_0 / \pi r_0^2 p_a t_0^2 = 1 \quad (2)$$

и уравнение баланса предельных расходов на стыке ступеней

$$\overline{\Delta W}_1(s) + \overline{\Delta W}_2(s) + s^2 \overline{\Delta \varepsilon}(s) = \overline{\Delta F}(s), \quad \overline{\Delta Q}_1(s) - \overline{\Delta Q}_2(s) = 0, \quad (3)$$

где $\overline{\Delta \varepsilon}, \overline{\Delta F}, \overline{\Delta W}_1, \overline{\Delta W}_2$ – лапласовы трансформанты эксцентриситета вала, внешней силы и несущей способности подшипника во входном и выходном зазорах, $\overline{\Delta Q}_1, \overline{\Delta Q}_2$ – лапласовы трансформанты упомянутых расходов, m – масса вала, t_0 – масштаб текущего времени, s – переменная интегрального преобразования Лапласа [3].

Результаты исследования

В расчетах использовали входные безразмерные параметры: n – число делений используемой конечно-разностной сетки, безразмерное входное давление P_s , коэффициент настройки давления на стыке ступеней $\chi = (P_{k0}^2 - 1) / (P_s^2 - 1) \in [0, 1]$ при соосном расположении вала и корпуса, длину подшипника L , коэффициент удлинения входного зазора $k = L_1/L \in [0, 1]$, $\sigma = 12\mu r_*^2 / p_a h_*^2 t_0$ – число сдвливания газовой пленки (этот параметр оказывает влияние лишь на динамические характеристики подшипника).

Рассчитывали безразмерную статическую податливость подшипника $K = \overline{\Delta \varepsilon}(0) / \overline{\Delta F}(0)$ и степень его устойчивости $\eta = -\text{Max Re} \{s_k\}$, которая обратно пропорциональна продолжитель-

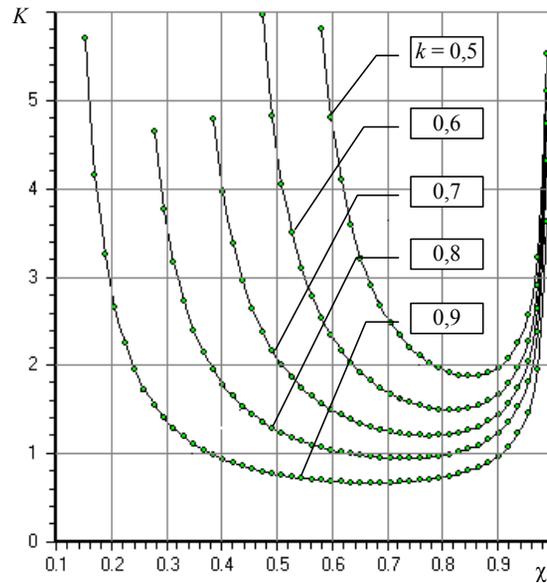


Рис. 2. Зависимость статической податливости K от коэффициента χ при $n = 16$; $P_s = 5$; $L = 1,5$ для различных значений коэффициента k

ности переходного процесса, где s_k – корни характеристического уравнения модели (1) – (3), β – мнимая часть корня s_k , для которого $\text{Re} \{s_k\} = -\eta$. Критерий η определяет скорость затухания переходного процесса в динамической системе.

На рис. 2 показаны графики зависимости статической податливости K от коэффициента настройки χ для различных значений относительного удлинения k входного зазора.

Видно, что начиная с определенных значений k и χ подшипник приобретает податливость ($K > 0$). Анализ модели показывает, что это имеет место при $1 - k < \chi < 1$. Так, если принять $k = 0,8$, то $K > 0$ при $\chi > 0,2$. Представленные на рис. 3 кривые имеют экстремальный характер, что свидетельствует о существовании оптимального с точки зрения минимума податливости значения коэффициента настройки χ . Например, для $k = 0,8$, как видно из графика, таким значением будет $\chi \approx 0,7$. Видно также, что чем больше удлинение k , тем меньше оптимальное значение податливости K . Таким образом, с точки зрения характеристик статики подшипник тем лучше, чем больше относительное удлинение k входного зазора.

Как показывают сравнение зависимостей, изображенных на рис. 4 и 5, подшипник всегда устойчив ($\eta > 0$) в областях положительной податливости $K > 0$. Наилучшие с точки зрения быстродействия значения параметров k и χ также находятся в области умеренных и больших значений, то есть чем меньше податливость подшипника, тем, как правило, выше его быстродействие.

Быстродействие подшипника в значительной мере зависит от числа сдвливания σ . Это видно из графиков зависимостей $\eta(\sigma)$, которые показаны на рис. 4. Зависимости также имеют экстремальный характер, и их максимум соответствует наилучшему режиму динамики подшипника. Так, при $\chi = 0,8$ максимальное значение $\eta \approx 1,2$ имеет место при $\sigma_{\max} \approx 3,4$. Анализ

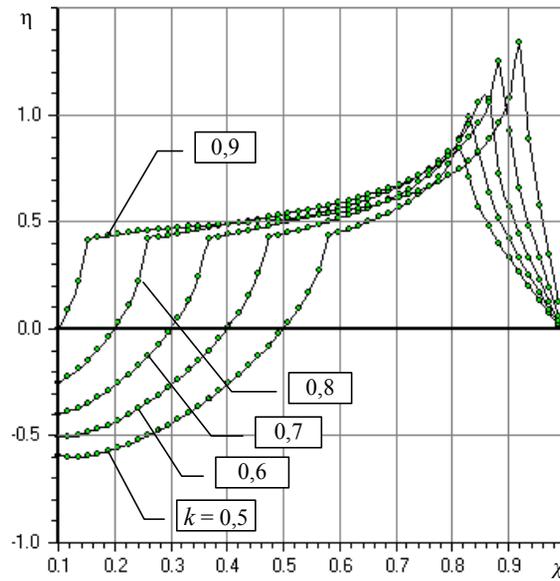


Рис. 3. Графики зависимости степени устойчивости η от коэффициента χ для $n = 16$; $P_s = 5$; $L = 1,5$; $\sigma = 2,8$ при различных значениях коэффициента k

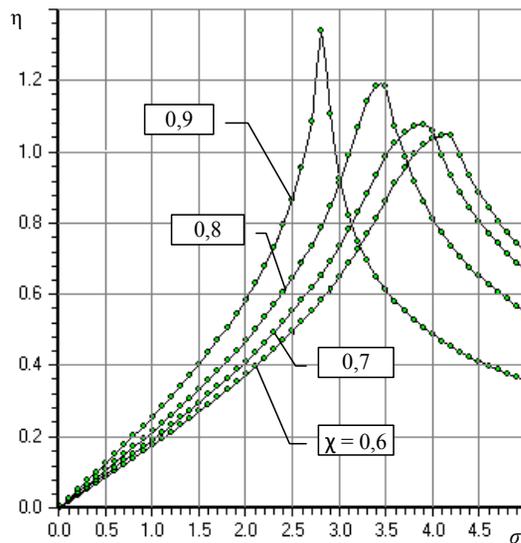


Рис. 4. Графики зависимости степени устойчивости η от числа сдавливания σ для $n = 16$; $P_s = 5$; $L = 1,5$; $k = 0,8$ при различных значениях коэффициента χ

расчетных данных показал, что при $\sigma < \sigma_{\max}$ переходные характеристики имеют колебательный характер, при $\sigma > \sigma_{\max}$ – аperiодический. Таким образом, при проектировании подшипника следует ориентироваться на значения σ , которые лежат в области аperiодичности переходного процесса в близкой окрестности σ_{\max} , поскольку им соответствует большой запас устойчивости конструкции. Для приведенного примера можно принять $\sigma = 3,5$.

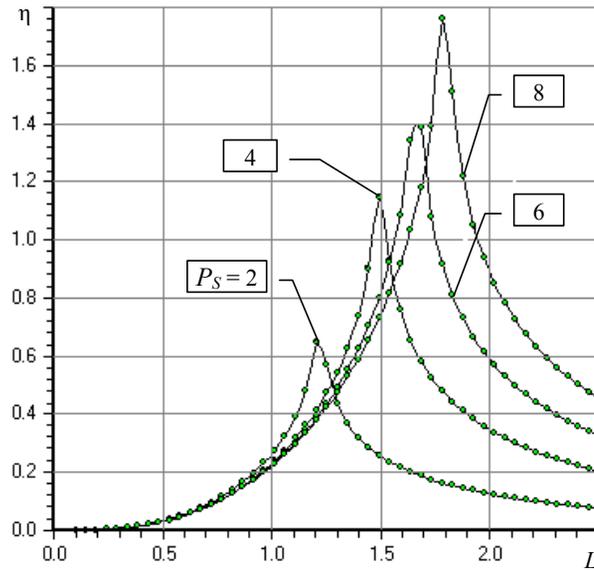


Рис. 5. Графики зависимости степени устойчивости η от относительной длины L для $n = 16$; $\chi = 0,85$; $k = 0,85$; $\sigma = 2,8$ при различных значениях входного давления P_s

Используя это значение, можно, например, найти размерный зазор h_0 оптимального по быстрдействию подшипника. Воспользовавшись (2) и исключив из выражения для σ масштаб времени t_0 , получим формулу для вычисления этого зазора:

$$h_0 = r_0 \sqrt[5]{\frac{144\pi r_0 \mu^2}{m\sigma^2 p_a}}.$$

Уравнение баланса статических расходов на стыке ступеней после несложных преобразований позволяет указать формулу для вычисления высоты ступени подшипника:

$$\delta = h_0 \left(1 - \sqrt[3]{(1/\chi - 1)(1/k - 1)} \right).$$

Экстремальный характер имеют и зависимости $\eta(L)$, графики которых для различных значений входного давления P_s изображены на рис. 5. Наилучшие показатели динамики имеют конструкции относительной длины $L = 1 - 2$. Увеличение входного давления является фактором повышения быстрдействия подшипника, при этом пик быстрдействия смещается в сторону больших L .

Результаты проведенного исследования позволяют сделать заключение о том, что при проектировании радиальных газостатических подшипников ступенчатого типа следует учитывать не только статические характеристики, но также критерии оценки динамики переходных процессов. Как правило, зависимости последних носят экстремальный характер, что дает возможность рассчитать оптимальные значения ряда параметров подшипника, таких, например, как длина и толщина его зазоров.

Список литературы

- [1] *Тюриков А.С., Шатохин С.Н.* // Повышение точности и производительности на станках. Красноярск, 1973. С. 110–115.
- [2] *Константинеску В.Н.* Газовая смазка: пер. с рум. М.: Машиностроение, 1968. 709 с.
- [3] Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / ред. Е.А. Санковский. Минск: Вышэйш. шк., 1973. 584 с.