

дозволяє отримувати високоточні моделі навіть у випадках, коли аналітичний опис є надмірно складним або неможливим.

Сучасні вимірювальні комплекси дають змогу проводити експериментальний аналіз динаміки з високою точністю. До таких систем належать: лазерні трекери, високошвидкісні 3D-сканери, системи субміліметрового відеоаналізу руху, віброакустичні системи для виявлення мікроколивачь і резонансів. Ці засоби дозволяють вимірювати траєкторії руху ланок у реальному часі, діагностувати стан приводів, виявляти дефекти конструкції та проводити верифікацію моделювання.

Використання графічних процесорів (GPU) забезпечує можливість паралельного виконання великої кількості обчислень, що в десятки разів прискорює симуляцію динаміки роботизованих систем. Це відкриває можливість опрацювання тисяч сценаріїв навантаження, виявлення критичних режимів, автоматизованої оптимізації конструкції та алгоритмів керування. GPU-обчислення особливо ефективні для складних нелінійних моделей з великою кількістю ступенів свободи.

В процесі дослідження динамічних характеристик роботів важливу роль відіграють методи ідентифікації параметрів динаміки робота. Ідентифікація параметрів – це процес визначення фізичних характеристик робота, таких як маса ланок, моменти інерції, коефіцієнти тертя, жорсткість і демпфування. Серед сучасних методів ідентифікації виділяють субпросторові методи, рекурсивні фільтри (наприклад, фільтр Калмана), еволюційні та генетичні алгоритми, байєсівські методи, градієнтні оптимізаційні методи.

Методи Hardware-in-the-Loop (HiL), Software-in-the-Loop (SiL) та Model-in-the-Loop (MiL) дозволяють проводити тестування систем керування та динамічних моделей в умовах, максимально наближених до реальних. Такі методи дають змогу скоротити час і вартість розробки, підвищити безпеку тестування, перевіряти поведінку системи в критичних режимах без ризику пошкодження реального обладнання.

Огляд показує, що сучасні дослідження динамічних характеристик промислових роботів активно переходять від традиційних лінійних моделей до комплексних інтегрованих підходів. Найбільш перспективними напрямками є мультифізичне моделювання, використання цифрових двійників, машинне навчання, високоточна сенсорика, GPU-паралельні обчислення, сучасні методи ідентифікації параметрів, HiL/SiL/MiL-тестування. Використання цих методів забезпечує точне моделювання, оптимізацію та аналіз роботизованих систем і є критично важливим для розвитку сучасної промислової автоматизації.

УДК 631. 331.85

І.В. Карп, аспірант

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ШНЕКОВОГО ТРАНСПОРТЕРА ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

I. Karp, graduate student

ANALYTICAL MODEL OF THE WORKING PROCESS OF A SCREW CONVEYOR OF GRAIN MATERIALS

Післязбиральна доробка урожаю зернових культур до необхідних кондицій потребує виконання транспортних операцій для переміщення зерна для його просушування, очищення, протруювання тощо [1]. На зернових токах багатогалузевих фермерських господарств для виконання незначного обсягу таких робіт, найефективнішим способом є застосування малогабаритних шнекових транспортерів.

Основними вузлами шнекових механізмів (шнекового транспортера) є завантажувальний бункер 5 (рис. 1) і гвинтовий конвеєр 6, який виконує передавальну функцію сипких матеріалів і складається з кожуха, в середині простору якого встановлено шнек 8 із змінним кроком спіральних витків 10, який приводиться в обертальний рух за допомогою електродвигуна 2.

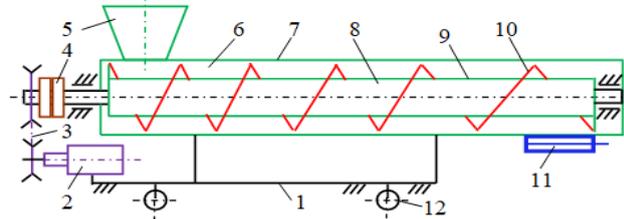


Рис. 3 – Конструктивна схема шнекового транспортера: 1 – рама; 2 – електродвигун; 3 – клинопасова передача; 4 – муфта; 5 – бункер; 6 – гвинтовий конвеєр; 7 – кожух; 8 – шнек; 9 – барабан; 10 – спіральний виток; 11 – шибера; 12 – опорне колесо

Для розробки математичної моделі процесу переміщення зернового матеріалу гвинтовим конвеєром розглянемо складену схему діючих сил, (рис. 2), при цьому рівняння руху частинки тіла зернового матеріалу у нерухомій системі координат $Oxyz$ у векторній формі запису для I -го та II -го випадків має вигляд:

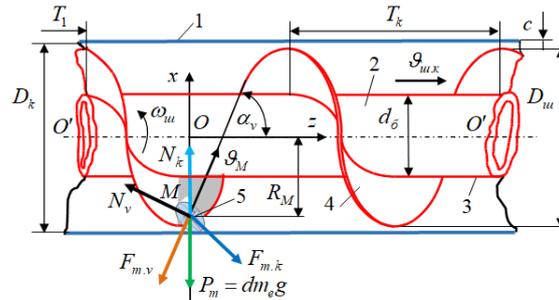


Рис. 2. Схема до розрахунку процесу переміщення зернового матеріалу у гвинтовому конвеєрі: 1 – кожух; 2 – шнек; 3 – барабан; 4 – спіральний виток; 5 – зерно

$$dV_m \rho_q \frac{d^2 \vec{R}_M}{dt^2} = dV_n \rho_q \vec{g} + \vec{R}_v \vec{n}_v (1 + f_v); t > 0; \quad (1)$$

$$dV_m \rho_q \frac{d^2 \vec{R}_M}{dt^2} = dV_n \rho_q \vec{g} + \vec{R}_v \vec{n}_v (1 + f_v) + \vec{R}_k \vec{n}_k (1 + f_k); t > 0, \quad (2)$$

Положення вектора одиничної нормалі \vec{n}_v до робочої поверхні спірального витка та вектора одиничної нормалі \vec{n}_k до робочої поверхні кожуха шнекового транспортера записано у вигляді:

$$\vec{n}_v = \begin{bmatrix} \left[T_1 + (k_z - 1) \frac{D_u (k_{Tk} - k_{T1})}{i - 1} \right] \sin \varphi_u; \\ - \left[T_1 + (k_z - 1) \frac{D_u (k_{Tk} - k_{T1})}{i - 1} \right] \cos \varphi_u; 2\pi R_M / a (R_M) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\vec{n}_k = \left[\cos \left(2\pi \frac{d\varphi_u}{dt} t - \varphi_0 \right); -\sin \left(2\pi \frac{d\varphi_u}{dt} t - \varphi_0 \right); 0 \right]. \quad (4)$$

Тоді отримаємо аналітичні записи рівняння для I -го та II -го випадку переміщення частинки тіла елементарної маси dm_e зернового матеріалу:

- коли частинка тіла елементарної маси dm_e зернового матеріалу рухається по робочій поверхні спірального витка без контакту з внутрішньою поверхнею кожуха

$$\frac{ab^2 \rho_q}{(1-f_v)} \frac{d^2 \varphi_{uu}}{dt^2} = ab^2 \rho_q g + ab^2 \rho_q \frac{d^2 \varphi_{uu}}{dt^2} - \frac{(ab^2 \rho_q g; 0; ab^2 \rho_q g)}{\left(-T_k \sin \varphi_{uu}; T_k \cos \varphi_{uu}; \frac{2\pi R_M}{\sqrt{T_k^2 + 4\pi^2 R_M^2}} \right) \left(1 - f_v \frac{|\Phi|}{|\Phi|} \right)}; \quad (5)$$

- коли частинка тіла елементарної маси dm_e зернового матеріалу рухається одночасно по робочій поверхні спірального витка та внутрішній поверхні кожуха

$$\frac{4ab^2}{3} \rho_q \frac{d^2 \varphi_{uu}}{dt^2} = \left(\frac{4ab^2}{3} \rho_q g \sin \varphi_{uu}; 0; -\frac{4ab^2}{3} \rho_q g \sin \varphi_{uu} \right) + R_v \left(-T_k \sin \varphi_{uu}; T_k \cos \varphi_{uu}; \frac{2\pi R_M}{\sqrt{T_k^2 + 4\pi^2 R_M^2}} \right) \left(1 - f_v \frac{|\Gamma|}{|\Pi|} \right); \quad (6)$$

$$\text{де } T_k = T_1 + (k_z - 1) \frac{D_{uu} (k_{Tk} - k_{T1})}{i - 1}; \quad \Phi = \frac{dR_{uu}}{dt} - \left(-2\pi \frac{d\varphi_{uu}}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}; \frac{dy_0(t)}{dt} + 2\pi \frac{d\varphi_{uu}}{dt} \cdot x; 0 \right);$$

$$\Gamma = \frac{d\varphi_{uu}}{dt} - 2\pi \omega_{uu} \cdot y + \frac{d\varphi_0}{dt}; \quad \Pi = \frac{dR_M}{2dt} - 2\pi \omega_{uu} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}.$$

Отримані математичні моделі (5), (6) мають стаціонарні рішення відносно прискорення руху $d^2 \varphi_{uu} / dt^2 = a_m$ (м/с²) частинки, які відповідають точкам спокою:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \varphi_{uu}}{dt^2} = a_{Im} = g \sin \varphi_{uu} \left[\frac{\left(\frac{\pi D_{uu}}{\sqrt{T_k^2 + \pi^2 D_{uu}^2}} \right) \left(\frac{1 + f_v^2 - f_v}{f_v - f_v^2} \right)}{\left(\frac{\pi D_{uu} \cos \varphi_{uu}}{\sqrt{T_k^2 + \pi^2 D_{uu}^2}} \right)} \right]; \\ \frac{d^2 \varphi_{uu}}{dt^2} = a_{IIm} = 0,5 g \sin \varphi_{uu} (1 - D_{uu}) (\sin \varphi_{uu} - 1) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Література

1. Baranovsky V.M., Solomka V.O., Onyshchenko V.B. Choice of parameters when designing a screw conveyor. CDTUSG Herald. 2001. No 8 (2). P. 209-215.

УДК 66.041

Карпюк Т. О.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ПЕЧЕЙ

Карпюк Т. О.

IMPROVING THE BAKING OVENS EFFICIENCY

Хлібопекарське виробництво традиційно залишається однією з провідних галузей харчової промисловості України, забезпечуючи населення соціально значущою продукцією. Водночас ця галузь характеризується високою енергоємністю виробництва, причому хлібопекарські печі споживають до сорок відсотків усієї енергії підприємства. В умовах сучасної енергетичної кризи та тривалої тенденції до зростання цін на енергоносії питання раціонального використання енергетичних ресурсів набуває стратегічного значення для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняних виробників.