

УДК 66.022.51

І.О. Осташко, Б.В. Виноградов

ДИНАМІКА МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВІДЦЕНТРОВОГО МЛИНА

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ

Розглянута динаміка пуску і сталого режиму роботи відцентрового млина з S – подібним робочим органом. Запропонована математична модель моменту опору, що діє на робочий орган. Наведені розрахункові та експериментальні динамічні параметри млина.

Вступ

Для подрібнення неабразивних твердих матеріалів, зокрема твердих залишків піролізу зношених автомобільних шин, розроблений відцентровий млин з S-подібним робочим органом [1].

Для вибору параметрів електромеханічної системи приводу млина необхідно розробити методику розрахунку динамічних навантажень в приводі в період пуску двигуна та його сталого режиму роботи. Незважаючи на те, що динаміці машин і механізмів присвячено велику кількість робіт, недостатньо представлені дослідження динаміки відцентрових млинів, та зовсім відсутні дослідження млинів з S-подібним робочим органом.

Основна частина

На рис. 1 надана кінематична, а на рис. 2 еквівалентна динамічна схеми відцентрового млина з S-подібним робочим органом.

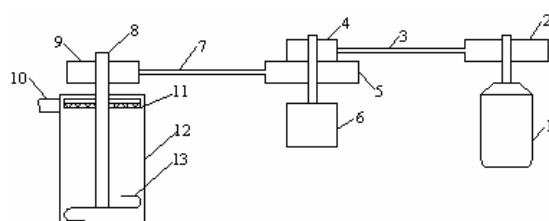


Рис. 1. Кінематична схема відцентрового млина з S-подібним робочим органом

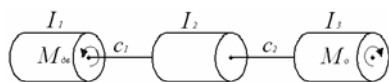


Рис. 2. Еквівалентна динамічна схема відцентрового млина з S-подібним робочим органом: I_1 – момент інерції ротора двигуна з приєднаним до нього шківом; I_2 , I_3 – наведені моменти інерції проміжного вала зі шківами та вала робочого органу зі шківом; C_1 , C_2 – наведена жорсткість першого та другого ступеня пасових передач

Від двигуна 1 через шківи 2, 4, 5, 8 та паси 3, 7 крутний момент двигуна передається на вал відцентрового млина 8 і розганяє вал до номінальної частоти обертання. Матеріал, що завантажується через порожнистий вал 8, подрібнюється в робочому об'ємі помольної камери 12 робочим органом 13, а готовий продукт видаляється через вихідний патрубок 3 з потоком повітря, що нагнітається крильчаткою 11. Наявність проміжного вузла, що складається з шківів 4,5 та підшипникового вузла 6, дозволяє регулювати частоту обертання млина від 4000 до 8000 об./хв. В загальному випадку млин можна надати як тримасову систему з зосередженими масами на валу ротора, вала проміжного ступеня та вала млина (рис. 2).

Наведені моменти інерції та жорсткості дослідної системи надані в таблиці.

Параметри динамічної схеми відцентрового млина

Наведені величини	Позначення	Розмірність	Значення
Жорсткість першої пасової передачі	C_1	кг·м	132,75
Жорсткість другої пасової передачі	C_2	кг·м	272,70
Момент інерції ротора зі шківом	I_1	кг·м ²	0,0520
Момент інерції проміжного вузла	I_2	кг·м ²	0,0319
Момент інерції вала робочого органу зі шківом	I_3	кг·м ²	0,0881

У загальному випадку, зосереджені маси, що обертаються, можуть бути джерелом збурювання змушених коливань з частотою, яка дорівнює ча-

стоті обертання відповідної маси. Для виключення резонансних режимів необхідно, щоб частоти збуджуючих сил не співпадали з частотами власних коливань, що визначаються за формулою [2]:

$$p^2 \cdot \left[\frac{I_1 I_2 I_3}{C_1 C_2} \cdot p^4 - \left(\frac{I_2 + I_3}{C_1} \cdot I_1 + \frac{I_1 + I_2}{C_2} \cdot I_3 \right) p^2 + I_1 + I_2 + I_3 \right] = 0. \quad (1)$$

Відповідно до цієї формули визначено частоти власних коливань системи, які дорівнюють: $p_1 = 59 \text{ Гц}$, $p_2 = 110,5 \text{ Гц}$, а частоти збуджуючих сил дорівнюють $\omega_1 = 148 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 273 \text{ с}^{-1}$, $\omega_3 = 408 \text{ с}^{-1}$. Для дослідного млина частоти власних коливань і збуджуючих сил суттєво відрізняються, тому резонансні режими неможливі.

Формування навантаження в механічній системі млина визначає електромагнітний момент двигуна та момент опору на робочому органі. Момент опору на робочому органі змінюється від початкового моменту $M_{\text{ст}}$ до номінальної величини $M_{\text{ном}}$. Початковий момент — це момент, що необхідно прикласти до робочого органу для його зрушення. Величина початкового моменту залежить від ступеня заповнення робочого об'єму млина і властивостей матеріалу. Для твердого залишку піролізу зношених шин залежність $M_{\text{ст}}$ від ступеня заповнення робочого об'єму $\psi = V_{\text{пк}}/V_{\text{м}}$ ($V_{\text{пк}}$, $V_{\text{м}}$ — об'єми помольної камери та матеріалу (відповідно) показано на рис. 3.

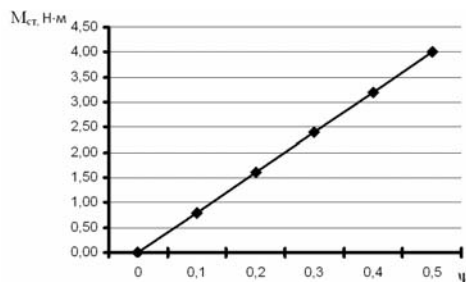


Рис. 3. Експериментальна залежність початкового моменту опору від ступеня заповнення робочого об'єму камери

В період розгону можна допустити, що момент опору змінюється за вентиляторним законом, тобто пропорційно квадрату швидкості. Тоді момент опору в період пуску можна надати у вигляді:

$$M_{\text{оп}}(\varphi_3) = M_{\text{ст}} + \frac{M_{\text{ном}} - M_{\text{ст}}}{\omega_{\text{н}}^2} \cdot \dot{\varphi}_3^2, \quad (2)$$

де $M_{\text{оп}}(\varphi_3)$ — момент опору на робочому органі (Н·м); $M_{\text{ст}}$ — початковий (статичний) момент опору (Н·м); $M_{\text{ном}}$ — номінальний момент опору (Н·м); $\omega_{\text{н}}$ — номінальна кутова швидкість (с^{-1}); $\dot{\varphi}_3$ —

кутова швидкість робочого органу.

Залежність $M_{\text{оп}}(\varphi_3)$ надалі будемо називати характеристикою млина. Номінальна величина моменту, що діє на робочий орган при досягненні номінальних швидкостей, визначається залежністю відповідно до [3]:

$$M_{\text{ном}} = k_1 \cdot k_2 \cdot (\mu \cdot \Gamma_1 + \xi \cdot \Gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_p^2, \quad (3)$$

де k_1 — коефіцієнт, що враховує зміну моменту опору при здрібненні матеріалу; k_2 — коефіцієнт, що відображає залежність моменту від ступеня заповнення робочої камери; μ — коефіцієнт лобового опору робочого органу; ξ — коефіцієнт опору тертю; Γ_1 , Γ_2 — геометричні параметри робочого органу, що визначаються за формулами:

$$\Gamma_1 = \frac{1}{8} l^4 + \frac{1}{2} l^3 + \frac{1}{6} - \frac{(1-l)^3}{6}, \quad (4)$$

$$\Gamma_2 = \frac{1}{6} b_1 \cdot l^3 + \frac{1}{2} b_1 \cdot l^3 + \frac{1}{6} - \frac{(1-l)^3}{6}, \quad (5)$$

де l , l_1 , l_3 , b , b_1 — геометричні параметри робочого органу [3].

Оскільки перехідні процеси в асинхронному двигуні протікають значно швидше ніж в механічній системі млина, то можна використати його статичну характеристику. В цьому випадку електромагнітний момент двигуна визначається за формулою [4]:

$$M_{\text{дв}}(s) = \frac{2M_{\text{max}} \cdot (1 + \frac{x_1}{r_0})}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m} + 2 \frac{x_1}{r_0}}, \quad (6)$$

де M — момент на валу двигуна (Н·м); s — дійсне ковзання; s_k — критичне ковзання, що визначається

за формулою $s(\dot{\varphi}_p) = (1 - \frac{\dot{\varphi}_p}{\omega_{\text{ном}}})$; x_1 — активний

опір фази статора (Ом); r_0 — повний реактивний опір двигуна (Ом).

На рис. 4 надана статична характеристика двигуна лабораторного млина та моменти опору.

Система диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси у відцентровому млині, має вигляд:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + \mu_1 \cdot (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = M_{\text{дв}}(\dot{\varphi}_1), \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 - c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - \mu_1 \cdot (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) + \\ + \mu_2 \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = 0, \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 - c_2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - \mu_2 \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = -M_o(\dot{\varphi}_3, t), \end{cases} \quad (7)$$

де I_1 , I_2 , I_3 — моменти інерції двигуна, вузла трансмісії та робочого органу відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; φ_1 ,

φ_2 , φ_3 — кут повороту ротора двигуна, шківу трансмісії, робочого органу млина відповідно, рад/с; c_1 , c_2 , — жорсткість ланцюгів трансмісії, кг·м; μ_1 , μ_2 — коефіцієнти сил в'язкого опору; $M_{дв}(\varphi_1)$, $M_o(\varphi_3, t)$ — обертовий момент двигуна та момент опору робочого органу.

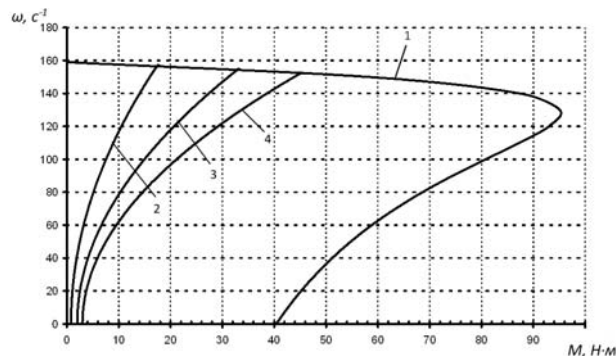


Рис. 4. Статичні характеристики двигуна і млина:
1 — характеристика двигуна; 2, 3, 4 — характеристика млина при ступені заповнення 0; 0,3 і 0,5 відповідно

На рис. 5,а надана динаміка пуску млина при відсутності навантаження. На рис. 5,б пуск при робочому навантаженні (ступінь заповнення 0,3), а на рис. 5,в при максимальному навантаженні млина (ступінь заповнення 0,5).

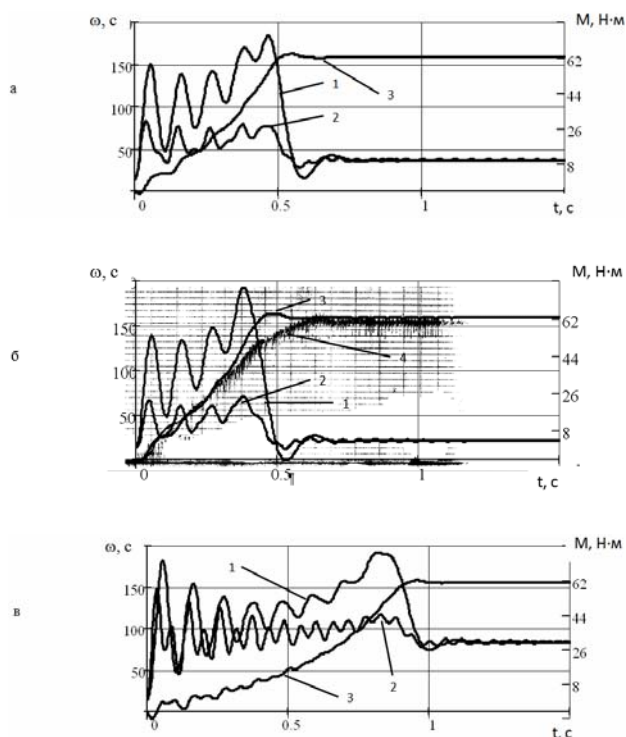


Рис. 5. Динаміка пуску відцентрового млина:
а, б, в — ступінь заповнення млина 0, 0,3, 0,5 відповідно;
1, 2, — крутний момент в ланках передач з жорсткістю C_1 і C_2 відповідно; 3, 4 — розрахункові та експериментальні залежності кутової швидкості робочого органу млина від часу

Аналіз рис. 5 дозволяє визначити час розгону двигуна при різних ступенях заповнення та динамічний коефіцієнт, що визначається як відношення максимального значення моменту до його номінального значення.

Висновки

1. Розроблена адекватна математична модель та методика розрахунку динаміки відцентрового млина, що дозволяє визначити динамічні навантаження в період пуску і сталого режиму роботи, а також вихідні параметри для розрахунку потужності млина, такі як момент сили опору, що діє на робочий орган, та час розгону двигуна.

2. Для млина, що досліджувався, частоти власних коливань та збурюючих сил відрізняються в 2–3 рази, що виключає резонансні режими роботи, динамічний коефіцієнт в період пуску не перевищував величини $k_d=3,6$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 90631 Україна, МПК В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Виноградов Б.В. Ємельяненко В.І. Осташко І.О. (Україна); — № а200905165; Заявл. 25.05.2009; Опубл. 11.05.2010; Бюл. № 9. — 8 с.
2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. — М.: МАШГИЗ, 1957. — 335 с.
3. Виноградов Б.В., Осташко И.А., Емельяненко В.И. Измельчение твердых остатков процессов пиролиза изношенных автомобильных шин в центробежных мельницах // Вопр. химии и хим. технологии. — 2009. — № 2. — С.159-161
4. Осташко І.О. Аналіз міцності S — подібного робочого органу відцентрового млина // Вопр. химии и хим. технологии. — 2010. — № 2. — С.150-152.
5. Давидов Б.А., Скородумов Б.А. Статика и динамика машин. — М.: Машиностроение, 1967. — 431 с.

Надійшла до редакції 22.09.2011