

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДІАЛЬНОГО ПІДВІСУ З СХІДЧАСТИМИ МІКРОКАНАВКАМИ ПРИ КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕННЯХ ВАЛА

Вінницький національний технічний університет

### Анотація:

У роботі розглядаються та досліджуються газові радіальні підвіси з мікроканавками сталої глибини та з двома східчастими мікроканавками різної глибини. Проведено порівняння певних характеристик цих підвісів.

**Ключові слова:** газовий радіальний підвіс, східчасті мікроканавки, мікроканавки сталої глибини.

### Abstract:

In the article gas radial suspensions with microcavities of constant depth and with two stepped microcavities of different depth are considered and explored. A comparison of certain characteristics of these suspensions has been made.

**Keywords:** gas radial hinge, step micro-grooves, micro-grooves of constant depth.

Газові підвіси отримали розповсюдження в якості опорних елементів прецизійних верстатів та приладів. Нерідко виникає необхідність витримати задану точність положення осі обертання вала в умовах повільно змінюючого консольного навантаження при жорстких конструктивних обмеженнях на довжину вала. В таких випадках кутова жорсткість та відновлювальний момент газових підвісів стають такими ж важливими інтегральними характеристиками як радіальна жорсткість, підйомна сила та витрати газу.

Під дією сили  $F$  (рис. 1) вал радіального газового з радіальними глухими мікроканавками переміщується в радіальному напрямку на величину  $e$  повертається на кут  $\nu = e_1 / l_0$ .

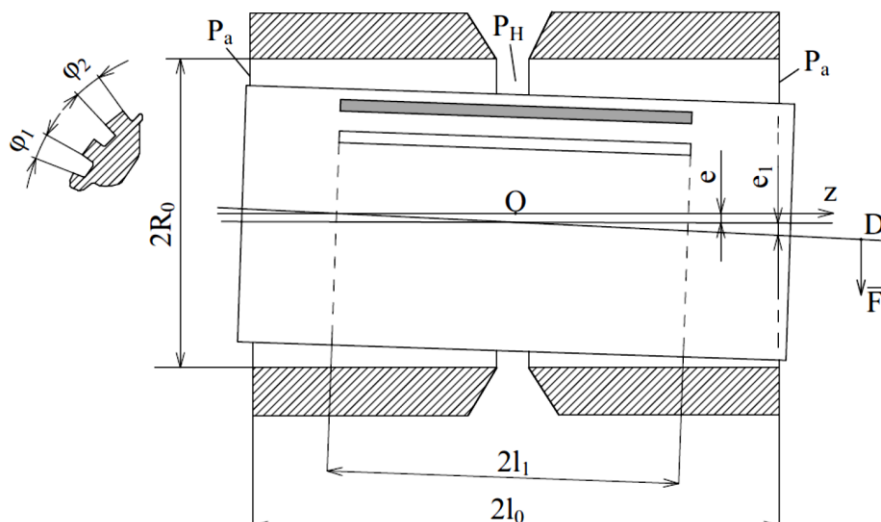


Рис. 1 – Радіальний підвіс з поздовжніми канавками при радіальних та кутових переміщеннях вала під дією сили  $F$ .

Дослідження та розрахунки [1] показали, що безрозмірна підйомна сила  $F^*$  та безрозмірний відновлювальний момент  $M^*$  лінійно залежать від відносного радіального  $\varepsilon = e/c$  та кутового  $\theta = e_1/c$  ( $e_k = l_0 \cdot \nu$  – ексцентриситет на торці вала при  $e=0$ ,  $\nu \neq 0$ ) переміщень вала в межах:  $-0,5 \leq \varepsilon \leq 0,5$ ;  $-0,5 \leq \theta \leq 0,5$ . Тоді безрозмірна підйомна сила  $F^*$  та безрозмірний відновлювальний момент  $M^*$  газового шару підвісу знаходяться з наступних залежностей

$$F^* = K_{\varepsilon}^* \varepsilon + K_{\varepsilon\theta}^* \theta, \quad M^* = K_{\theta}^* \theta + K_{\theta\varepsilon}^* \varepsilon, \quad (1)$$

Для газових підвісів вплив радіальних переміщень на відновлювальний момент  $M$ , а кутових – на підйомну силу  $F$  практично дорівнює нулю [1] і тому:

$$K_{\varepsilon\theta}^* \cong 0, \quad K_{\theta\varepsilon}^* \cong 0.$$

Враховуючи (1), безрозмірні статичні характеристики підвісу будуть знаходитися з виразів:

$$F^* = K_{\varepsilon}^* \varepsilon, \quad K_{\varepsilon}^* = \left( \frac{dF^*}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}, \quad M^* = K_{\theta}^* \theta, \quad K_{\theta}^* = \left( \frac{dM^*}{d\theta} \right)_{\theta=0}.$$

де  $K_{\varepsilon}^*$  – безрозмірна радіальна жорсткість конічного підвісу,  $K_{\theta}^*$  – безрозмірна кутова жорсткість.

Тобто, при визначенні характеристик газового підвісу (рис.1) при консольному навантаженні достатньо дослідити підвіс незалежно при радіальному та кутовому переміщенні вала.

В газовому радіальному підвісі (рис. 2) вал повернувся на кут  $\vartheta = \frac{e_1}{l_0}$  і на ділянках 1, 2 та 3 (рис. 2

б) робочі зазори знаходяться з наступних виразів:

$$h_1 = (c + \sigma)(1 - v \cdot \vartheta \cdot \xi \cdot \cos \varphi); \quad h_2 = (c + \sigma_1)(1 - v_1 \cdot \vartheta \cdot \xi \cdot \cos \varphi);$$

$$h_3 = c \cdot (1 - v_1 \cdot \xi \cdot \cos \varphi), \quad \text{де } v = \frac{c}{c+\sigma}, \quad v_1 = \frac{c}{c+\sigma_1}, \quad \vartheta = \frac{e_1}{l_0}.$$

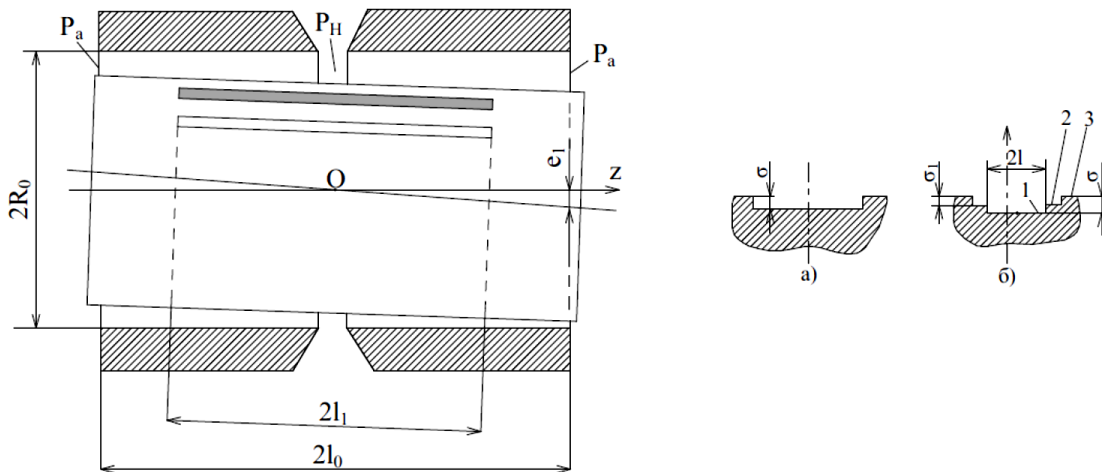


Рис. 2 – Радіальний підвіс з поздовжніми канавками при кутових переміщеннях вала; а) мікроканавки сталої глибини; б) східчасті мікроканавки з максимальною глибиною на лінії подачі стиснутого газу

Згідно науковим часописом [1] запишемо квадрати  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  тиску газу в робочих зазорах радіального підвісу (рис. 2 б):

$$U_1 = a_{01} + b_{01}\xi + \left( a_{11}e^{\lambda\theta\xi} + a_{12}e^{-\lambda\theta\xi} - \frac{3\theta\beta}{\lambda^2 \cdot \theta^2} a_{02} \right) \cdot \cos \varphi, \quad (2)$$

$$U_2 = b_{01} + b_{01}\xi + \left( b_{11}e^{\lambda\theta_1\xi} + b_{12}e^{-\lambda\theta_1\xi} - \frac{3\theta\beta_1}{\lambda^2 \cdot \theta_1^2} b_{02} \right) \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

$$U_3 = d_{01} + d_{01}\xi + \left( d_{11}e^{\lambda\theta\xi} + d_{12}e^{-\lambda\theta\xi} - \frac{3\theta}{\lambda^2} d_{02} \right) \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

де  $\lambda = \frac{l_0}{R_0}$  – відносна довжина підвісу,  $\kappa = \frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2}$  – відносна ширина канавки;  $\chi = 1 - \kappa$ ;  $\eta =$

$$\kappa - \chi v^3; \quad \eta_0 = \chi - \kappa v^3; \quad \theta^2 = \frac{v^3}{\eta \cdot \eta_0}; \quad \eta_1 = \kappa + \chi v_1^3;$$

$\eta_{11} = \chi + \kappa v_1^3$ ;  $\Theta_1^2 = \frac{v_3^3}{\eta_1 \cdot \eta_{11}}$ ; невідомі величини  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $d_{ij}$  ( $i = 0, 1, 2$ ;  $j = 1, 2$ ) залежать від тиску газу

$P_H$ , та розмірів радіального підвісу.

В виразах (2) – (4) дванадцять невідомих величин  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $d_{ij}$  ( $i = 0, 1, 2$ ;  $j = 1, 2$ ) для визначення яких необхідно наступні дванадцять умов:

- граничні умови для тиску газу: при  $\xi = 0$ ,  $U_1 = P_H^2$ ; при  $\xi = \frac{1}{l_0} = \alpha$ ,  $U_1 = U_2$ ; при  $\xi = \frac{l_1}{l_0} = \alpha_1$ ,  $U_2 = U_3$ ; при  $\xi = 1$ ,  $U_3 = 1$ .

- умови нерозривності течії газу на границях ділянок в напрямку осі Z:

при  $\xi = \frac{1}{l_0} = \alpha$ ,  $\Delta Q_{\xi 1} = \Delta Q_{\xi 2}$ ; при  $\xi = \frac{l_1}{l_0} = \alpha_1$ ,  $\Delta Q_{\xi 2} = \Delta Q_{\xi 3}$ ;

де  $P_H^2 = \frac{p_H^2}{\rho a^2}$  – безрозмірний тиск газу, що подається в робочі зазори для роботи підвісу;  $U_1 = \frac{u_1}{\rho a^2}$ ;

$U_2 = \frac{u_2}{\rho a^2}$ ;  $U_3 = \frac{u_3}{\rho a^2}$ .

Знаючи квадрати безрозмірного тиску газу  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  в робочих зазорах на ділянках 1 – 3 (рис. 2),

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= P_H^2 + \chi_7 b_{02} \xi + \vartheta \left( (\lambda \chi_7 - c_2) e^{\lambda \theta \xi} + c_2 e^{-\lambda \theta \xi} - \frac{3\beta}{\lambda^2 \theta^2} \cdot \chi_7 \right) \cdot b_{02} \cdot \cos \varphi ; \\ U_2 &= 1 + b_{02} (c_1 + \xi) + \vartheta \left( c e^{-\lambda \theta_1 \xi} - (B_4 + c B_3) e^{\lambda \theta_1 \xi} - \frac{3\beta_1}{\lambda^2 \cdot \theta_1^2} \right) \cdot b_{02} \cdot \cos \varphi ; \\ U_3 &= 1 - \chi_5 \cdot b_{02} (1 - \xi) + \vartheta \left( c_4 e^{\lambda \xi} + c_3 e^{-\lambda \xi} - \frac{3}{\lambda^2} \cdot \chi_5 \right) b_{02} \cdot \cos \varphi . \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

знаходимо відновлюючий момент радіального газового підвісу при кутових переміщеннях валу:  $M = 4p_a R_0^3 \cdot M^*$ , де  $M^*$  - безрозмірний відновлюючий момент.

$$M^* = \lambda^2 \left( \int_0^\alpha \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_\alpha^{\alpha_1} \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha_1}^1 \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_3} \cos \varphi d\varphi \right). \quad (6)$$

В робочому діапазоні  $\vartheta$  дійсний вираз  $M^* = \vartheta k_\vartheta^*$  [1], де  $k_\vartheta^*$  - похідна  $M^*$  по  $\vartheta$  при  $\vartheta = 0$ , тобто кутлова жорсткість в діапазоні лінійності  $M^*$ .

$$\begin{aligned} \left( \frac{dM^*}{d\vartheta} \right)_{\vartheta=0} &= k_\vartheta^* = \\ &= \lambda^2 \int_0^\alpha \xi d\xi \int_0^\pi \frac{\left( (\lambda \chi_7 - c_2) e^{\lambda \theta \xi} - \frac{3\beta}{\lambda^2 \theta^2} \cdot \chi_7 \right) \cdot b_{02} \cdot \cos^2 \varphi \cdot d\varphi}{2\sqrt{P_H^2 + \chi_7 b_{02} \xi}} + \\ &+ \int_\alpha^{\alpha_1} \xi d\xi \int_0^\pi \frac{\left( -(c B_3 - B_4) e^{\lambda \theta_1 \xi} + c e^{-\lambda \theta_1 \xi} - \frac{3\beta_1}{\lambda^2 \theta_1^2} \right) b_{02} \cdot \cos^2 \varphi \cdot d\varphi}{2\sqrt{1 + (c_1 + \xi) \cdot b_{02}}} \\ &+ \int_\alpha^1 \xi d\xi \int_0^\pi \frac{\left( c_4 e^{\lambda \xi} + c_3 e^{-\lambda \xi} - \frac{3}{\lambda^2} \cdot \chi_5 \right) \cdot b_{02} \cdot \cos^2 \varphi \cdot d\varphi}{2\sqrt{1 - \chi_5 (b_{02} (1 - \xi))}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Безрозмірні витрати газу  $Q^*$  для роботи радіального газового підвісу знаходимо при  $\vartheta = 0$  [1].

$$Q^* = \frac{2(P_H^2 - 1)}{\lambda(1 - \alpha + \frac{\alpha v^3}{\kappa + v^3(1 - \kappa)})}$$

### Висновки

Підвіси з східчастими поздовжніми канавками з більшою глибиною на вході в робочий зазор (рис. 2, б) працездатні [2] в діапазоні практичного використання опор і мають більшу безрозмірну радіальну жорсткість (табл. 1) і більш економічні порівняно з підвісами у яких канавки сталої глибини.

Таблиця 1. Характеристика радіального підвісу з мікроканавками сталої глибини та радіального газового підвісу з двома східчастими мікроканавками різної глибини

Форма мікроканавки		$P_H = 5; \lambda = 2; \alpha = 0,25; \alpha = 0,676$ (максимум функції $K^*/Q^*$ )							
$\alpha_l$	$v$	$v_l$	$\beta$	$K\varepsilon^*$	$Kv^*$	$Q^*$	$\Phi = K^*/Q^*$		
Рис.2, а	Радіальний газовий підвіс з мікроканавками сталої глибини								
	----	0,454	-	0,546	1,184	2,602	46	0,026	
Рис. 2, б	Радіальний газовий підвіс з двома східчастими мікроканавками різної глибини								
	$\alpha_l$	$\alpha$	$v$	$v_l$	$\beta$	$K\varepsilon^*$	$Kv^*$	$Q^*$	$\Phi = K^*/Q^*$
	0,676	0,4	0,48	0,37	0,21	1,80	3,253	46,3	0,039

Безрозмірна кутова жорсткість газового підвісу з східчастими мікроканавками (рис. 2 б) на 25 % більша при оптимальних конструктивних параметрах (максимум функції  $K^*/Q^*$ ) у порівнянні з підвісами у яких канавки сталої глибини (рис. 2 а)

При оптимальних конструктивних параметрах витрати стиснутого газу для роботи підвісів з поздовжніми мікроканавками різного поперечного при  $\varepsilon = 0$  (рис. 2 а, б) практично однакові (різниця біля 7, 8 %), що відповідає наближеним теоретичним розрахункам.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Федотов В. О. Газові підвіси шпindelних вузлів : монографія / В. О. Федотов, І. В. Федотова. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 244 с.
2. Віштак І. В. Вплив східчастих поздовжніх канавок на характеристики радіальних газостатичних опор / І. В. Віштак, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 5 (128). – С. 110.

**Федотов Валерій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів та теоретичної механіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [fedotov\\_va@ukr.net](mailto:fedotov_va@ukr.net).

**Підгорна Олена Володимирівна** – студентка групи БМ-16б, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [2b16b.pidhorna@gmail.com](mailto:2b16b.pidhorna@gmail.com)

**Абрамович Віта Сергіївна** – студентка групи БМ-16б, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [2b16b.abramovych@gmail.com](mailto:2b16b.abramovych@gmail.com)

**Valery O. Fedotov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Resistance and Applied Mechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: [fedotov\\_va@ukr.net](mailto:fedotov_va@ukr.net)

**Olena V. Pidhorna** — Student Faculty of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [2b16b.pidhorna@gmail.com](mailto:2b16b.pidhorna@gmail.com)

**Vita S. Abramovych** — Student Faculty of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [2b16b.abramovych@gmail.com](mailto:2b16b.abramovych@gmail.com)