

УДК 621.317

А.В. Поджаренко, О.Г. Ігнатенко, І.В. Коломійчук
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
кафедра метрології та промислової автоматики
E-mail: innakolomijchuk@i.ua

БЕЗКОНТАКТНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ КОНУСНОГО РОТОРУ В ГАЗОМАГНІТНОМУ ПІДВІСІ

Abstract

Podjarenko A.V., Ignatenko O.G., Kolomiychuk I.V. Noncontact determination of moment of inertia cone rotor in gaseous magnetic suspension. In this article researches are directed on determination of moment of inertia cone rotor in gaseous magnetic suspension.

Keywords: *angulator, moment of inertia, cone rotor, axis of rotation, corner of turn of rotor.*

Анотація

Поджаренко А.В., Ігнатенко О.Г., Коломійчук І.В. Безконтактне визначення моменту інерції конусного ротору в газомagnetному підвісі. В цій статті дослідження направлені на безконтактне визначення моменту інерції конусного ротора в газомagnetному підвісі.

Ключові слова: *кутова швидкість, момент інерції, конусний ротор, вісь обертання, кут повороту ротора.*

Аннотация

Поджаренко А.В., Игнатенко О.Г., Коломийчук И.В. Бесконтактное определение момента инерции конусного ротора в газомagnetном подвесе. В этой статье исследования направлены на бесконтактное определение момента инерции конусного ротора в газомagnetном подвесе.

Ключевые слова: *угловая скорость, момент инерции, конусный ротор, ось вращения, угол поворота ротора.*

Постановка задачі.

Розробка алгоритму визначення моменту інерції на основі кутової швидкості роторної системи з використанням мікропроцесорної техніки

Аналіз стану досліджень та публікацій.

Вирішенню задачі безконтактного визначення моменту інерції конусного ротора в газомagnetному підвісі приділено багато уваги [4–9].

Формування цілей статті.

На основі вище сказаного, метою статті є розробка нового методу визначення моменту інерції конусного ротора в газомagnetному підвісі.

Викладення основного матеріалу.

Момент інерції роторної системи визначають розрахунковим методом по геометричним параметрам [1] або методом, який передбачає послідовне закріплення на роторі різних по величині контрольних мас, які зміщують центр ваги ротора, відносно осі симетрії на різну величину і визначення моменту інерції порівняльним аналізом цих зміщень [2].

Проте вимірюване зміщення центру ваги ротора проходить під дією його дисбалансу, причому таке зміщення є змінною величиною, яка залежить від величини статичного дисбалансу і кутової швидкості ротора [3].

Кутова швидкість конусного гістерезисного ротора, який обертається в газоманітному підвісі відносно осі 0ξ системи координат $0\xi\eta\zeta$, може визначатись з диференціального рівняння руху [1].

$$\dot{\omega}_\xi = \frac{M_D}{J_{G\xi}} + \frac{S}{J_{G\xi}} \left(\sum_{n=1}^k F_{sn} \cos\varphi - \sum_{n=1}^k F_{sn} \sin\varphi \right), \quad (1)$$

де $J_{G\xi}$ — момент інерції ротора відносно осі обертання, M_D — обертовий момент, s — радіальна складова прикладених до ротора сил, — радіальне зміщення ротора, під дією прикладених до нього сил, $\varphi = \omega t$ — кут повороту ротора, t — час обертання ротора.

Обертальний момент для конусного ротора (для ідеального гістерезисного електродвигуна без урахування сили опору) визначається у вигляді:

$$M_D = \frac{\mu_0 m_\phi k_{o\phi} w_{o\phi} H_c p_e L_H I_\phi}{4\sqrt{2}\pi h_M} \left[\frac{h_R}{\cos \chi} (R_0 + R_1) - \left(\frac{h_R}{\cos \chi} \right)^2 \right] \quad (2)$$

де μ_0 — магнітна стала, m_ϕ — число фаз обмотки, $k_{o\phi}$ — обмотковий коефіцієнт, $w_{o\phi}$ — кількість витків в обмотці, H_c — коерцитивна сила матеріалу ротора, p_e — число пар сів, L_H — висота конусного ротору, S_r — площа робочої поверхні ротора, h_M — магнітний люз, h_R — товщина активного шару ротора, I_ϕ — струм статора (фазний), R_0 і R_1 — радіуси великої і маленької основи зрізаного конуса ротора, χ — кут конусності ротора.

Інтегруючи рівняння (1) з врахуванням (2) в інтервалі $[0, t]$ знайдемо кутову швидкість відносно осі обертання.

$$\omega = \frac{\mu_0 m_\phi k_{o\phi} w_{o\phi} H_c p_e L_H I_\phi t}{4\sqrt{2}\pi h_M J_{Gz}} \left[\frac{h_R}{\cos \chi} (R_0 + R_1) - \left(\frac{h_R}{\cos \chi} \right)^2 \right] + \frac{S}{2\omega J_{Gz}} (N_s - F_s + F_{is}) \sin 2\omega t \quad (3)$$

де s — радіальне зміщення ротора, N_s — радіальна складова газової сили піднімання, F_s — радіальна складова електромагнітної сили притягання ротора до статора, F_{is} — радіальна складова сили інерції.

З формули (3) випливає, що кутова швидкість є адитивною величиною, причому перша її складова

$$\omega_c = \frac{\mu_0 m_\phi k_{o\phi} w_{o\phi} H_c p_e L_H I_\phi t_p}{4\sqrt{2}\pi h_M J_{Gz}} \left[\frac{h_R}{\cos \chi} (R_0 + R_1) - \left(\frac{h_R}{\cos \chi} \right)^2 \right] \quad (4)$$

є синхронною кутовою швидкістю (t_p — час розгону до синхронної швидкості), а друга складова

$$\omega_k = \frac{S}{2\omega J_{Gz}} (N_s - F_s + F_{is}) \sin 2\omega t \quad (5)$$

є кутовою швидкістю крутильних коливань ротора, частота яких вдвічі перевищує частоту обертання.

Інтегруючи рівняння (3) в інтервалі $[0, t]$ знайдемо кут повороту ротора:

$$\varphi = \frac{\mu_0 m_\phi k_{o\phi} w_{o\phi} H_c p_e L_H I_\phi t^2}{8\sqrt{2}\pi h_M J_{Gz}} \left[\frac{h_R}{\cos \chi} (R_0 + R_1) - \left(\frac{h_R}{\cos \chi} \right)^2 \right] - \frac{S}{4\omega^2 J_{Gz}} (N_s - F_s + F_{is}) \cos 2\omega t \quad (6)$$

де доданок

$$\varphi_c = \frac{\mu_0 m_\phi k_{o\phi} w_{o\phi} H_c p_e L_H I_\phi t_p^2}{8\sqrt{2}\pi h_M J_{Gz}} \left[\frac{h_R}{\cos \chi} (R_0 + R_1) - \left(\frac{h_R}{\cos \chi} \right)^2 \right] \quad (7)$$

характеризує кут повороту при розгоні ротора, а доданок

$$\varphi_k = -\frac{S}{4\omega^2 J_{Gz}} (N_s - F_s + F_{is}) \cos 2\omega t \quad (8)$$

характеризує крутильні коливання ротора відносно осі 0ξ .

Після розгону ротора ідеального гістерезисного двигуна до синхронної кутової швидкості обертальний момент $M_D = 0$, і рівняння (6) приймає вигляд

$$\varphi = \omega_c t - \frac{S}{4\omega^2 J_{Gz}} (N_s - F_s + F_{is}) \cos 2\omega t \quad (9)$$

де $\omega_c = const$ і є синхронною кутовою швидкістю.

Із (9) слідує, що при русі ротора, який встановився, його крутильні коливання визначаються величиною радіального зміщення, моментом інерції і кутовою швидкістю ротора, а також прикладеними до ротора силами, які визначають його радіальне зміщення. З цього випливає, що вимірюючи кут відхилення ротора при крутильних коливаннях, можна визначити момент інерції ротора.

З (8) знаходимо:

$$J_{Gz} = -\frac{s}{4\omega^2 \varphi_k} (N_s - F_s + F_{is}) \cos(2\omega t) \tag{10}$$

Величина радіального зміщення ротора

$$s = \varepsilon + \lambda_1 \tag{11}$$

де ε — ексцентриситет маси ротора.

Величина λ в (11), яка визначається взаємодією сили інерції і сили опору, може бути знайдена з рівняння [5,6]

$$C_s \lambda = m(\varepsilon + \lambda)\omega^2 - 2\delta_s \frac{d\lambda}{dt} \tag{12}$$

де $C_s^2 = \Omega_s m$ — радіальна жорсткість підвісу ротора, Ω_s — власна частота системи в радіальному напрямку, m — маса ротора, δ_s — коефіцієнт демпфірування.

Розв'язуючи диференціальне рівняння (12), знаходимо

$$\lambda = \frac{\varepsilon \omega^2}{\Omega_s^2 - \omega^2} \left(1 - e^{-\frac{\Omega_s^2 - \omega^2}{2\delta_s} t} \right) \tag{13}$$

На рисунку 1 представлена залежність величини λ від кутової швидкості і часу для діапазону $0 \leq \omega \leq \Omega_s$ (рис. 1а) і для діапазону $0 \leq \omega \leq \Omega_s$ (б).

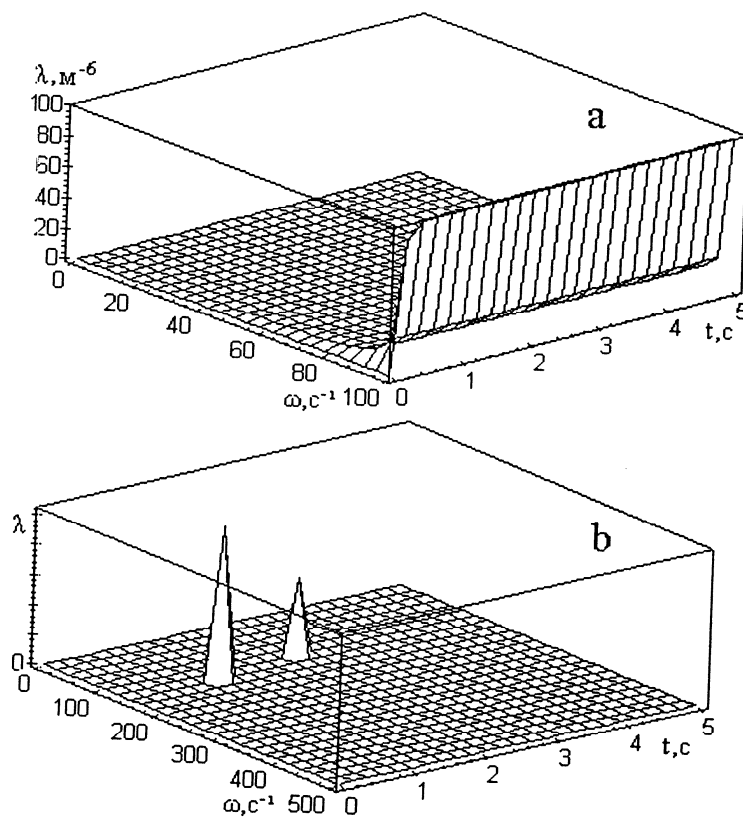


Рисунок 1 — Залежність інерційного зміщення λ від кутової швидкості і часу для діапазону $0 \leq \omega \leq \Omega_s$ (а) і для діапазону $0 \leq \omega \leq \Omega_s$ (б).

З (11) з врахуванням (13) знаходимо:

$$s = \frac{\varepsilon\Omega_s^2}{\Omega_s^2 - \omega^2} \left(1 - e^{-\frac{\Omega_s^2 - \omega^2}{2\delta_s} t} \right) \quad (14)$$

Визначимо власну частоту Ω_s системи, як резонансну (критичну) циклічну частоту обертання. Тоді, вимірюючи одночасно радіальне зміщення [7,8] і кутову швидкість ротора, знайдемо Ω_s як кутову швидкість при максимальному радіальному зміщенні $s = s_{max}$.

В цих же працях [7,8] описано безконтактний метод визначення положення осі обертання ротора і її зміщення по відношенню до осі симетрії, що з врахуванням (14) однозначно визначає ексцентриситет маси ε .

Відповідно [9,10] коефіцієнт демпфірування визначаємо у вигляді:

$$\delta_s = \frac{c_s}{\pi\omega} \ln \frac{a_i}{a_{i+1}} = \frac{1}{\pi\omega} \sqrt{\frac{\Omega_s}{m}} \ln \frac{a_i}{a_{i+1}} \quad (15)$$

де a_i і a_{i+1} — послідовні напіврозмахи коливань ротора в зоні резонансу після проходження власної частоти системи, які визначаються як радіальні зміщення при двох послідовних обертках ротора [7].

Силу інерції в рівнянні (10) визначимо у вигляді [6]:

$$F_{is} = m\varepsilon\omega^2 \sin\omega t \quad (16)$$

Сили N_s і F_s визначені у вигляді,

$$N_s = N_{0s} - C_{Ns}s \quad (17)$$

де

$$K_{0s} = \frac{2}{1 - \rho^2} \left[\int_{\rho_1}^{\rho_{01}} \sqrt{1 + (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(\rho_{01}/\rho_1)}} \rho d\rho + \int_{\rho_{01}}^1 \sqrt{1 + (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(1/\rho)}{\ln(1/\rho_{01})}} \rho d\rho \right] - 1,$$

$\rho = \frac{r}{R_0}, \rho_{01} = \frac{R_{01}}{R_0}, \rho_1 = \frac{R_1}{R_0}, R_1 < r < R_0, R_{01}$ — радіус надуву,

$$C_{Ns} = \pi p_a (R_0^2 - R_1^2) K_{Ns} \xi \frac{\cos \chi}{h}$$

$$K_{Ns} = \frac{3(P_{01}^2 - 1)(P_H^2 - P_{01}^2)}{(P_H^2 - 1)(1 - \rho_1^2)} \left[\int_{\rho_1}^{\rho_{01}} \frac{\frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(\rho_{01}/\rho_1)}}{\sqrt{1 + (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(\rho_{01}/\rho_1)}}} \rho d\rho + \int_{\rho_{01}}^1 \frac{\frac{\ln(1/\rho)}{\ln(1/\rho_{01})}}{\sqrt{1 + (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(1/\rho)}{\ln(1/\rho_{01})}}} \rho d\rho \right]$$

а сила електромагнітного тяжіння:

$$F_s = \frac{\mu_0 m_\phi^2 k_{\phi\phi}^2 w_{\phi\phi}^2 L_H I_\phi^2 (R_0 + R_1) (s - \xi t g \chi)}{\pi p_e^2 \sqrt{[2\xi^2 t g^2 \chi - 2\xi t g \chi (\eta + \zeta) + \eta^2 + \zeta^2]^3 \cos^2 \chi}} \quad (18)$$

де ξ, η, ζ — зміщення ротора по відповідним осям координат.

В рівняннях (11)–(18) наведено параметри, які визначають момент інерції ротора і дозволяють при їх підстановці в рівняння (10) і вимірюванні кута повороту ротора, його кутової швидкості і радіального зміщення виміряти момент інерції відносно осі обертання.

Залежність моменту інерції ротора від кутової швидкості і зміна цієї залежності в часі показана на рис.2.

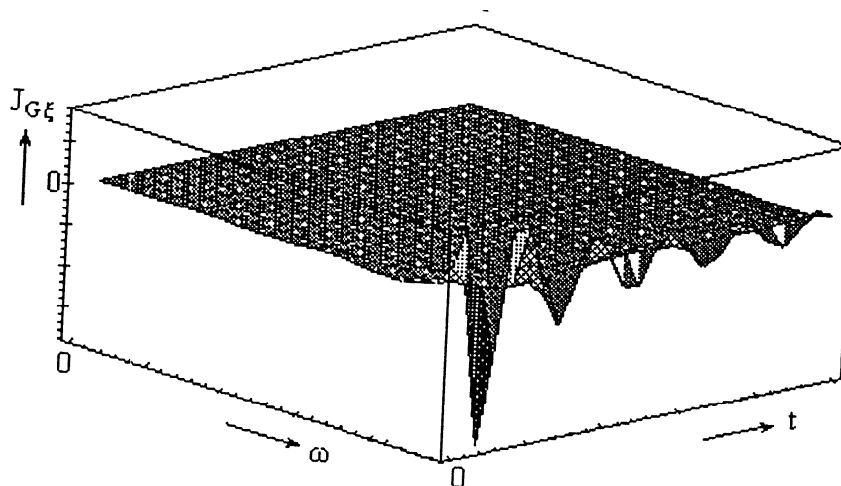


Рисунок 2 — Залежність моменту інерції від кутової швидкості і часу

Висновки.

1. Вимірювання параметрів коливань ротора дозволяє виміряти його приведений момент інерції.
2. При безконтактному вимірюванні параметрів коливань вимірювання моменту інерції є безконтактним.

Література

1. Лойцянский Л.Г., Лурье АИ. Курс теоретической механики: В 2-х т. — М: Наука — 1982. — Том 2. — 640 с.
2. Podzharenco V., Kucheruk V. Computer-Measuring System of the Mechanical Characteristics of Electrical Drives // International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE'96). Proceedings. Vol. 2. October 1–3, 1996, the High Tatras, Slovakia/ P. 633–637.
3. Сокол В.М. Определение момента инерции ротора в процессе его балансировки // Автоматизация и современные технологии. — 1995. — № 7. — С. 19–21.
4. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный привод. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 128 с.
5. Сокол В.М. Динамическая модель высокоскоростного ротора с учетом его неуравновешенности // Автоматизация и современные технологии. — 1996. — №6. — С. 23–26.
6. Левитский Н.И. Колебания в механизмах. — М.: Наука, 1988. — 336 с.
7. Патент України за заявкою № 98052358 від 07.05.1998, МІЖ G01S 5/00. Спосіб визначення положення осі обертання ротора / Сокол В.М. — Рішення про видачу патента від 26.10.1998.
8. Сокол В.М. Некоторые проблемы определения параметров вращательного движения ротора // Труды 3-й международной научно-практической конференции «Современные информационные и энергосберегающие технологии». — Книга 3. Каменец-Подольский, 2–6 июня 1998 г. — Киев, 1998. — С.98–101.
9. Шнайдер АГ., Сокол В.М. Демпфирование колебаний ротора мотор-подшипников // Вестник машиностроения. — 1991. — № 10. — С. 28–31.
10. Патент України за заявкою № 98052360 від 07.05.1998, МІЖ G01M 1/10. Спосіб визначення моменту інерції осі обертання ротора / Сокол В.М. — Рішення про видачу патента від 26.10.1998.

Здано в редакцію:
11.03.2009р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Зорі А.А.