

УДК 62–752+62–755

В.В. Гончаров, доц., канд фіз.-мат. наук

Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна

Мінімізація тривалості перебігу перехідних процесів роторної машини з автобалансиром і нерухомою точкою

Аналітично досліджено тривалість перебігу перехідних процесів при настанні автобалансування в роторній машині, в якій ротор поміщений з можливістю обертатися навколо власної поздовжньої осі в корпус з нерухомою точкою і зрівноважується автобалансиром з багатьма корегувальними вантажами.

Показано, що тривалість перебігу перехідних процесів при настанні автобалансування зменшується при:

- збільшенні маси корегувальних вантажів, видовженості складеного ротора, швидкості обертання ротора (на великих крейсерських швидкостях);
- зменшенні швидкості обертання ротора (на малих крейсерських швидкостях).

Тривалість перебігу перехідних процесів суттєво зменшується при наближенні: видовженості складеного ротора до свого максимально допустимого значення; швидкості обертання ротора до резонансної швидкості.

ротор, корпус, дисбаланс, автобалансир, перехідні процеси, мінімізація

В.В. Гончаров, доц., канд. фіз.-мат. наук

Кировоградский национальный технический университет, г. Кировоград, Украина

Минимизация продолжительности протекания переходных процессов роторной машины с автобалансиром и неподвижной точкой

Аналитически исследована продолжительность протекания переходных процессов при наступлении автобалансировки в роторной машине, в которой ротор помещен с возможностью вращения вокруг собственной продольной оси в корпус с неподвижной точкой и уравнивается автобалансиром со многими корригирующими грузами.

Показано, что продолжительность протекания переходных процессов при наступлении автобалансировки уменьшается при:

- увеличении: массы корригирующих грузов; удлиненности составного ротора; скорости вращения ротора (на больших крейсерских скоростях);
- уменьшении скорости вращения ротора (на малых крейсерских скоростях).

Продолжительность протекания переходных процессов существенно уменьшается при приближении: удлиненности составного ротора к своему максимально допустимому значению; скорости вращения ротора к резонансной скорости.

ротор, корпус, дисбаланс, автобалансир, переходные процессы, минимизация

Вступ. Ротори багатьох відцентрових машин – екстракторів, сепараторів, центрифуг, осьових вентиляторів і ін. – встановлені в корпус з можливістю обертатися, а уже корпус закріплений пружно-в'язко і здійснює неплоский рух. В цих машинах дисбаланс ротора змінюється в процесі виконання технологічних операцій, тому його доцільно зрівноважувати на ходу пасивними автобалансирами (АБ) [1,2].

Постановка проблеми. На даний момент практично немає робіт, в яких аналітично досліджуються перехідні процеси (ПП) при настанні автобалансування роторних машин з АБ та оцінюється час приходу корегувальних вантажів (КВ) в положення, в яких вони зрівноважують дисбаланс роторної машини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш повний огляд літератури по пасивному автобалансуванню роторів наведений в [2]. Врахування цього огляду, більш пізніх публікацій і робіт [3–11] показує, що на сьогодні практично немає робіт, в яких аналітично досліджується ПП при автобалансуванні роторних машин, які здійснюють просторовий рух і мають нерухому точку (визначаються тільки умови настання автобалансування у вигляді критичних швидкостей, при переході через які настає або пропадає автобалансування).

В роботі [13] з використанням методу, запропонованого в [12], отримані корені характеристичного рівняння, за якими можна проводити оцінку тривалості перебігу ПП при настанні автобалансування роторної машини, яка має нерухому точку, з АБ із багатьма КВ.

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналітична мінімізація тривалості перебігу ПП на основі отриманих в [13] коренів характеристичного рівняння для роторної машини, яка має нерухомою точкою, з одним АБ із багатьма КВ.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються наступні задачі:

- отримується вираз, який залежить від трьох безрозмірних параметрів роторної машини і описує найменшу тривалість її ПП;
- досліджується вплив кожного з цих параметрів на тривалість ПП.

Виклад основного матеріалу.

1. Опис теоретико-механічної моделі роторної машини.

Осесиметричний ротор масою m_r встановлений в корпусі масою m_c і обертається відносно корпусу з постійною кутовою швидкістю ω навколо власної подовжньої осі, яка є його головною центральною віссю інерції (рис. 1). Корпус утримують опори: шарнірна – в точці O , завдяки якій ротор має нерухому точку O на поздовжній осі; дві пружні-в'язкі, властивості яких характеризують відповідні числа – k і b .

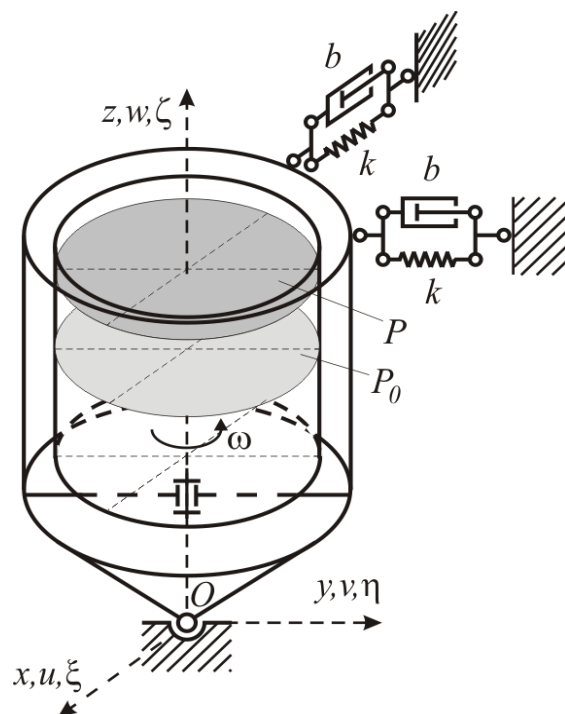


Рисунок 1 – Ротор з АБ в корпусі з нерухомою точкою

Джерело: побудовано автором на підставі [13, С. 73]

Рух ротора описується трьома системами осей: нерухомою – $Oxyz$; рухомими – $Guvw$ і $G\xi\eta\zeta$, жорстко зв'язаними відповідно з корпусом і ротором. У вихідному положенні всі три системи співпадають. Вісь Oz спрямована уздовж осі обертання ротора. У площині P_0 ($z = d_0 > 0$) розташований статичний дисбаланс s_0 (рис. 1). У площині P ($z = d > 0$) ротор врівноважує АБ, який складається з n КВ (маятників, куль або циліндричних роликів).

Відносно системи осей $Ouvw$ тензори інерції ротора і корпусу мають вигляд $\mathbf{J}_r = \text{Diag}(A_r, A_r, C_r)$, $\mathbf{J}_c = \text{Diag}(A_c, A_c, C_c)$.

Як це прийнято в теорії пасивних АБ [1-13], дією сил тяжіння нехтуємо і вважаємо, що КВ не заважають рухатися один одному і, у випадку куль або роликів, мають радіуси набагато менше радіуса їх бігових доріжок. Маса КВ, а також сили в'язкого опору опору і сили, які протидіють відносному руху КВ вважаються малими величинами.

Відносному руху i -ої кулі або ролика (маятника) ($i = \overline{1, n}$) в АБ перешкоджає ньютонівська сила (момент сил) в'язкого опору, яка(ий) пропорційна(ий) b – коефіцієнту сил (моменту сил) в'язкого опору.

В роботі [13] показано, що перебіг ПП описується коренями $\lambda_{1,2}$ і $\lambda_{3,4}$ характеристичних рівнянь відповідно першого і нульового наближення відносно малого параметра \tilde{m} :

$$\lambda_{1,2} = -(1 \pm p)\tilde{m}/\tilde{b} \cdot \tilde{\omega}^4 / [(1 - \tilde{C})\tilde{\omega}^2 - 1], \quad \lambda_{3,4} = -\tilde{b}, \quad (1)$$

де $\tilde{\omega} = \omega/\omega_0$, $\tilde{C} = C_r/A$, $\tilde{m} = mn/[2k(m_c + m)]$, $\tilde{b} = b/(mk\omega_0)$, $\omega_0 = \sqrt{k/A}$, $A = A_c + A_r$;

p – параметр АБ, який на встановленому русі при більше двох КВ в АБ є випадковою величиною і при фіксованих масо-інерційних параметрах роторної машини може приймати будь-яке значення на області $[0; 1]$, яке визначається поточним розташуванням КВ в АБ на встановленому русі з сім'ї таких рухів;

k – коефіцієнт, який характеризує кінетичну енергію обертального руху КВ.

2. Мінімізація тривалості перебігу ПП роторної машини

Тривалість перебігу ПП визначається найбільшою дійсною частиною коренів (1), тобто значенням $\lambda_m = \max(\text{Re}\lambda_i)$, $i = \overline{1, 4}$. Вона буде тим меншою чим менше значення λ_m .

З (1) слідує, що

$$\lambda_m = \begin{cases} -\tilde{b}_{\text{кр}}^2/\tilde{b}, & \text{при } \tilde{b} \geq \tilde{b}_{\text{кр}}, \\ -\tilde{b}, & \text{при } \tilde{b} < \tilde{b}_{\text{кр}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{де } \tilde{b}_{\text{кр}} = \sqrt{\tilde{m}(1-p)/[(1-\tilde{C})\tilde{\omega}^2-1]\tilde{\omega}^2}. \quad (3)$$

З (2) слідує, що $\min \lambda_m = -\tilde{b}_{\text{кр}}$, тому задача мінімізації тривалості перебігу ПП зводиться до дослідження параметра $\tilde{b}_{\text{кр}}$ на найбільше значення. Оскільки параметр p при більше 2-х КВ в АБ не є конструктивним параметром (до початку роботи роторної машини йому не можна надати певного фіксованого значення), то вираз $\tilde{b}_{\text{кр}}$ є функцією трьох безрозмірних параметрів $\tilde{\omega}$, \tilde{C} , \tilde{m} , які можна корегувати. Визначимо вплив

кожного з цих параметрів на вираз $\tilde{b}_{кр}$ і знайдемо максимальне значення $\tilde{b}_{кр}$.

2.1. Вплив маси КВ (\tilde{m}) на тривалість перебігу ПП

З (3) слідує що, параметр $\tilde{b}_{кр}$ є монотонно зростаючим по \tilde{m} , тому тривалість перебігу ПП буде найменшою при найбільшому значенні параметру \tilde{m} , при якому його ще можна вважати малою величиною.

2.2. Вплив видовженності (\tilde{C}) складеного ротора на тривалість перебігу ПП

З (3) слідує, що область визначення параметра \tilde{C} - $\tilde{C} \in (0; 1-1/\tilde{\omega}^2)$ і параметр $\tilde{b}_{кр}$ є монотонно зростаючим по \tilde{C} .

Тому тривалість перебігу ПП тим менша, чим коротший ротор, і вона суттєво зменшується при наближенні параметра \tilde{C} до свого максимального допустимого значення - $\tilde{C} \rightarrow 1-1/\tilde{\omega}^2$ (при цьому крейсерська швидкість наближається до резонансної швидкості).

2.3. Вплив швидкості обертання ($\tilde{\omega}^2$) складеного ротора на тривалість перебігу ПП

З (3) слідує, що

$$(\tilde{b}_{кр})'_{\tilde{\omega}^2} = \sqrt{\tilde{m}(1-p)} / 2 \cdot [(1-\tilde{C})\tilde{\omega}^2 - 2] / \sqrt{[(1-\tilde{C})\tilde{\omega}^2 - 1]^3},$$

тобто вираз $\tilde{b}_{кр}$ має максимум при $\tilde{\omega}^2 = 2/(1-\tilde{C}) = \tilde{\omega}_b^2$ і

$$(\tilde{b}_{кр})'_{\tilde{\omega}^2} > 0 \text{ при } \tilde{\omega}^2 > \tilde{\omega}_b^2 \text{ та } (\tilde{b}_{кр})'_{\tilde{\omega}^2} < 0 \text{ при } \tilde{\omega}^2 < \tilde{\omega}_b^2.$$

Таким чином, тривалість перебігу ПП: а) зменшується при збільшенні швидкості обертання ротора (на великих крейсерських швидкостях - $\tilde{\omega}^2 > \tilde{\omega}_b^2$); б) суттєво зменшується при зменшенні швидкості обертання ротора і наближенні її до резонансної швидкості - $\tilde{\omega}^2 \rightarrow \tilde{\omega}_{рез}^2 = 2/(1-\tilde{C})$ (на малих крейсерських швидкостях - $\tilde{\omega}_{рез}^2 < \tilde{\omega}^2 < \tilde{\omega}_b^2$).

Висновки. В результаті досліджень встановлено, що тривалість перебігу ПП:

- зменшується при: збільшенні маси КВ; збільшенні видовженності ротора; зростанні швидкості обертання ротора (на великих крейсерських швидкостях); спаданні швидкості обертання ротора (на малих крейсерських швидкостях).

- суттєво зменшується при: наближенні видовженності складеного ротора до свого максимально допустимого значення; наближенні швидкості обертання ротора до резонансної швидкості.

Список літератури

1. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия [Текст] / А.А. Гусаров – М.: Наука, 2002. – 119 с.
2. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами [Текст] / Г.Б. Філімоніхін. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352 с.
3. Нестеренко В.П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы [Текст] / В.П. Нестеренко – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. – 84 с.
4. Sperling L. Self-synchronization and automatic balancing in rotor dynamics [Текст] / L. Sperling, F. Merten, H. Duckstein // Int. J. Rotating Machinery. – 2000. – V. 6. – № 4. – P. 275–285.
5. Sperling L. Simulation of two-plain automatic balancing of a rigid rotor [Текст] / L. Sperling, B. Ryzhik,

- Ch. Linz, H. Duckstein // *Mathematics and Computers in Simulation* – 2002. – V. 58. – № 4–6, – P. 351–365.
6. Sperling L. Single-Plane Auto-Balancing of Rigid Rotors [Текст] / L. Sperling, B. Ryzhik, H. Duckstein // *Technische Mechanik*. – 2004. – V. 24. – № 1. – P. 1–24.
 7. Green K. Bifurcation analysis of an automatic dynamic balancing mechanism for eccentric rotors [Текст] / K. Green, A.R. Champneys, N.J. Lieven // *Journal of Sound and Vibration*, Volume 291, Issues 3–5, 4 April 2006, Pages 861–881.
 8. Lu Chung-Jen. [Analytical study of the stability of a two-ball automatic balancer](#) [Текст] / Lu Chung-Jen, Wang Ming-Cheng, Huang Shih-Hsuan. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – V. 23. – Iss. 3. – P. 884–896.
 9. Bolton J.N. Single- and dual-plane automatic balancing of an elastically mounted cylindrical rotor with considerations of coulomb friction and gravity: Diss. ... degree of Dr. of Philosophy in Engineering Mechanics [Текст] / J.N. Bolton – Blacksburg, Virginia, 2010. – 317 p.
 10. Rodrigues D.J. [Two-plane automatic balancing: A symmetry breaking analysis](#) [Текст] / D.J. Rodrigues, A.R. Champneys, M.I. Friswell, R.E. Wilson // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2011. – V. 46. – Iss. 9. – P. 1139–1154.
 11. Mousa Rezaee, Reza Fathi. Improving the working performance of automatic ball balancer by modifying its mechanism [Текст] / Mousa Rezaee, Reza Fathi. // *Journal of Sound and Vibration*, Available online 29 August 2015.
 12. Філімоніхін Г.Б. Методика складання диференціальних рівнянь руху роторних систем з автобалансирами і її застосування до системи ротор – масивний корпус – автобалансир [Текст] / Г.Б. Филимонихин, В.В. Гончаров // *Збірник наукових праць КНТУ*. – 2009. – Вип. 22. – С. 357–363.
 13. Филимонихин Г.Б. Уравновешивание автобалансиrom ротора в упруго-вязко закрепленном корпусе с неподвижной точкой [Текст] / Г.Б. Филимонихин, В.В. Гончаров // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014, т. 324, № 2, С. 71–77.

Valery Honcharov, Assos. Prof., PhD phys. & math.

Kirovograd National Technical University, Kirovograd, Ukraine

Minimizing of the duration of the transient processes of rotor machine with auto balancer and a fixed point

The passive auto-balancers used for balancing many rotors. At the moment, virtually no studies of transition processes upon the occurrence of auto-balancing of rotating machines with auto-balancers.

In this paper the duration of the transient processes at the occurrence of auto-balancing in rotor machine in which the rotor is placed with the possibility to rotate around its longitudinal axis in the corps with a fixed point and is balanced by auto-balancer with many corrective loads is analytically investigated.

It is shown that the duration of the transition processes at the occurrence of auto-balancing is reduced when: the weight of corrective loads, elongation of composite rotor, rotor speed (at high cruising speeds) are increased; reducing of the rotor speed (at low cruising speeds). The duration of the transient processes is significantly reduced when approaching: of elongation of composite rotor to its maximum permissible value; of rotor speed to a resonance speed.

rotor, corps, imbalance, auto-balancer, transition processes, minimizing

Одержано 09.10.15