

# Расчет газостатических подшипников с продольными канавками в виде выкружек и лысок

Канд. техн. наук В. А. ФЕДОТОВ, инж. А. И. ШЕВЧУК

Опыт промышленного внедрения газостатических опор в шпиндельных узлах станков различного типа, например, в сверлильных станках мод. ABL-24 и ABB-24MS, показал, что достаточно надежным подшипником для цилиндрических и конических шпинделей является газостатическая опора с продольными канавками. Газовые подвесы с продольными канавками конструктивно просты, технологичны, имеют довольно широкую зону устойчивой работы ротора и наибольший, по сравнению с другими типами газостатических подшипников, восстанавливающий момент при угловых перекосах вала [1]. Среди известных способов изготовления продольных канавок на рабочих поверхностях газовых подшипников [2] наиболее экономичным и обеспечивающим достаточную точность является выполнение канавок путем снятия выкружек или лысок на выпуклой рабочей поверхности опоры. Однако разработана пока методика расчета газовых подвесов с продольными канавками прямоугольного поперечного профиля [1, 3]. Поскольку в расчетах газостатических опор по методике [3] взаимосвязь между геометрическими параметрами зоны, профилированной канавками, учитывается только одним безразмерным коэффициентом изотропности  $\Theta^2$ , представляющим собой отношение сопротивлений течению газа вдоль и поперек канавок, то эту методику можно распространить и на случай канавок произвольного профиля. Если газостатические подшипники с продольными канавками различного поперечного профиля имеют одинаковые значения коэффициента изотропности  $\Theta^2$  при фиксированной величине относительной ширины канавки  $\chi$ , равной отношению ширины канавки к суммарной ширине канавки и выступа, то у них будут практически одинаковыми и интегральные характеристики. Таким образом, при расчете газовых подвесов с продольными канавками в виде выкружек или лысок по методике [1, 3] задача состоит в определении коэффициента изотропности  $\Theta^2$  профилированной зоны подшипника.

У газостатического подшипника (рис. 1) из области профилированной выкружкой, выделим элемент газового слоя в виде квадрата (рис. 2) размерами  $r_0(\varphi_1 + \varphi_2) \times r_0(\varphi_1 + \varphi_2)$ .

Как следует из работы [4], сопротивление течению газа через выступ выделенного элемента газового слоя соответственно в осевом и окружном направлениях определяется выражениями

$$\left. \begin{aligned} R_{z\theta} &= \frac{24\mu(\varphi_1 + \varphi_2)}{kc^3\varphi_2} \\ R_{\varphi\theta} &= \frac{24\mu\varphi_1}{kc^3(\varphi_1 + \varphi_2)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\mu$  — вязкость газа;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — центральные углы, приходящиеся соответственно на канавку и на выступ;  $k = \rho/p$  — отношение плотности газа к давлению при изотермическом процессе;  $c$  — радиальный зазор подшипника.

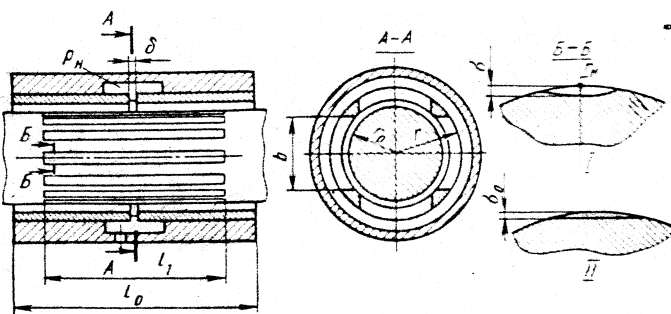


Рис. 1. Газостатический подшипник с продольными канавками в виде выкружек (I) и лысок (II)

Для определения сопротивления течению газа выделенного квадрата запишем соответственно элементарную проводимость  $dL_{zk}$  (величину, обратную сопротивлению) элемента газового слоя в осевом и элементарное сопротивление  $dR_{\varphi k}$  в окружном направлениях:

$$\left. \begin{aligned} dL_{zk} &= \frac{kh^3 d\varphi}{24\mu(\varphi_1 + \varphi_2)} \\ dR_{\varphi k} &= \frac{24\mu d\varphi}{kh^3(\varphi_1 + \varphi_2)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $h = c \left[ 1 + (1 + \beta) \frac{1 - \nu \varphi_1^2 - 4\varphi_2^2}{\nu \varphi_1^2} \right]$  — радиальный зазор подшипника в канавке [здесь  $\nu = \frac{c}{c + \sigma_0}$  — параметр плавности зазора ( $\sigma_0$  — наибольшая глубина канавки

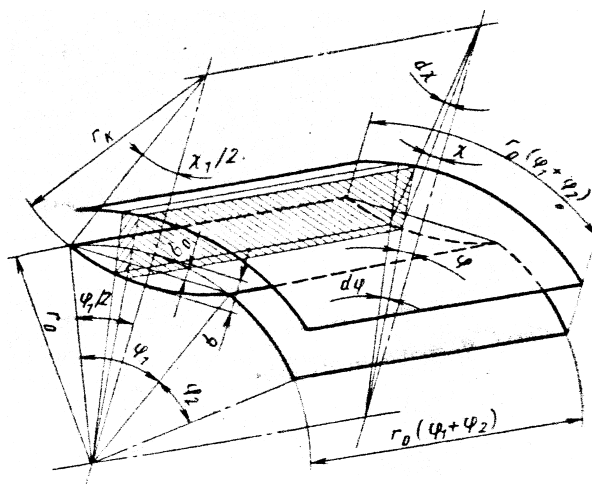


Рис. 2. Элемент газового слоя области подшипника, профилированной канавками

в виде лыски);  $\beta = r_0/r_k$  — коэффициент кривизны канавки ( $r_k$  — радиус шлифовального круга;  $r_0$  — радиус вала подшипника). Наибольшая глубина канавки в виде выкружек  $\sigma = (1 + \beta)\sigma_0$ .

Интегрирование выражений (2) в пределах от  $-\varphi_1/2$  до  $\varphi_1/2$  дает некоторые сопротивления

$$\left. \begin{aligned} R_{z_k} &= \frac{24\mu v^3}{kc^3\eta}; \\ R_{\varphi_k} &= \frac{24\mu^2\chi\gamma}{kc^3}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{1}{4\tau v} + \frac{3}{8v\tau^2} - \frac{3}{16\tau^2\sqrt{\tau(\tau-v)}} \ln \frac{\sqrt{\tau-v} + \sqrt{\tau-v}}{\sqrt{\tau} + \sqrt{\tau-v}}$ ;

$\eta = \tau^2 + \frac{3}{5}\tau(\tau-v)^2 - \frac{1}{7}(\tau-v)^3$ ;  $\tau = 1 + \beta(1-v)$ ;  $\chi = \varphi_1/(\varphi_1 + \varphi_2)$ .

Соотношения (1) и (3) позволяют записать выражение коэффициента изотропности для зоны подшипника, профилированной продольными канавками в виде выкружек:

$$\Theta^2 = \frac{R_z}{R_\varphi} = \frac{v^3}{[\chi\eta + v^3(1-\chi)] [\chi\gamma^3 + (1-\chi)]} \quad (4)$$

Для определения коэффициента изотропности подшипника с продольными канавками в виде лысок достаточно в величинах, входящих в выражения (3), положить  $\beta = 0$ .

Число продольных канавок в виде выкружек или лысок газостатического подшипника и параметры опоры связаны между собой соотношением

$$N = \lambda \chi \sqrt{\frac{r_0 v}{2c(1-v)}} \quad (5)$$

Для того чтобы определить наибольшую глубину выкружек  $\sigma$  или лысок  $\sigma_0$ , следует по таблице, составленной на основании расчетов [1, 3], для заданных значений безразмерного давления наддува  $p_n^*$ , представляющего собой отношение абсолютного давления наддува к давлению окружающей среды, относительной

длины опоры  $\lambda = l_0/2r_0$  и относительной ширины канавки  $\chi = \varphi_1/(\varphi_1 + \varphi_2)$  найти параметр  $v$  плавности зазора. Затем по формуле (4), положив  $\eta = 0$  и  $\gamma = 0$ , вычисляют коэффициент изотропности  $\Theta^2$  зоны подшипника, профилированной продольными канавками прямоугольного профиля. По найденному значению  $\Theta^2$ , заданному  $\chi$  и известной величине коэффициента кривизны канавки  $\beta$  из формулы (4), или используя рис. 3, определяют параметр плавности зазора  $v$ , после чего вычисляют наибольшую глубину выкружек ( $\beta > 0$ )

$$\sigma = c(1 + \beta) \frac{1-v}{v} \quad (6)$$

или лысок ( $\beta = 0$ )

$$\sigma_0 = c \frac{1-v}{v} \quad (7)$$

Пусть, например, требуется найти характеристики и конструктивные размеры газостатического подшипника с продольными канавками в виде выкружек и лысок при наличии внешнего дросселя (см. рис. 1) и следующих исходных данных: номинальный расход газа через опору  $Q_n = 0,233$  л/с, допустимый  $Q_d = 0,3$  л/с; рабочий газ — воздух при  $t = 20^\circ\text{C}$ ; избыточное давление наддува воздуха  $p_n = 0,4$  МПа; давление окружающей среды  $p_0 = 0,1$  МПа;  $r_0 = 50$  мм;  $l_0 = 150$  мм;  $r_k = 150$  мм,  $\chi = 0,25$ .

Из таблицы при  $p_n^* = (p_n + p_0)/p_0 = 5$ ,  $\lambda = 1,5$  и  $\chi = 0,25$  для подшипника с продольными канавками прямоугольного профиля и внешним дросселем найдем  $\alpha = 0,67$ ;  $v = 0,463$ ;  $\psi = 0,556$ ;  $K_z^* = 3,006$ ;  $K_\phi^* = 1,058$ ;  $Q^* = 29,4$ , где  $\psi$  — параметр внешнего дросселя, равный отношению сопротивления дросселирующей щели к сопротивлению рабочего зазора при  $v = 1$ ,  $\chi = 0$  и соосном положении вала и втулки;  $K_z^*$  — безразмерная радиальная жесткость опоры;  $K_\phi^*$  — безразмерная угловая жесткость;  $Q^*$  — безразмерный расход. Из выражения  $Q = \lambda p_0 c^3 Q^*/(12\mu)$  [1, 3], принимая для воздуха при  $t = 20^\circ\text{C}$  вязкость газа  $\mu = 181 \cdot 10^{-7}$  Н·с/м и полагая  $Q = Q_n$ , определяем радиальный зазор подшипника  $c = 0,017$  мм.

По формуле (4) при  $\eta = 0$  и  $\gamma = 0$  для области, профилированной канавками постоянной глубины, получим  $\Theta^2 = 0,3948$ . Для данного значения  $\Theta^2$  из выражения (4) или по графикам рис. 3 определим параметр плавности зазора  $v$  при  $\beta = r_0/r_k = 0,33$  для зоны подшипника, профилированной выкружками,  $v = 0,46$ ;

| $\lambda$                       | $\alpha$ | $v$   | Подшипник с канавками, без внешнего дросселя |            |       | Подшипник с канавками и внешним дросселем |         |            |       |
|---------------------------------|----------|-------|----------------------------------------------|------------|-------|-------------------------------------------|---------|------------|-------|
|                                 |          |       | $K_z^*$                                      | $K_\phi^*$ | $Q^*$ | $\psi$                                    | $K_z^*$ | $K_\phi^*$ | $Q^*$ |
| При $p_n^* = 5$ ; $\chi = 0,25$ |          |       |                                              |            |       |                                           |         |            |       |
| 0,5                             | 0,663    | 0,477 | 0,345                                        | 0,198      | 174   | 0,787                                     | 1,429   | 0,119      | 71,7  |
| 1                               | 0,666    | 0,471 | 0,666                                        | 0,757      | 87,8  | 0,676                                     | 2,45    | 0,476      | 39,3  |
| 1,5                             | 0,67     | 0,463 | 0,95                                         | 1,59       | 60    | 0,556                                     | 3,006   | 1,058      | 29,4  |
| 2                               | 0,676    | 0,454 | 1,186                                        | 2,605      | 46,1  | 0,455                                     | 3,242   | 1,822      | 24,6  |
| 2,5                             | 0,682    | 0,442 | 1,376                                        | 3,699      | 38    | 0,374                                     | 3,31    | 2,704      | 21,2  |
| 3                               | 0,691    | 0,432 | 1,53                                         | 4,848      | 32,8  | 0,313                                     | 3,289   | 3,668      | 20    |
| 3,5                             | 0,7      | 0,418 | 1,659                                        | 5,996      | 29,4  | 0,26                                      | 3,254   | 4,68       | 18,8  |
| 4                               | 0,708    | 0,406 | 1,752                                        | 7,125      | 26,7  | 0,233                                     | 3,188   | 5,689      | 17,9  |
| При $p_n^* = 6$ ; $\chi = 0,25$ |          |       |                                              |            |       |                                           |         |            |       |
| 0,5                             | 0,664    | 0,48  | 0,419                                        | 0,244      | 251   | 0,817                                     | 1,762   | 0,148      | 102   |
| 1                               | 0,666    | 0,473 | 0,814                                        | 0,932      | 128   | 0,698                                     | 3,021   | 0,59       | 56,2  |
| 1,5                             | 0,67     | 0,464 | 1,158                                        | 1,956      | 87    | 0,574                                     | 3,7     | 1,307      | 42,1  |
| 2                               | 0,676    | 0,453 | 1,453                                        | 3,195      | 67,4  | 0,466                                     | 3,992   | 2,245      | 35,5  |
| 2,5                             | 0,683    | 0,443 | 1,686                                        | 4,552      | 55,5  | 0,382                                     | 4,065   | 3,342      | 31,6  |
| 3                               | 0,692    | 0,431 | 1,872                                        | 5,961      | 47,9  | 0,317                                     | 4,044   | 4,53       | 29    |
| 3,5                             | 0,701    | 0,419 | 2,031                                        | 7,376      | 42,9  | 0,266                                     | 3,987   | 5,77       | 27,2  |
| 4                               | 0,709    | 0,408 | 2,14                                         | 8,763      | 38,8  | 0,227                                     | 3,898   | 7,013      | 25,8  |

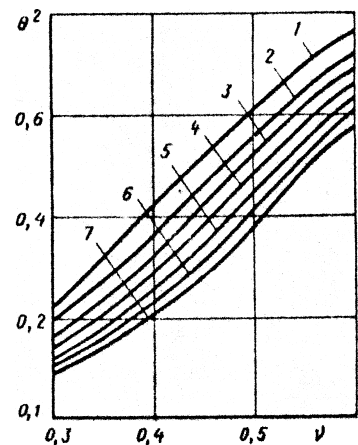


Рис. 3. Зависимости коэффициента изотропности  $\Theta^2$  от параметра плавности зазора  $v$  при  $\chi = 0,25$  и различных значениях коэффициента  $\beta$  кривизны канавок:  
1)  $\beta = 0$ ; 2)  $\beta = 0,1$ ; 3)  $\beta = 0,2$ ;  
4)  $\beta = 0,3$ ; 5)  $\beta = 0,4$ ; 6)  $\beta = 0,5$ ; 7)  $\beta = 0,6$

при  $\beta=0$  для канавок в виде лысок  $\nu=0,3875$ . Затем по формуле (6) определим наибольшую глубину выкружек, а по формуле (7) — лысок. В нашем примере оказывается  $\sigma=\sigma_0=0,027$  мм.

Из выражения (5) находим число канавок газостатического подшипника в виде выкружек ( $N_s \approx 28$ ) и число канавок в виде лысок ( $N_n \approx 24$ ). Длина продольных канавок  $l_1 = \alpha l_0 = 100,5$  мм. Радиальная  $K_r$  и угловая  $K_\theta$  жесткости радиального газостатического подшипника с продольными канавками в виде выкружек или лысок и внешним дросселем определяются соотношениями [1, 3]

$$K_r = \frac{4\rho_0 r_0^3}{c} K_r^*, \quad K_\theta = \frac{4\rho_0 r_0^2}{c} K_\theta^*$$

где  $K_r^* = 3,006$  и  $K_\theta^* = 1,058$  (см. таблицу, для  $p_n^* = 5$ ;  $\alpha = 0,25$ ;  $\lambda = 1,5$ ;  $\sigma = 0,67$ ;  $\nu = 0,463$ ).

В результате соответствующих вычислений получим:  $K_r = 176,8$  МН/м;  $K_\theta = 3,11$  МН.

Ширину  $\delta$  щели наддува (см. рис. 1) газового подвеса найдем исходя из параметров внешнего дросселя, которые в нашем случае для дросселя типа Ди-Шайрса [3] (см. рис. 1, А—А) определяются соотношением [3]

$$\psi = \frac{4\pi c^3 (r - r_0)}{n b \lambda \delta^2},$$

где  $r$  — внешний диаметр втулки подшипника;  $n$  — число отсеков дросселя;  $b$  — ширина одного отсека. Число отсеков и их ширину назначают, соотносясь с технологией изготовления щели наддува и диаметром вала подшипника, учитывая при этом, что перемычки между отсеками дросселя должны быть возможно меньшей ширины. Протяженность дросселя  $(r - r_0)$  не должна превышать 2—5 мм, так как в противном случае профилактическая очистка и промывка щели наддува затруднена. Принимая  $n = 4$ ,  $b = 68$  мм и  $r - r_0 = 3$  мм, найдем, что при  $\psi = 0,556$  (см. таблицу) ширина щели наддува для данного типа дросселя  $\delta = 0,0093$  мм.

Если же щель наддува кольцевая, т. е. без перемычек, то ширина ее  $\delta_k$  определяется из соотношения [1, 3]

$$\psi = 2c^3 \frac{\ln(r/r_0)}{\lambda \delta_k^3},$$

согласно которому при тех же исходных данных  $\delta_k = 0,0088$  мм.

Полученные значения  $\delta$  и  $\delta_k$  являются оптимальными, т. е. радиальная жесткость  $K_r$  газового подвеса в этом случае будет максимальной.

Так как размеры  $\delta$  и  $\delta_k$  ( $\sim 9$  мкм) находятся на пределе технологических возможностей оборудования, то необходимо проанализировать влияние отклонений ширины дросселя от его оптимального значения на характеристики подшипника. В расчетные формулы ширина щели наддува входит неявно, через параметр  $\psi$ , поэтому в первую очередь требуется, исходя из результатов работ [1, 3], найти пределы изменения  $\psi$ , предполагая, например, что радиальная жесткость  $K_r$  подшипника не должна отличаться от максимальной более чем на 10 % и при этом расход газа через опору не должен превышать допустимого  $Q_2$ . Как следует из работ [1, 3], радиальная жесткость  $K_r^* = 0,9 K_r = 159,12$  МН/м газостатического подвеса достигается при  $\psi_1 = 0,25$  и  $\psi_2 = 1,15$ . Для найденных значений  $\psi$  ширина щели ( $\delta$  или  $\delta_k$ , в зависимости от типа щели), угловая жесткость  $K_\theta$  подвеса и расход газа  $Q$  через него будут: при  $\psi_1 = 0,25$   $\delta_1 = 12,2$  мкм,  $\delta_k = 11,6$  мкм,  $K_\theta = 3,77$  МН,  $Q_1 = 0,293$  л/с  $< Q_2$ ; при  $\psi_2 = 1,15$ :  $\delta_2 = 7,3$  мкм;  $\delta_k = 7,0$  мкм;  $K_\theta = 2,33$  МН;  $Q_2 = 0,134$  л/с  $< Q_2$ .

Окончательно принимаем: для щели типа Ди-Шайрса  $\delta = 9_{-1,5}^{+3}$  мкм, для кольцевой щели  $\delta_k = 9_{-2}^{+2,5}$  мкм.

Таким образом, при изменении ширины щели дросселя в этих пределах радиальная жесткость опоры может быть меньше расчетной на 10 %. Угловая жесткость и расход газа через подшипник с увеличением ширины щели наддува могут возрасти соответственно на 21 и 33 % по отношению к их расчетным величинам и уменьшиться на 25 и 39 % если ширина  $\delta$  или  $\delta_k$  щели соответствует нижнему пределу допуска.

#### Список литературы

1. Табачников Ю. Б., Шевченко А. В., Степанчук В. И. Исследование и оптимизация радиальных газостатических подшипников с продольными канавками с учетом угловой жесткости. — Машиноведение, 1981, № 2, с. 100—107.
2. Пинегин С. В., Емельянов А. В., Табачников Ю. Б. Газодинамические подпятники со спиральными канавками. М.: Наука, 1977. 107 с.
3. Емельянов А. В., Федотов В. А., Приятельчук В. А. Характеристики радиальных опор с двойным дросселированием газового потока. — Машиноведение, 1977, № 2, с. 97—104.
4. Емельянов А. В., Федотов В. А., Дзюбинский Г. Г. Исследование газодинамических подпятников и улучшение их характеристик. — Машиноведение, 1976, № 3, с. 96—105.

#### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Напоминаем Вам, что наш журнал в розничную продажу не поступает и распространяется только по подписке, которую можно оформить в течение всего года на любой календарный срок и необходимое количество экземпляров. Подписка принимается агентствами (отделениями) Союзпечати или почтовыми отделениями.

Желающие могут подписаться на интересующий номер журнала до первого числа предподписного месяца, например, на четвертый номер — до 1 марта и т. д. Индекс журнала 70120, цена одного номера 85 коп.

Обо всех случаях отказа в подписке или несвоевременной доставке журнала необходимо известить редакцию с указанием наименования агентства или номера почтового отделения.