



УДК 693.546

*В.С. Ловейкін, д-р техн. наук, професор
КНУБА,
К.І. Почка, аспірант КНУБА*

ПОБУДОВА ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З РЕКУПЕРАЦІЙНИМ ПРИВОДОМ

Для проведення експериментальних досліджень як правило використовуються натурні об'єкти дослідження та їх моделі. В натурному експерименті засоби експериментального дослідження взаємодіють безпосередньо з об'єктом дослідження, а при модельному експерименті – з його змодельованим прототипом. При проведенні модельних експериментальних досліджень, модель виступає як засіб експериментальних досліджень та безпосереднім об'єктом досліджень.

В наш час створення натурної роликкової формувальної установки з рекупераційним приводом для проведення експериментальних досліджень привело б до значної затрати часу та енергії. Враховуючи це, на даному етапі доцільно було б створити фізичну модель даної установки і провести на ній повноцінні експериментальні дослідження. Тому в основу даної статті покладено задачу визначення параметрів фізичної моделі, розробки її схеми та конструкції.

При проведенні експериментальних досліджень досить часто використовується фізичне моделювання технічних систем. Цим методом користуються при дослідженні складних явищ, коли неможливо побудувати задовільну математичну модель, або для перевірки адекватності складеної математичної моделі [1]. Фізичне моделювання зберігає фізичну природу явищ, але змінює їх масштаб. Сенс фізичного моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів на моделях можна було достовірно оцінити характер ефектів і кількісні взаємозв'язки між величинами, які визначають фізично подібні явища в натурних умовах.

В основу фізичного моделювання закладено теорію подібності [1], що опирається на аналіз розмірностей, а саме: об'єкти є подібними, якщо у відповідні моменти часу у відповідних точках об'єктів значення змінних величин, що характеризують стан одного об'єкта (натури), пропорційні відповідним значенням величин іншого об'єкта (моделі). В подібних об'єктах характеристики натурального об'єкта можуть бути отримані простим перерахунком із характеристик модельного об'єкта, що визначається експериментально. Для всіх величин відповідної розмірності таким множником є коефіцієнт подібності.

Також для подібних об'єктів повинні бути однакові наступні умови:

- модель і натурний об'єкт повинні бути геометрично подібними;
- діючі на модель навантаження повинні бути подібними навантаженнями, які сприймаються натурними об'єктами;
- безрозмірні величини для моделі і натурального об'єкта повинні бути рівними;
- матеріали моделі і натурального об'єкта можуть бути різними та в залежності від галузі дослідження зв'язок напружень і деформацій має відповідати закону Гука.

Остаточні результати дослідження при фізичному моделюванні координуються за допомогою критеріїв подібності. Кількість критеріїв може бути меншою ніж кількість параметрів, що описують процес. До того ж кількість критеріїв, що характеризують будь-який процес, можна скоротити шляхом їх групування у безрозмірні комплекси, виходячи з природи і умов досліджуваних процесів. Саме ці безрозмірні комплекси називають критеріями подібності.

На рис. 1 показано роликкову формувальну установку з рекупераційним приводом, яка вміщує в собі два пристрої, що розташовані по різні боки приводного валу. Кожний з пристроїв вміщує в собі змонтований на порталах 9 і 10 формувальні візки 1 та 2, що здійснюють зворотно-поступальний рух в напрямних руху. Візок 1 складається з подаючого бункера 11 та з співвісних секцій уключуючих роликів 12, встановлених в горизонтально-рухомій рамі 8 з розподільчим бункером. Таку ж конструкцію має й інший формувальний візок. Візки 1 та 2 приводяться в зворотно-поступальний рух за допомогою єдиного приводу, виконаного у вигляді кривошипно-повзунного механізму. Кривошипи 3 та 4 жорстко закріплені на приводному валу 5, зміщені між собою на кут $\frac{\pi}{2}$ та з'єднані з шатунами 6 та 7, а шатуни в свою чергу шарнірно з'єднані з візками 1 та 2 відповідно.

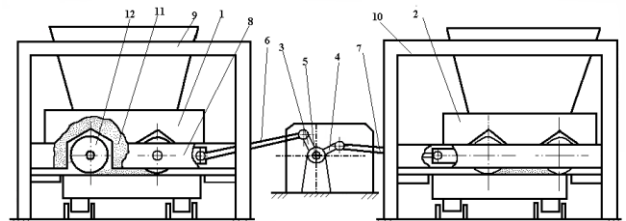


Рис. 1. Роликкова формувальна установка з рекупераційним приводом

Використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання, визначимо умови подібності для роликкової формувальної установки з рекупераційним приводом, динаміка руху якої



описується запропонованим диференціальним рівнянням [2]

$$I_{36}(\varphi) \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dI_{36}(\varphi)}{d\varphi} = M_p(\omega) - M_o(\varphi) \quad (1)$$

де φ , ω – кутова координата та швидкість кривошипу; $I_{36}(\varphi)$ – зведений до осі повороту кривошипу момент інерції установки; $M_p(\omega)$ – рушійний момент на валу електродвигуна приводу зведений до осі повороту кривошипу; $M_o(\varphi)$ – зведений до осі повороту кривошипа момент всіх діючих зовнішніх сил опору. Визначаємо зведений до осі повороту кривошипа момент сил опору $M_o = M_o(\varphi)$

$$M_o = F_0 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial \varphi} + F_0 \cdot \frac{\partial x_2}{\partial \varphi}, \quad (2)$$

де F_0 – сила опору переміщенню формувального візка; $\frac{\partial x_1}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial x_2}{\partial \varphi}$ – передаточні

функції першого та другого формувального візків відповідно.

Визначено також зведений до осі повороту кривошипа момент інерції установки

$$I_{36} = I_o \cdot i_{np}^2 + m_1 \cdot \left(\frac{\partial x_1}{\partial \varphi} \right)^2 + m_2 \cdot \left(\frac{\partial x_2}{\partial \varphi} \right)^2, \quad (3)$$

де $I_o = I_{\delta\delta} + I_m + I_{ред}$ – момент інерції приводного механізму (двигуна, муфти, редуктора) відносно осі повороту кривошипу; i_{np} – передаточне відношення передаточного механізму; m_1 , m_2 – маса формувальних візків 1 та 2 відповідно.

Підставивши залежності (2) та (3) в рівняння (1), отримаємо диференціальне рівняння руху установки в остаточному вигляді

$$I_o \cdot i_{np}^2 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} + m_1 \cdot \left(\frac{\partial x_1}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} + m_2 \cdot \left(\frac{\partial x_2}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{d(I_o \cdot i_{np}^2)}{d\varphi} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_1 \cdot \left(\frac{\partial x_1}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_2 \cdot \left(\frac{\partial x_2}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi} = M_p(\omega) - F_0 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial \varphi} - F_0 \cdot \frac{\partial x_2}{\partial \varphi} \quad (4)$$

Виразимо параметри натурної установки через відповідні параметри її фізичної моделі і коефіцієнти подібності

$$I_{oH} = \lambda_l \cdot I_{oM}; i_{npH} = \lambda_i \cdot i_{npM};$$

$$m_{1H} = \lambda_{m1} \cdot m_{1M};$$

$$m_{2H} = \lambda_{m2} \cdot m_{2M}; x_{1H} = \lambda_{x1} \cdot x_{1M};$$

$$x_{2H} = \lambda_{x2} \cdot x_{2M};$$

$$\omega_H = \lambda_\omega \cdot \omega_M; M_{pH} = \lambda_M \cdot M_{pM};$$

$$F_{0H} = \lambda_F \cdot F_{0M}, \quad (5)$$

де I_{oH} , i_{npH} , m_{1H} , m_{2H} , x_{1H} , x_{2H} , ω_H , M_{pH} , F_{0H} – параметри натурної установки; I_{oM} , i_{npM} , m_{1M} , m_{2M} , x_{1M} , x_{2M} , ω_M , M_{pM} , F_{0M} – параметри моделі; λ_l , λ_i , $\lambda_{m1} = \lambda_{m2} = \lambda_m$, $\lambda_{x1} = \lambda_{x2} = \lambda_x$, λ_ω , λ_M , λ_F – відповідні коефіцієнти подібності.

Рівняння, подібні рівнянню (4), для натурної установки і її моделі мають вигляд:

$$I_{oH} \cdot i_{npH}^2 \cdot \omega_H \cdot \frac{d\omega_H}{d\varphi} + m_{1H} \cdot \left(\frac{\partial x_{1H}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_H \cdot \frac{d\omega_H}{d\varphi} + m_{2H} \cdot \left(\frac{\partial x_{2H}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_H \cdot \frac{d\omega_H}{d\varphi} + \frac{\omega_H^2}{2} \cdot \frac{d(I_{oH} \cdot i_{npH}^2)}{d\varphi} + \frac{\omega_H^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{1H} \cdot \left(\frac{\partial x_{1H}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi} + \frac{\omega_H^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{2H} \cdot \left(\frac{\partial x_{2H}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi} = M_{pH}(\omega) - F_{0H} \cdot \frac{\partial x_{1H}}{\partial \varphi} - F_{0H} \cdot \frac{\partial x_{2H}}{\partial \varphi}, \quad (6)$$

$$I_{oM} \cdot i_{npM}^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi} + m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial x_{1M}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi} + m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial x_{2M}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi} + \frac{\omega_M^2}{2} \cdot \frac{d(I_{oM} \cdot i_{npM}^2)}{d\varphi} + \frac{\omega_M^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial x_{1M}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi} + \frac{\omega_M^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial x_{2M}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi} = M_{pM}(\omega) - F_{0M} \cdot \frac{\partial x_{1M}}{\partial \varphi} - F_{0M} \cdot \frac{\partial x_{2M}}{\partial \varphi}. \quad (7)$$

Виходячи з умови подібності моделі та натурної установки, поділимо відповідні доданки рівнянь (6) та (7) між собою і запишемо співвідношення

$$\frac{I_{oH} \cdot i_{npH}^2 \cdot \omega_H \cdot \frac{d\omega_H}{d\varphi}}{I_{oM} \cdot i_{npM}^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi}} = \frac{m_{1H} \cdot \left(\frac{\partial x_{1H}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_H \cdot \frac{d\omega_H}{d\varphi}}{m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial x_{1M}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi}} = \frac{m_{2H} \cdot \left(\frac{\partial x_{2H}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_H \cdot \frac{d\omega_H}{d\varphi}}{m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial x_{2M}}{\partial \varphi} \right)^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi}} = \frac{\frac{\omega_H^2}{2} \cdot \frac{d(I_{oH} \cdot i_{npH}^2)}{d\varphi}}{\frac{\omega_M^2}{2} \cdot \frac{d(I_{oM} \cdot i_{npM}^2)}{d\varphi}} = \frac{\frac{\omega_H^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{1H} \cdot \left(\frac{\partial x_{1H}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi}}{\frac{\omega_M^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial x_{1M}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi}} = \frac{\frac{\omega_H^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{2H} \cdot \left(\frac{\partial x_{2H}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi}}{\frac{\omega_M^2}{2} \cdot \frac{d\left(m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial x_{2M}}{\partial \varphi} \right)^2 \right)}{d\varphi}} = \frac{M_{pH}(\omega_H)}{M_{pM}(\omega_M)} = \frac{F_{0H} \cdot \frac{\partial x_{1H}}{\partial \varphi}}{F_{0M} \cdot \frac{\partial x_{1M}}{\partial \varphi}} = \frac{F_{0H} \cdot \frac{\partial x_{2H}}{\partial \varphi}}{F_{0M} \cdot \frac{\partial x_{2M}}{\partial \varphi}}$$

Використавши для цих співвідношень залежності (5), отримаємо

$$\frac{\lambda_I \cdot I_{\omega M} \cdot (\lambda_i \cdot i_{\text{спМ}})^2 \cdot \lambda_{\omega} \cdot \omega_M \cdot \frac{d(\lambda_{\omega} \cdot \omega_M)}{d\varphi}}{I_{\omega M} \cdot i_{\text{спМ}}^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi}} = \frac{\lambda_m \cdot m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial(\lambda_x \cdot x_{1M})}{\partial\varphi}\right)^2 \cdot \lambda_{\omega} \cdot \omega_M \cdot \frac{d(\lambda_{\omega} \cdot \omega_M)}{d\varphi}}{m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial x_{1M}}{\partial\varphi}\right)^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi}} =$$

$$\frac{\lambda_m \cdot m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial(\lambda_x \cdot x_{2M})}{\partial\varphi}\right)^2 \cdot \lambda_{\omega} \cdot \omega_M \cdot \frac{d(\lambda_{\omega} \cdot \omega_M)}{d\varphi}}{m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial x_{2M}}{\partial\varphi}\right)^2 \cdot \omega_M \cdot \frac{d\omega_M}{d\varphi}} = \frac{(\lambda_{\omega} \cdot \omega_M)^2 \cdot d(\lambda_m \cdot m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial(\lambda_x \cdot x_{1M})}{\partial\varphi}\right)^2)}{2 \cdot d\varphi} = \frac{(\lambda_{\omega} \cdot \omega_M)^2 \cdot d(\lambda_m \cdot m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial(\lambda_x \cdot x_{2M})}{\partial\varphi}\right)^2)}{2 \cdot d\varphi} =$$

$$\frac{\omega_M^2 \cdot d\left(m_{1M} \cdot \left(\frac{\partial x_{1M}}{\partial\varphi}\right)^2\right)}{2 \cdot d\varphi} = \frac{\omega_M^2 \cdot d\left(m_{2M} \cdot \left(\frac{\partial x_{2M}}{\partial\varphi}\right)^2\right)}{2 \cdot d\varphi} =$$

$$\frac{\lambda_M \cdot M_{\text{рМ}}(\omega)}{M_{\text{рМ}}(\omega)} = \frac{\lambda_F \cdot F_{\text{ом}} \cdot \frac{\partial(\lambda_x \cdot x_{1M})}{\partial\varphi}}{F_{\text{ом}} \cdot \frac{\partial x_{1M}}{\partial\varphi}} = \frac{\lambda_F \cdot F_{\text{ом}} \cdot \frac{\partial(\lambda_x \cdot x_{2M})}{\partial\varphi}}{F_{\text{ом}} \cdot \frac{\partial x_{2M}}{\partial\varphi}}$$

Згідно з теоремою подібності в отриманих співвідношеннях відкидаємо знаки диференціювання, оскільки вони не мають розмірностей, і скорочуємо вирази. В результаті чого отримуємо співвідношення між коефіцієнтами подібності

$$\lambda_I \cdot \lambda_i^2 \cdot \lambda_{\omega}^2 = \lambda_m \cdot \lambda_x^2 \cdot \lambda_{\omega}^2 = \lambda_m \cdot \lambda_x^2 \cdot \lambda_{\omega}^2 = \lambda_{\omega}^2 \cdot \lambda_I \cdot \lambda_i^2 = \lambda_{\omega}^2 \cdot \lambda_m \cdot \lambda_x^2 = \lambda_{\omega}^2 \cdot \lambda_m \cdot \lambda_x^2 = \lambda_M = \lambda_F \cdot \lambda_x \cdot \lambda_i$$

Після видалення з отриманого рівняння однакових елементів, отримаємо

$$\lambda_I \cdot \lambda_i^2 \cdot \lambda_{\omega}^2 = \lambda_m \cdot \lambda_x^2 \cdot \lambda_{\omega}^2 = \lambda_M = \lambda_F \cdot \lambda_x \cdot \lambda_i \quad (8)$$

Розділивши всі елементи на $\lambda_m \cdot \lambda_x^2 \cdot \lambda_{\omega}^2$, отримаємо систему рівнянь

$$\frac{\lambda_I \cdot \lambda_i^2}{\lambda_m \cdot \lambda_x^2} = 1; \frac{\lambda_M}{\lambda_m \cdot \lambda_x^2 \cdot \lambda_{\omega}^2} = 1; \frac{\lambda_F}{\lambda_m \cdot \lambda_x \cdot \lambda_i} = 1. \quad (9)$$

Система з трьох рівнянь (9) зв'язує між собою сім невідомих величин. Чотири з цих величин можна задати довільно, а три величини, що залишились, можна визначити з системи рівнянь (9). Таким чином задаємось коефіцієнтами $\lambda_{\omega} = 3$, $\lambda_i = 8$, $\lambda_m = 10$ та $\lambda_x = 2,5$. Підставивши задані коефіцієнти в систему рівнянь (9), визначаємо значення коефіцієнтів, що залишились $\lambda_I = 3,9$, $\lambda_M = 62,5$ та $\lambda_F = 75$.

Отримані співвідношення дають можливість побудувати фізичну модель дослідної роликівальної формувальної установки з рекуперативним приводом, що буде подібна натурній роликівальної формувальній установці.

Враховуючи коефіцієнти подібності та передбачені задачі досліджень було розроблено фізичну модель роликівальної формувальної установки з рекуперативним приводом, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів впливу на динаміку руху формувальних візків. Як видно із схеми на рис. 3 фізична модель роликівальної формувальної установки з рекуперативним приводом складається з двох формувальних візків 1 та 2 з укочуючими роликами 3, що здійснюють зворотно-поступальні рухи у напрямних руху 4 над порожниною форм 5. В зворотно-поступальній рух формувальні візки приводяться від кришопіпів, що закріплені на приводному валу 6, через посередництво шатунів 7. Крутний момент на приводний вал передається від електродвигуна 8 через черв'ячний редуктор 9 та клинопасову передачу 10.

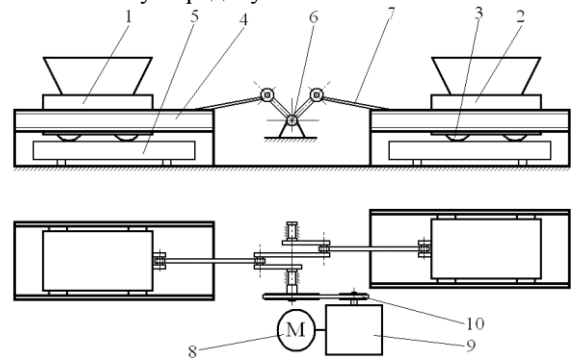


Рис. 2. Схема розробленої фізичної моделі

На основі розробленої схеми на кафедрі основ професійного навчання Київського національного університету будівництва і архітектури спроектовано і виготовлено дослідну фізичну модель роликівальної формувальної установки з рекуперативним приводом, що показана на рис. 3.



Рис. 3. Фізична модель роликівальної формувальної установки з рекуперативним приводом

Привод моделі здійснювався від трифазного електродвигуна змінного струму АІР56В2У3 потужністю $P = 0,25 \text{ кВт}$ і частотою



обертання ротора $n = 2750 \text{ об/хв}$, через черв'ячний редуктор та клинопасову передачу із загальним передаточним відношенням $i_{\text{заг}} = 80$.

Представлена фізична модель дозволяє проводити повноцінні експериментальні дослідження по визначенню динамічних навантажень під час різних режимів роботи установки без будь-яких обмежень.

Література

1. *Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Онищенко О.Г.* Теорія технічних систем: Навч. посібник. – Київ – Полтава: ІЗМН – ПДТУ, 1998. – 175 с.
2. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Аналіз нерівномірності руху роликової формовочної установки з рекупераційним приводом // Науково-технічний та виробничий журнал «Підійомно-транспортна техніка». – Вип. 4, 2005 р. – С. 19...33.