

УДК 621.822.57

В. О. Федотов, канд. техн. наук, доц.;

І. В. Федотова

## ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ГАЗУ В ГАЗОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ З ПОЗДОВЖНИМИ КАНАВКАМИ

Досліджено питання підвищення економічності газостатичних опор з поздовжніми канавками за рахунок зменшення витрат газу і збільшення силових характеристик опор шляхом використання канавок змінної глибини.

### Вступ

Газостатичні опори з поздовжніми глухими канавками сталої глибини та ширини успішно використовуються як в тихохідних ( $n \leq 6000$  об/хв, рис. 1), так і у високошвидкісних шпindelних вузлах ( $n \geq 6000$  об/хв, рис. 2).

Вузли прості за конструкцією та технологічні у виготовленні. Надійність в роботі обумовлена їх працездатністю навіть за майже 100 % вологості повітря (газу), що подається від джерела стиснутого газу в робочий зазор між поверхнями вала та втулки, і за наявності в газі сторонніх твердих часток (недостатня очистка газу фільтрами).

Дослідження, оптимізація конструктивних параметрів та розрахунок газостатичних опор з канавками сталої глибини та ширини описана в багатьох наукових працях, наприклад [1—3]. Але такі підвіси за своїми економічними характеристиками (відношення підйомної сили до витрат газу для роботи) поступаються опорам з регуляторами тиску поза робочого зазору у вигляді отворів малого діаметру, щілинами наддування газу, пористих втулок.

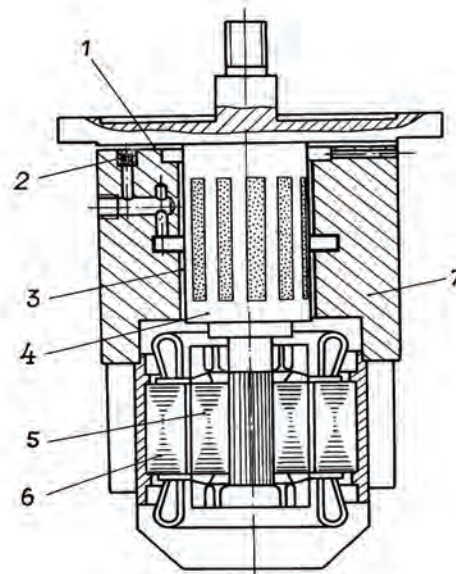


Рис. 1. Електрошпindel на радіальному газовому підвісі з поздовжніми канавками:

- 1 — осьовий підвіс, 2 — дросель подачі газу,  
3 — газовий підвіс з поздовжніми канавками,  
4 — вал, 5 — ротор, 6 — статор, 7 — корпус

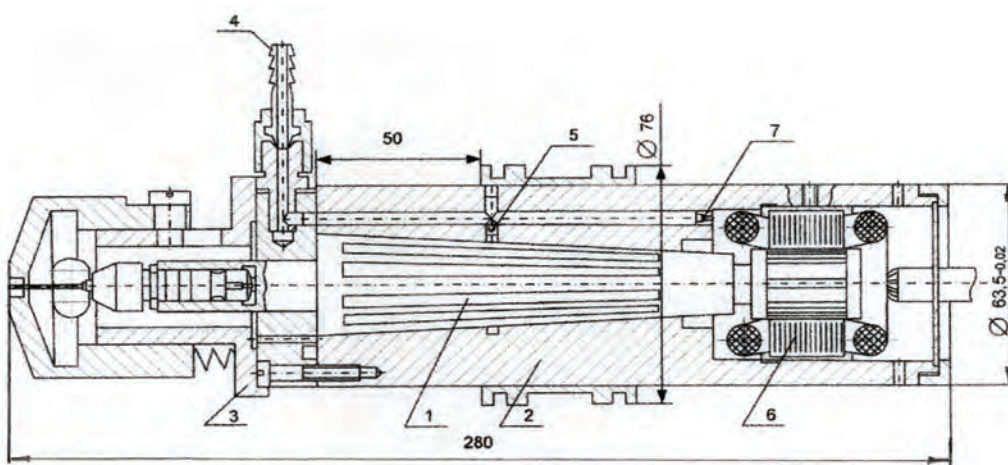


Рис. 2. Шпindelний вузол на кінцевих газових підвісах ШВ-64Є.

- 1 — вал з поздовжніми глухими канавками, 2 — корпус, 3 — втулка, 4 — штуцер,  
5 — дросель, 6 — статор, 7 — дросель подачі газу для охолодження статора

### Постановка задачі

Економічність газостатичних опор з поздовжніми канавками можна підняти за рахунок зменшення шкідливих колових перетікань газу з ділянки з мінімальним робочим зазором у напрямку ділянки з меншим тиском. Одним зі шляхів збільшення радіальної підйомної сили, відновлювального моменту з кутовими переміщеннями вала та зменшенням витрат газу на роботу газостатичної опори є використання канавок змінної глибини [4].

Розглянемо конічну газостатичну опору (рис. 3), в якій глибина поздовжніх канавок змінюється за лінійним законом (рис. 4).

Якщо канавки мають сталу ширину, а їх глибина змінюється за лінійним законом, тоді робочий зазор в канавці  $h_k$  і на виступі  $h_b$  на ділянках 1 та 3 знайдемо за формулами

$$h_k = (c + \sigma_0) h_q, \quad h_b = c h_v;$$

$$h_q = 1 - v\zeta - v(\varepsilon + \theta\xi) \cos \varphi - (1 - v - \beta)\zeta$$

$$h_v = 1 - \zeta - (\varepsilon + \theta\xi) \cos \varphi,$$

де  $e_0$  — радіальне переміщення вала;  $e_1$  — характеристики кутового переміщення вала;  $e_2$  — абсолютне осьове переміщення вала;  $\sigma$  — мінімальна глибина поздовжньої канавки;  $\sigma_0$  — максимальна глибина поздовжньої канавки;  $\varphi_1, \varphi_2$  — відповідно, ширина канавки та виступу (в радіальному напрямку);  $\varepsilon = \frac{e_0}{c} \cos \alpha$  — відносне радіальне переміщення вала;  $\theta = \frac{e_1}{c} \cos \alpha$  — відносне кутове переміщення вала;  $v = \frac{c}{c + \sigma_0}$  — параметр плавності газового шару;  $\beta = \frac{\sigma}{c + \sigma_0}$  — параметр канавки змінної глибини;  $\gamma = 1, \psi = v + \beta - 1$  — зі збільшенням глибини канавок за течією газу (рис. 4а);  $\gamma = v + \beta, \psi = 1 - v - \beta$  — у випадку зменшення глибини канавок за течією газу (рис. 4б);  $\zeta = \frac{z}{2l_0} \cos \alpha$  — безрозмірна координата.

Згідно з методикою [1, 2] дослідження газового шару з двомірною неізотропною течією газу, знаходимо розподіл тиску в зазорах з компланарною неспіввісністю вала та втулки конічної газостатичної опори.

$$\chi(1 - \varkappa)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \chi (\varkappa_0 h_q^3 + v^3 h_v^3) \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) \cos^2 \alpha + v^3 \lambda^2 \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{h_v^3 h_q^3}{\varkappa_0 v^3 h_v^3 + h_q^3} \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) = 0, \quad (1)$$

де  $\chi = 1 + 2\xi\lambda \operatorname{tg} \alpha, \lambda = \frac{l_0}{R_0}, \varkappa_0 = 1 - \varkappa$ .

Якщо в рівнянні (1) вважати  $\alpha = 0$ , то отримаємо диференціальне рівняння розподілу тиску газу в профільованих зонах циліндричної газостатичної опори (рис. 5). З  $\varkappa = 0; v = 1; \gamma = 1$  і  $\psi = 0$  із рівняння (1) отримаємо основні рівняння для ділянок 2 і 4 конічного підвісу, а з  $\alpha = 0$  — для циліндричного підвісу.

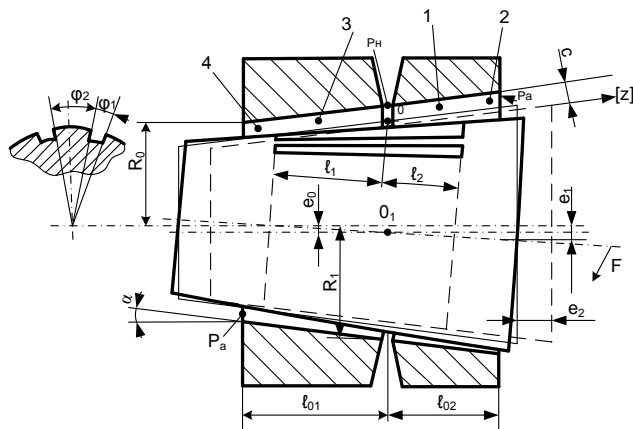


Рис. 3. Конічна підвіска з поздовжніми канавками

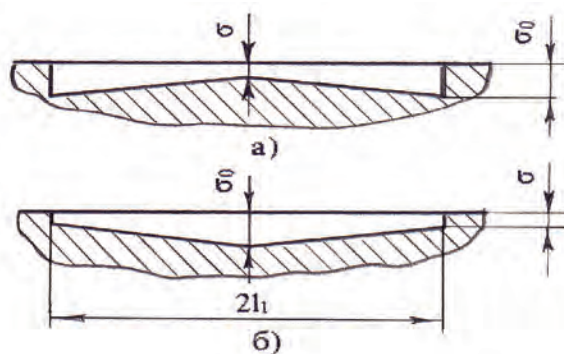


Рис. 4. Профіль поздовжніх канавок: а) збільшення глибини канавки за течією за лінійним законом; б) зменшення глибини канавки за течією за лінійним законом

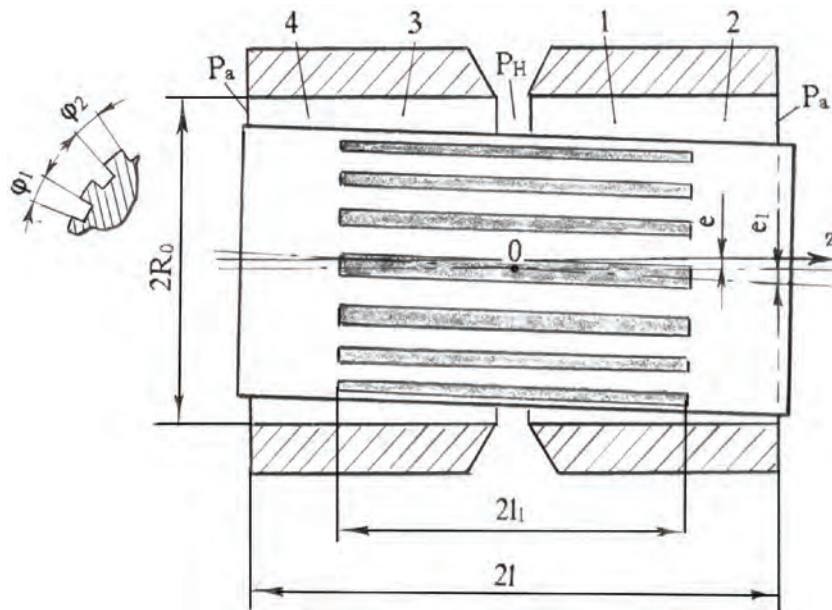


Рис. 5. Циліндрична газостатична опора з поздовжніми канавками

Для визначення безрозмірного квадрату тиску газу  $u_1, u_2, u_3, u_4$  в робочих зазорах газових підвісок, відповідно на ділянках 1—4 (див. рис. 3, 5) використовувався метод сплайнів [5, 6] та метод циклічної прогонки [7]. Знаючи розподіл тиску газу в робочому шарі підвісок (рис. 3, 5), знаходимо статичні характеристики, які для конічної газової підвіски визначаються осью  $F_\zeta$ , та радіальною  $F_\epsilon$  підйомними силами, відновлювальним моментом  $M$  газового шару з кутовими переміщеннями вала та витратами газу  $Q$  [3, 8, 9].

$$F_\zeta = 4R_0^2 P_a F_\zeta^*; \quad F_\epsilon = 4R_0^2 P_a F_\epsilon^*; \quad M = R_0^2 P_a M^*; \quad Q = \frac{\pi \rho P_a c^3}{12\mu} Q^*, \quad (2)$$

де  $F_\zeta^*$  — безрозмірна осьова підйомна сила;  $F_\epsilon^*$  — безрозмірна радіальна підйомна сила;  $\rho$  — густина газу (повітря) за атмосферного тиску;  $\mu$  — динамічний коефіцієнт в'язкості газу;  $M^*$  — безрозмірний відновлювальний момент;  $Q^*$  — безрозмірний параметр витрат газу.

Для  $\alpha = 0$  з формул (2) знаходяться статичні характеристики  $F_\zeta, M$  і  $Q$  радіальної опори з поздовжніми канавками.

### Результати досліджень

В роботі [4] показано, що для оптимальних конструктивних параметрів канавок змінної глибини підвищуються радіальна жорсткість та відновлювальний момент газостатичних опор з поздовжніми глухими канавками. Щодо безрозмірних витрат газу, то їх величина практично не залежить від нахилу канавок (рис. 6, 7) і є дещо меншою, ніж у канавках сталої глибини.

У радіальній газостатичній опорі з зафіксованим значенням відносної довжини канавок  $\alpha$ , глибини яких зменшується за течією газу (див. рис. 4б), існують значення  $\nu$  та  $\beta$  для яких безрозмірна жорсткість досягає максимуму  $K_{\epsilon\epsilon}^* = 1,884$ , що на 54 % більше (табл. 1), ніж у опорі з канавками сталої глибини для значень безрозмірних конструктивних параметрів  $\nu$  і  $\beta$ , що надають максимальну економічність опори для максимум функції  $E_\epsilon = \frac{K_{\epsilon\epsilon}^*}{Q^*}$ .

Зменшення безрозмірних витрат газу у цьому випадку — 3,3 %.

Із табл. 1 бачимо, що ефективність  $E_\epsilon$  газостатичної радіальної опори з канавками змінної глибини на 38 % більша, у порівнянні з опорою, у якій поздовжні канавки мають сталі оптимальні параметри.

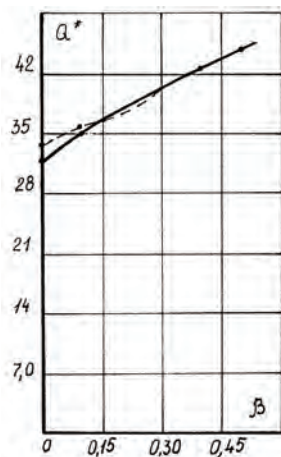


Рис. 6. Залежність безрозмірних витрат газу від коефіцієнта глибини канавки  $\beta$  для  $P_H = 5$ ;  $\lambda = 2$ ;  $\alpha = 0,25$ ;  $\nu = 0,45$ ;

— — глибина канавок зменшується за течією газу; - - — глибина канавок збільшується за течією газу

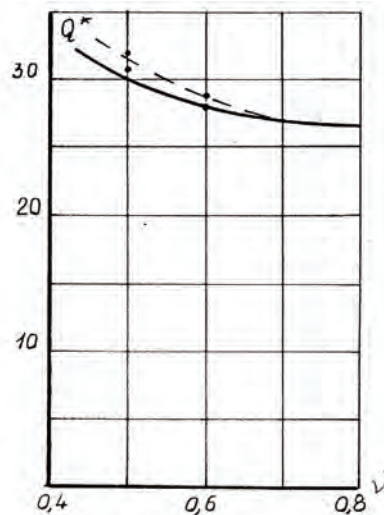


Рис. 7. Залежність безрозмірних витрат газу від коефіцієнта глибини канавки  $\nu$  для  $P_H = 5$ ;  $\lambda = 2$ ;  $\alpha = 0,25$ ;  $\beta = 0$ ;

— — глибина канавок зменшується за течією газу; - - — глибина канавок збільшується за течією газу

Таблиця 1

**Безрозмірні оптимальні конструктивні параметри і відповідні їм характеристики радіальної газостатичної опори з поздовжніми канавками  $P_H = 5$ ;  $\lambda = 2$ ;  $\alpha = 0,25$**

$\alpha$	$\nu$	$K_{\epsilon\epsilon}^*$	$K_{\theta\theta}^*$	$Q^*$	$E_\epsilon$
Опора з канавками глибина яких зменшується за течією газу при $\beta = 0,062$					
0,676	0,312	1,884	3,929	44,5	0,042
Опора з канавками сталої глибини					
0,676	0,454	1,221	2,739	46	0,026

Для кінчної радіальної газової опори (див. рис. 3) за оптимальних значень параметрів  $\nu$  та  $\beta$  (максимум функції  $E_\epsilon = \frac{K_{\epsilon\epsilon}^*}{\sqrt{Q^*}}$ ) використання канавок змінної глибини (див. рис. 4б) приводить до збільшення ефективності  $E_\epsilon$  на 39 % з  $\alpha = 2^\circ$  і 30 % з  $\alpha = 6^\circ$  (табл. 2).

Таблиця 2

**Безрозмірні оптимальні конструктивні параметри і відповідні їм характеристики кінчної газостатичної опори з поздовжніми канавками з  $P_H = 5$ ,  $\alpha = 0,25$**

$\lambda$	$\alpha$	$\xi_0$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\nu$	$\beta$	$K_{\epsilon\epsilon}^* K_{\epsilon\epsilon}^*$	$K_{\theta\theta}^*$	$Q^*$	$E_\epsilon$
Канавки сталої глибини										
2	$2^\circ$	0,52	0,08	0,93	0,4	0,6	1,78	3,82	77	0,023
2	$6^\circ$	0,55	0,08	0,93	0,4	0,6	2,02	4,34	88	0,023
Канавки змінної глибини										
2	$2^\circ$	0,52	0,08	0,93	0,318	0,071	2,43	4,2	76,3	0,032
2	$6^\circ$	0,55	0,08	0,93	0,306	0,058	2,83	5,16	86,1	0,033
$\xi_0 = \frac{l_{01}}{l_{01} + l_{02}}, \xi_1 = \frac{l_{01} - l_1}{l_{01} + l_{02}}, \xi_2 = \frac{l_{01} + l_2}{l_{01} + l_{02}}$										

Враховуючи технологічні допуски, умови працездатності підвісок (див. рис. 1, 2) (відсутність контакту між валом та втулкою), відносне радіальне зміщення вала знаходиться з формули:

$$\epsilon = \frac{0,9K_{\nu\nu}^*}{K_{\nu\nu}^* + K_{\epsilon\epsilon}^* (\alpha_1 + \alpha_2)}, \tag{3}$$

де  $\varepsilon + \nu = 0,9$ ,  $\alpha_1 = \frac{l_1}{R_0}$ ,  $\alpha_2 = \frac{l_2}{R_0}$ .

Із формул (2), (3) в діапазоні лінійності [2, 8] радіальної підйомної сили  $F_e^* = \varepsilon K_{\varepsilon\varepsilon}^*$  для радіальної газостатичної опори (рис. 1) з тиском газу  $P_n = 0,4$  МПа ( $\lambda = 0,140/0,085 = 1,65$ ), радіальному зазорі  $c \approx 25 \cdot 10^{-6}$  мм, використання канавок змінної глибини приводить до зменшення витрат газу на 17,5 % (табл. 3), а для конічної газостатичної опори (рис. 2) для  $P_n = 0,5$  МПа, довжині вала 0,105 м, максимальному діаметрі 0,0284 м, куті  $\alpha = 5^\circ 14'$ , радіальному робочому зазорі  $c = 12 \cdot 10^{-6}$  м канавки змінної глибини приводять до економії біля 16 % стиснутого газу. Для однозмінної роботи зменшення витрат газу для роботи радіальної опори (рис. 1) складає  $6,048 \text{ м}^3$ , для конічної опори (рис. 2) —  $7,373 \text{ м}^3$ .

Таблиця 3

Витрати газу через газостатичні опори з поздовжніми канавками

Тип опори	Канавки сталої глибини	Канавки змінної глибини	Зменшення витрат газу
Радіальна опора (рис. 1)	$Q_c = 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{zm} = 9,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta Q_p = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ (17,5 %)
Конічна опора (рис. 2)	$Q_c = 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{zm} = 13,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta Q_k = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ (16 %)

### Висновки

Використання поздовжніх канавок змінної глибини сприяє збільшенню підйомної сили та відновлювального моменту для кутових переміщень вала зі зменшенням витрат газу, що дозволяє значно підвищити економічність газостатичних опор з поздовжніми канавками.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Хирс. Конструирование опорных подшипников с продольными канавками и внешним нагнетанием смазки / Хирс (G. G. Hirs) // Проблемы трения и смазки. — 1968. — № 4. — С. 324—331.
- Емельянов А. В. Характеристики радиальных газостатических опор с двойным дросселированием газового потока / А. В. Емельянов, В. А. Федотов, В. А. Приятельчук // Машиноведение. — 1977. — № 2. — С. 97—104.
- Степанчук В. І. Лінійний статичний аналіз газостатичних конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками / В. І. Степанчук, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1994. — № 3 (4). — С. 57—61.
- Федотов В. О. Вплив нахилу поздовжніх канавок на характеристики радіальних підвісок / В. О. Федотов, В. В. Савуляк // Проблеми трибології (Problems of Tribology). — 2003. — № 1. — С. 62—66.
- Емельянов А. В. Метод корректирующих сплайнов и его приложение к теории газовых подвесов / А. В. Емельянов, А. И. Шевчук // Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой : Всесоюзное координационное совещание, 12—14 мая 1983 г.: тез. докл. — Винница, 1983. — С. 47—48.
- Степанчук В. И. Применение метода сплайнов к расчету газовых подвесов / В. И. Степанчук, В. А. Федотов, А. И. Шевчук // Совершенствование методики преподавания и научные работы по теоретической и прикладной механике в условиях перестройки высшей школы : XIV межвузовский научно-методический семинар, 9—11 июня 1988 г. : тез. докл. — Хмельницкий, 1988. — С. 101—102.
- Самарский А. А. Разностные схемы / А. А. Самарский. — М. : Наука, 1977. — 656 с.
- Шевчук А. І. Статичні характеристики конічного газового підвісу з поздовжніми канавками при довільних зміщеннях вала / А. І. Шевчук, В. О. Федотов, В. В. Савуляк // Проблеми трибології (Problems of Tribology). — 2002. — № 4. — С. 107—114.
- Федотов В. О. Характеристики конічних газових підвісок поздовжніми канавками змінної глибини / В. О. Федотов, І. В. Федотова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2008. — № 2. — С. 76—80.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 8.12.09  
Рекомендована до друку 24.12.09

**Федотов Валерій Олександрович** — професор, **Федотова Інна Вікторівна** — асистент.

Кафедра опору матеріалів та прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет