

Г.Б. Філімоніхін, проф., д-р техн. наук, І.І. Філімоніхіна, ас.,

В.О. Дубовик, доц., канд. техн. наук.

Кіровоградський національний технічний університет

## Ефективність зрівноваження ротора чотирьохмаятниковим автобалансиром з в'язями

Досліджена ефективність зрівноваження ротора чотирьохмаятниковим автобалансиром з в'язями. Знайдені наближені формули для оцінки ефективності. Досліджений вплив на ефективність зміни різних параметрів.

**автобалансування, зрівноваження, автобалансир, відцентрові машини, ротор, рівняння руху**

Для зрівноважування на ходу – під час експлуатації роторів відцентрових машин, барабанів екстракторів, сепараторів, центрифуг тощо застосовуються чотирьохмаятникові автобалансири [1]. Маятники в них чутливі до зміни кутової швидкості обертання ротора, бо під дією тангенціальних складових сил інерції коливаються навколо осей, на які вони насаджені. В [2] запропоновано усувати цей недолік накладанням на рух маятників в'язей, які дозволяють їм попарно повертатися відносно ротора на рівні кути у протилежні боки. В [3], у рамках плоскої моделі ротора і автобалансира складені диференціальні рівняння руху системи. Нижче в рамках цієї моделі досліджується ефективність зрівноваження ротора пристроями.

У рамках прийнятої моделі [3] ротор - симетричний плоский диск маси  $M$ , насаджений з ексцентриситетом  $e$  на абсолютно твердий вал, перпендикулярний його площини. Маятники - невагомні стрижні довжини  $l$ , що несуть на своєму кінці зосереджені маси  $m$ . Вони насаджені на чотири осі, симетрично розташовані щодо вала ротора на відстані  $a$  (рис. 1). Маятники можуть бути вибудовані уздовж двох взаємно перпендикулярних прямих  $U, V$ , жорстко зв'язаних з ротором. Під час руху маятники 1, 2 (3, 4) повертаються відносно ротора на рівні кути  $\varphi$  ( $\psi$ ) у протилежні сторони. При повороті маятника навколо осі на нього діє момент сил в'язького опору  $H_1\varphi'$  ( $H_1\psi'$ ), тут штрих над величиною означає похідну за часом  $t$ . При нерухомому роторі вал сполучений з віссю обертання. У процесі руху вал, на малюнку точка  $O$ , відхиляється від осі обертання, точки  $K$ , і на нього починають діяти оновлююча сила  $-c\vec{r}_0$ , і сила в'язького опору середовища  $-H_2\vec{v}_0$ , тут  $\vec{r}_0 = \overline{KO}$ ,  $\vec{v}_0 = \vec{r}'_0$ . Положення вала визначається координатами  $x, y$  відносно рухомих осей  $X, Y$ , що виходять із точки  $K$  і рівнобіжні осям  $U, V$ .

Диференціальні рівняння руху системи у безрозмірному вигляді мають вигляд [3]:

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} - 2R_\omega\dot{\eta} - R_\omega^2\xi - R_m[\ddot{\psi}\cos\psi + 2R_\omega\dot{\varphi}\cos\varphi - \dot{\psi}^2\sin\psi - R_\omega^2(\sin\psi - u_0)] + H(\ddot{\xi} - R_\omega\dot{\eta}) + \xi &= 0, \\ \ddot{\eta} + 2R_\omega\dot{\xi} - R_\omega^2\eta + R_m[\ddot{\varphi}\cos\varphi - 2R_\omega\dot{\psi}\cos\psi - \dot{\varphi}^2\sin\varphi - R_\omega^2(\sin\varphi - v_0)] + H(\dot{\eta} + R_\omega\dot{\xi}) + \eta &= 0, \\ \ddot{\varphi} + h\dot{\varphi} + R_aR_\omega^2\sin\varphi + (\ddot{\eta} + 2R_\omega\dot{\xi} - R_\omega^2\eta)\cos\varphi &= 0, \\ \ddot{\psi} + h\dot{\psi} + R_aR_\omega^2\sin\psi - (\ddot{\xi} - 2R_\omega\dot{\eta} - R_\omega^2\xi)\cos\psi &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В рівняннях (1)

$$R_\omega = \frac{\omega}{\omega_0}, R_m = \frac{2m}{M_\Sigma}, R_a = \frac{a}{l}, h = \frac{H_1}{\omega_0 m l^2}, H = \frac{H_2}{M_\Sigma \omega_0}, u_0 = \frac{M e \cos \gamma}{2 m l}, v_0 = -\frac{M e \sin \gamma}{2 m l} \quad (2)$$

- незалежні безрозмірні параметри, які визначають динаміку системи, і при їх введенні використані такі позначення:

-  $M_\Sigma = M + 4m$  - маса всієї системи;

-  $\omega_0 = \sqrt{c/M_\Sigma}$  - частота власних коливань ротора при відсутності обертання, сил опору і при нерухомих маятниках (резонансна частота);

-  $\xi = x/l, \eta = y/l$  - безрозмірні змінні.

Також в (1) точка над величиною позначає похідну за безрозмірним часом  $\tau = \omega_0 t$ .

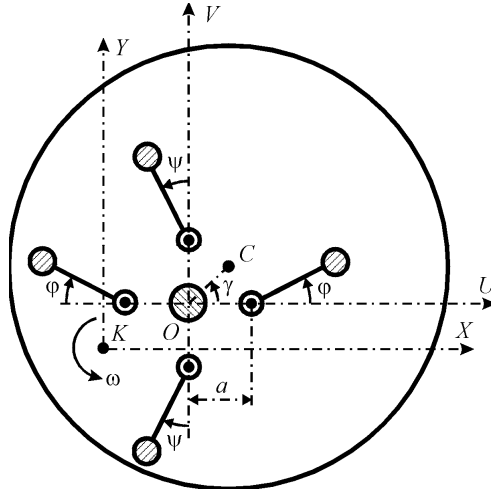


Рисунок 1 – Модель ротора і чотирьохмаятникового автобалансира з в'язями

Якщо рух системи встановився, то похідні дорівнюють нулю і рівняння усталених рухів системи приймають вигляд

$$(1 - R_\omega^2)\xi - HR_\omega\eta + R_m R_\omega^2 \sin \psi = R_m R_\omega^2 u_0, \quad HR_\omega\xi + (1 - R_\omega^2)\eta - R_m R_\omega^2 \sin \varphi = R_m R_\omega^2 v_0, \\ R_a \operatorname{tg} \varphi = \eta, \quad R_a \operatorname{tg} \psi = -\xi. \quad (3)$$

Розв'яжемо наближено систему (3). Вважаємо, що  $|\varphi| < \pi/4, |\psi| < \pi/4$  (умови відсутності співударів між маятниками). Тоді:

$$\operatorname{tg} \varphi(\psi) = \sin \varphi(\psi) + \frac{\sin^3 \varphi(\psi)}{2} + \dots \approx \sin \varphi(\psi); \quad \sin \varphi \approx \frac{\eta}{R_a}, \quad \sin \psi \approx -\frac{\xi}{R_a}. \quad (4)$$

Підставляючи це в перші два рівняння системи (3), одержуємо

$$[1 - R_\omega^2(1 + R_m/R_a)]\xi - HR_\omega\eta = R_m R_\omega^2 u_0, \quad HR_\omega\xi + [1 - R_\omega^2(1 + R_m/R_a)]\eta = R_m R_\omega^2 v_0. \quad (5)$$

Звідси знаходимо квадрат відхилення вала від осі обертання

$$\xi^2 + \eta^2 = \left(\frac{r}{l}\right)^2 = \frac{R_m^2 R_\omega^4}{[1 - R_\omega^2(1 + R_m/R_a)]^2 + H^2 R_\omega^2} (u_0^2 + v_0^2). \quad (6)$$

При непрацюючому автобалансирі ( $\varphi = \psi = 0$ ) з перших двох системи (3) знаходимо

$$\xi_0^2 + \eta_0^2 = \left(\frac{r_0}{l}\right)^2 = \frac{R_m^2 R_\omega^4}{(1 - R_\omega^2)^2 + H^2 R_\omega^2} (u_0^2 + v_0^2). \quad (7)$$

Тоді ефективність роботи автобалансира можна визначити як

$$n = \frac{r_0}{r} = \left( \frac{(1 - R_\omega^2)^2 + H^2 R_\omega^2}{[1 - R_\omega^2(1 + \rho)]^2 + H^2 R_\omega^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \rho = R_m / R_a. \quad (8)$$

Величина  $1/n$  показує, в скільки разів зменшиться відхилення вала від осі обертання при роботі автобалансира. Вона залежить всього від трьох незалежних безрозмірних параметрів  $R_\omega, \rho, H$ .

Розглядаючи нерівність  $n < 1$  знаходимо, що застосування автобалансира може бути ефективним на швидкостях

$$|R_\omega| > R_\omega^*, \quad R_\omega^* = 1/(1 + \rho/2). \quad (9)$$

Слід відмітити, що умова (9) є необхідною умовою ефективності роботи АБП. Відповідно до неї АБП буде зрівноважувати ротора навіть на швидкостях, дещо менших за резонансну частоту  $R_\omega \in (R_\omega^*, 1)$ . Для одержання достатніх умов ефективності роботи АБП необхідно дослідити умови існування і стійкості всіх ustalених рухів системи. При цьому для ефективності роботи АБП необхідно і достатньо, щоб [1]:

- а) існував основний рух системи – при якому вона найбільше зрівноважена;
- б) серед всіх ustalених рухів основний рух був стійким, а решта – нестійкими.

Якщо ротор швидко обертається, то  $R_\omega \gg 1$  і

$$n \rightarrow 1/(1 + \rho). \quad (10)$$

Таким чином ефективність роботи АБП обмежена граничною величиною (10). Для підвищення ефективності роботи автобалансира потрібно збільшувати  $\rho$  (відношення параметрів  $R_m / R_a$ ).

На рис. 2 побудовано графіки залежності  $n = n(R_\omega)$  для:

$M = 5$  кг,  $m = 1$  кг,  $h = 0$  (відсутні сили опору) і  $l = 18$  см,  $a = 2$  см - крива 1,  $l = 15$  см,  $a = 2,5$  см - крива 2,  $l = 12$  см,  $a = 3$  см - крива 3.

На рис. 3 побудовано графіки залежності  $n = n(R_\omega)$  для:  $l = 18$  см,  $a = 2$  см,  $M = 5$  кг,  $m = 1$  кг і  $h = 0,3$  - крива 1,  $h = 0,6$  - крива 2,  $h = 1$  - крива 3.

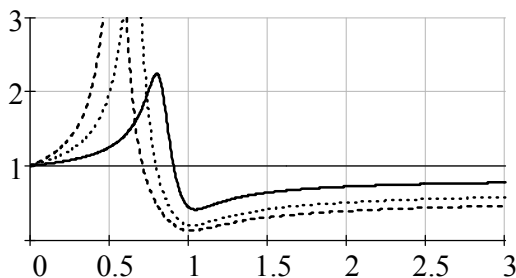


Рисунок 2 – Залежність  $n$  від зміни  $\rho$

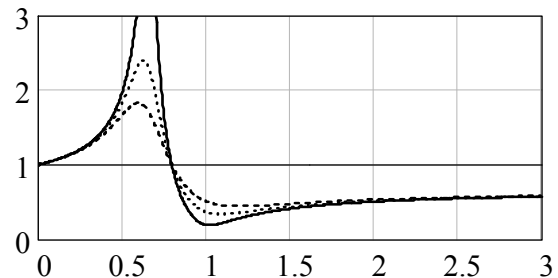


Рисунок 3 – Залежність  $n$  від зміни  $h$

З формули (9) і рисунків 2,3 можна зробити такі висновки:

- для підвищення ефективності роботи автобалансира потрібно збільшувати відношення параметрів  $R_m/R_a$  ;
- при відсутності сил опору гранична величина (9) визначає найнижчу ефективність роботи автобалансира на зарезонансних швидкостях;
- при відсутності сил опору на дорезонансних швидкостях відхилення вала прямує до нескінченності, а в околі зарезонансної швидкості відхилення вала від осі обертання вала повністю усувається;
- при наявності сил опору на дорезонансних швидкостях відхилення вала від осі обертання вала обмежені, а в околі зарезонансної швидкості пристрій повністю не усуває відхилення вала.

## Список літератури

1. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами: Монографія (за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин). - Кіровоград: КНТУ, 2004. - 352 с.
2. Гусаров А.А., Сусанин В.И., Шаталов Л.Н., Грушин Б.М. Автоматическая балансировка роторов машин. -М.: Наука, 1979. -151 с.
3. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. -М.: Наука, 2002. -119 с.
4. Автобалансирующее устройство: А.с. 1795319 СССР, МКИ G 01M 1/38 / Г.Б. Филимоныхин (СССР). - № 4770688/28, Заявл. 09.11.89; Опубл. 15.02.93, Бюл. № 6.
5. Филимоныхин Г.Б., Чайковский А.Б., Майоров В.М. Плоская модель ротора, уравновешиваемого маятниковым автобалансиром со связями // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин», 2000. Вип.№29, С.109-117.

Исследована эффективность уравновешивания ротора четырехмаятниковым автобалансиром с связями. Получены приближенные формулы для оценки эффективности. Исследовано влияние на эффективность изменения разных параметров.

Efficiency of balancing of rotor a fours pendulum autoequalizer is probed with vyazi. Close formulas are got for the estimation of efficiency. Influence is probed on efficiency of change of different parameters.