



УДК 693.546

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

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕЖИМІВ РУХУ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З РЕКУПЕРАЦІЙНИМ ПРИВОДОМ

Основною перевіркою вірності теоретичних досліджень є проведення експериментальних досліджень з наступним порівняльним аналізом результатів отриманих в процесі теоретичних і експериментальних досліджень. В наш час створення натурної роликової формувальної установки з рекупераційним приводом для проведення експериментальних досліджень привело б до значної затрати часу та енергії.

Використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання [1], було визначено умови подібності для роликової формувальної установки з рекупераційним приводом, а також визначені коефіцієнти подібності. На основі цих даних та спираючись на передбачені задачі досліджень було розроблено фізичну модель роликової формувальної установки з рекупераційним приводом, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів впливу на динаміку руху формувальних візків. Розроблена фізична модель (рис. 1) складається із приводного механізму, що забезпечує необхідний режим руху роликової формувальної установки з рекупераційним приводом та двох формувальних візків.



Рис. 1. Фізична модель роликової формувальної установки з рекупераційним приводом

Відповідно плану експериментальних досліджень проводилось вимірювання кутової швидкості обертання приводного вала, зусилля в шатунах, вертикальної сили взаємодії укочуючого ролика з бетонною сумішшю, сили струму на двигуні та потужності, що необхідна на процес формування. Ці параметри

вимірювались спочатку в холостому режимі для установки з одним формувальним візком. Для цього – другий формувальний візок разом із шатуном був від'єднаний від кривошипа. Після цього вимірювання цих же параметрів у холостому режимі проводилось для установки з двома формувальними візками. В робочому режимі вимірювання здійснювалось аналогічно: окремо для установки з одним формувальним візком та окремо для установки з двома формувальними візками. Разом із значенням кутової швидкості обертання приводного вала відбувався запис часу, що дало змогу потім визначити характер зміни кутового прискорення приводного вала.

На рис. 2 зображено графіки зміни кутової швидкості приводного вала в холостому режимі установки з одним формувальним візком (1) та установки з двома формувальними візками (2) в залежності від кута його повороту.



Рис. 2. Графіки зміни кутової швидкості приводного вала установки в холостому режимі з одним формувальним візком (1) та з двома візками (2)

Кутова швидкість приводного вала установки з одним формувальним візком в холостому режимі змінюється в межах від $\omega_{min} = 2,8 \text{ рад/с}$ до $\omega_{max} = 4,6 \text{ рад/с}$. При цьому її середнє значення [2] становить

$$\omega_{сер} = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} = \frac{2,8 + 4,6}{2} = 3,7 \text{ рад/с}. \quad (1)$$

Коефіцієнт нерівномірності руху [2]

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{сер}} = \frac{4,6 - 2,8}{3,7} = 0,486. \quad (2)$$

Для установки з двома формувальними візками кутова швидкість приводного вала в холостому режимі змінюється в межах від $\omega_{min} = 3,32 \text{ рад/с}$ до $\omega_{max} = 4,08 \text{ рад/с}$. При цьому її середнє значення становить $\omega_{сер} = 3,7 \text{ рад/с}$. Коефіцієнт нерівномірності руху $\delta = 0,205$.

При зміні значення кутової швидкості буде змінювати своє значення і кутове прискорення, що визначається залежністю [2]

$$\varepsilon_i = \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (3)$$

де ω_i , ω_{i+1} , t_i , t_{i+1} – відповідно значення кутової швидкості привідного вала та часу руху в положеннях i та $i + 1$.

За допомогою залежності (3) побудовано графіки зміни кутового прискорення привідного валу (рис. 3) в холостому режимі установки з одним формувальним візком (1) та з двома формувальними візками (2) в залежності від кута його повороту.

Для установки з одним формувальним візком кутове прискорення привідного вала в холостому режимі змінюється в межах від $\varepsilon_{min} = -4,09 \text{ рад/с}^2$ до $\varepsilon_{max} = 4,886 \text{ рад/с}^2$.



Рис. 3. Графіки зміни кутового прискорення привідного вала установки в холостому режимі з одним формувальним візком (1) та з двома візками (2)

При цьому коефіцієнт динамічності руху дорівнює [2]

$$H = \frac{|\varepsilon_{max}|}{\omega_{сep}^2} = \frac{4,886}{3,7^2} = 0,355. \quad (4)$$

Для сумарної оцінки технологічних і динамічних властивостей формувальної установки використаємо узагальнений коефіцієнт оцінки руху [3]

$$k_p = \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})^2}{\omega_{сep}^2} + \frac{|\varepsilon_{max}|}{\omega_{сep}^2} = \frac{(4,6 - 2,8)^2}{3,7^2} + \frac{4,886}{3,7^2} = 0,592. \quad (5)$$

Для установки з двома формувальними візками кутове прискорення привідного вала в холостому режимі змінюється в межах від

$\varepsilon_{min} = -1,632 \text{ рад/с}^2$ до $\varepsilon_{max} = 1,685 \text{ рад/с}^2$. При цьому коефіцієнт динамічності руху дорівнює $H = 0,123$, а

узагальнений коефіцієнт оцінки руху становить $k_p = 0,165$.

На рис. 4 зображено графіки зміни кутової швидкості привідного вала в робочому режимі установки з одним формувальним візком (1) та установки з двома формувальними візками (2) в залежності від кута його повороту.

Кутова швидкість привідного вала установки з одним формувальним візком в робочому режимі змінюється в межах від $\omega_{min} = 2,92 \text{ рад/с}$ до $\omega_{max} = 4,48 \text{ рад/с}$. При цьому її середнє значення становить $\omega_{сep} = 3,7 \text{ рад/с}$.

Коефіцієнт нерівномірності руху $\delta = 0,42$.

Для установки з двома формувальними візками кутова швидкість привідного вала в робочому режимі змінюється в межах від $\omega_{min} = 3,37 \text{ рад/с}$ до $\omega_{max} = 4,03 \text{ рад/с}$. При цьому її середнє значення становить $\omega_{сep} = 3,7 \text{ рад/с}$. Коефіцієнт нерівномірності руху $\delta = 0,161$.

За допомогою залежності (3) побудовано графіки зміни кутового прискорення привідного вала (рис. 5) в робочому режимі установки з одним формувальним візком (1) та з двома формувальними візками (2) в залежності від кута його повороту.

Для установки з одним формувальним візком кутове прискорення привідного вала в робочому режимі змінюється в межах від $\varepsilon_{min} = -4,18 \text{ рад/с}^2$ до $\varepsilon_{max} = 4,07 \text{ рад/с}^2$. При цьому коефіцієнт динамічності руху дорівнює $H = 0,297$, а узагальнений коефіцієнт оцінки руху становить $k_p = 0,47$.



Рис. 4. Графіки зміни кутової швидкості привідного вала установки в робочому режимі з одним формувальним візком (1) та з двома візками (2)



Рис. 5. Графіки зміни кутового прискорення привідного вала установки в робочому режимі з одним формувальним візком (1) та з двома візками (2)

Для установки з двома формувальними візками кутове прискорення привідного вала в робочому режимі змінюється в межах від $\epsilon_{min} = -1,14 \text{ рад} / \text{с}^2$ до $\epsilon_{max} = 1,17 \text{ рад} / \text{с}^2$. При цьому коефіцієнт динамічності руху дорівнює $H = 0,085$, а узагальнений коефіцієнт оцінки руху становить $k_p = 0,11$.

Аналізуючи графіки на рис. 2 та 4, можна побачити, що кутова швидкість в робочому режимі для установки з одним формувальним візком та установки з двома формувальними візками має менші межі зміни в порівнянні з холостим режимом. Причому середнє значення кутової швидкості при різних видах навантаження залишається незмінним, а коефіцієнт нерівномірності руху в установці з двома формувальними візками менший у 2,6 рази в порівнянні з установкою з одним формувальним візком.

Проаналізувавши графіки на рис. 3 та 5, можна побачити, що межі зміни кутового прискорення привідного вала для установки з двома формувальними візками значно менші в порівнянні з установкою з одним формувальним візком. Значення коефіцієнта динамічності для установки з двома формувальними візками у 3,5 рази менше в порівнянні з установкою з одним формувальним візком, а значення узагальненого коефіцієнта оцінки руху – у 4,3 рази.

Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Режим	ω_{min} , рад/с	ω_{max} , рад/с	$\omega_{сер}$, рад/с	ϵ_{min} , рад/с ²
XP1	2,8	4,6	3,7	-4,09
XP2	3,32	4,08	3,7	-1,632
PP1	2,92	4,48	3,7	-4,18
PP2	3,37	4,03	3,7	-1,14

	ϵ_{max} , рад/с ²	δ	H	k_p
XP1	4,886	0,486	0,355	0,592
XP2	1,685	0,205	0,123	0,165
PP1	4,07	0,42	0,297	0,47
PP2	1,17	0,161	0,085	0,11

Примітка. XP1, XP2 – холостий режим установки з одним та з двома формувальними візками відповідно; PP1, PP2 – робочий режим установки з одним та з двома формувальними візками відповідно.

На основі даних табл. 1 побудовано графіки зміни коефіцієнта нерівномірності руху (КНР), коефіцієнта динамічності руху (КДР) та узагальненого коефіцієнта оцінки руху (УКОР) в залежності від виду навантаження установки (рис. 6).

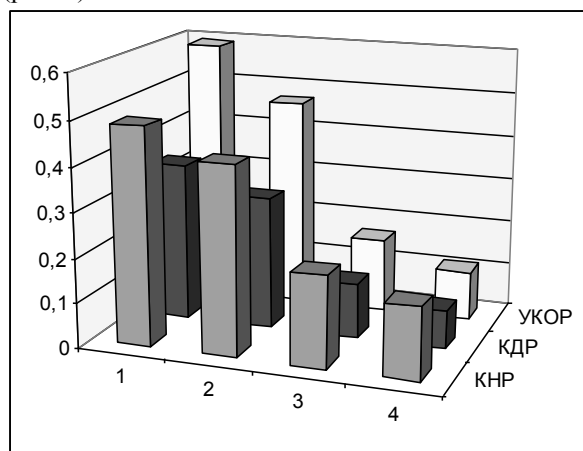


Рис. 6. Графіки зміни коефіцієнта нерівномірності руху (КНР), коефіцієнта динамічності руху (КДР) та узагальненого коефіцієнта оцінки руху (УКОР) в залежності від виду навантаження установки: 1, 2 – холостий хід та робочий режим з одним формувальним візком; 3, 4 – холостий хід та робочий режим з двома формувальними візками

На рис. 7 та 8 зображено графіки зміни зусилля в шатунах в холостому та робочому режимах відповідно.



Рис. 7. Графіки зміни зусилля в шатунах на холостому ході



Рис. 8. Графік зміни зусилля в шатунах в робочому режимі

Аналізуючи графіки на рис. 7 та 8 можна сказати, що зусилля в обох шатунах змінюється за однаковим законом, але зміщенні між собою на кут $\pi/2$. На холостому режимі роботи установки зусилля в шатунах змінюється в межах від $F_{min} = -30H$ до $F_{max} = 30H$ і закон зміни цього зусилля відображає зусилля, що необхідне на подолання сили інерції формувальних візків. На робочому режимі роботи установки зусилля в шатунах змінюється в межах від $F_{min} = -150H$ до $F_{max} = 150H$ і закон зміни цього зусилля уже інший і відображає зусилля, що необхідне на подолання сили інерції формувальних візків, сили опору взаємодії ущільнюючих роликів з бетонною сумішшю та сили опору на переміщення формувальних візків по напрямним руху. Із графіка на рис. 8 видно що одну половину циклу (половину повного оберту кривошипа) шатун працює на розтяг, а іншу – на стиск.

На рис. 9 зображено графік зміни вертикальної сили взаємодії укочуючого ролика з бетонною сумішшю

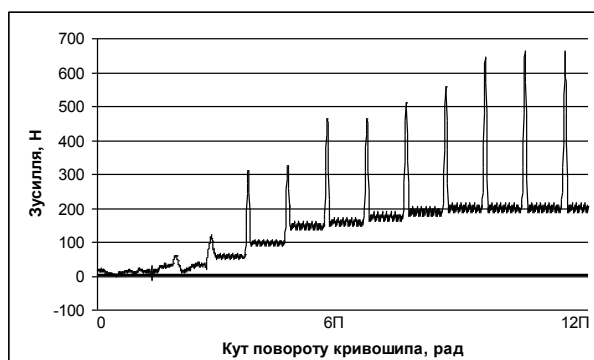


Рис. 9. Графік зміни вертикальної сили взаємодії укочуючого ролика з бетонною сумішшю

Аналізуючи графік на рис. 9 можна сказати, що вертикальна сила взаємодії укочуючого ролика з бетонною сумішшю по мірі ущільнення бетонної суміші зростає до повної стабілізації при повному ущільненні. Піки зусилля на графіку

відповідають моментам, коли укочуючий ролик проходить над датчиками.

На рис. 10 зображено графіки зміни крутного моменту на привідному валу в холостому режимі роботи установки з одним формувальним візком (1) та установки з двома формувальними візками (2) в залежності від кута його повороту.

Крутний момент на привідному валу для установки з одним формувальним візком в холостому режимі змінюється в межах від $M_{min} = 20,3H \cdot m$ до $M_{max} = 49,6H \cdot m$, при цьому його середнє значення становить $M_{сер} = 31,35H \cdot m$.



Рис. 10. Графіки зміни крутного моменту на привідному валу установки в холостому режимі з одним формувальним візком (1) та з двома візками (2)

Відносне значення відхилень крутного моменту визначимо через відносні коефіцієнти

$$K_1 = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{сер}} = \frac{49,6 - 20,3}{31,65} = 0,925; \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{M_{max}}{M_{сер}} = \frac{49,6}{31,65} = 1,567; \quad (7)$$

$$K_3 = \frac{M_{max}}{M_{min}} = \frac{49,6}{20,3} = 2,44. \quad (8)$$

Для установки з двома формувальними візками в холостому режимі крутний момент на привідному валу змінюється в межах від $M_{min} = 29,2H \cdot m$ до $M_{max} = 35,7H \cdot m$, при цьому його середнє значення становить $M_{сер} = 32,95H \cdot m$. Значення відносних коефіцієнтів

$$K_1 = 0,197; \quad K_2 = 1,083; \quad K_3 = 1,22.$$

На рис. 11 зображено графіки зміни крутного моменту на привідному валу в робочому режимі роботи установки з одним формувальним візком (1) та установки з двома формувальними візками (2) в залежності від кута його повороту.



Рис. 11. Графіки зміни крутного моменту на привідному валу установки в робочому режимі з одним формувальним візком (1) та з двома візками (2)

Крутний момент на привідному валу для установки з одним формувальним візком в робочому режимі змінюється в межах від $M_{min} = 42,7H \cdot m$ до $M_{max} = 59,8H \cdot m$, при цьому його середнє значення становить $M_{сер} = 49,6H \cdot m$. Значення відносних коефіцієнтів $K_1 = 0,345$; $K_2 = 1,21$; $K_3 = 1,4$.

Для установки з двома формувальними візками в робочому режимі крутний момент на привідному валу змінюється в межах від $M_{min} = 58,3H \cdot m$ до $M_{max} = 66,7H \cdot m$, при цьому його середнє значення становить $M_{сер} = 62,05H \cdot m$.

Значення відносних коефіцієнтів $K_1 = 0,135$; $K_2 = 1,075$; $K_3 = 1,144$.

Аналізуючи графіки на рис. 10 та 11, можна побачити, що крутний момент на привідному валу в робочому режимі для установки з одним формувальним візком та установки з двома формувальними візками має менші межі зміни в порівнянні з холостим режимом. Причому середнє значення крутного моменту в холостому режимі для установки з двома формувальними візками у 1,04 рази більше ніж для установки з одним формувальним візком, а в робочому режимі – у 1,25 рази.

Також проводилось вимірювання потужності, що необхідна на процес формування.

Результати експериментальних досліджень силових навантажень роликів формувальної установки наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Режим	M_{min} , Н·м	M_{max} , Н·м	$M_{сер}$, Н·м
XP1	20,3	49,6	31,65
XP2	29,2	35,7	32,95

PP1	42,7	59,8	49,6	
PP2	58,3	66,7	62,05	
	K_1	K_2	K_3	P , кВт
XP1	0,925	1,567	2,44	0,102
XP2	0,197	1,083	1,22	0,123
PP1	0,345	1,2	1,4	0,19
PP2	0,135	1,075	1,144	0,23
XP1	K_1	K_2	K_3	P , кВт

Примітка. XP1, XP2 – холостий режим установки з одним та з двома формувальними візками відповідно; PP1, PP2 – робочий режим установки з одним та з двома формувальними візками відповідно.

На основі даних табл. 2 побудовано графіки зміни коефіцієнтів K_1 , K_2 , K_3 (рис. 12) та потужності, що необхідна на процес формування (рис. 13) в залежності від виду навантаження установки.

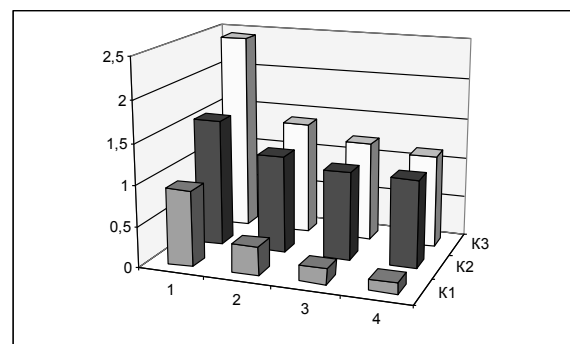


Рис. 12. Графіки зміни коефіцієнтів K_1 , K_2 , K_3 в залежності від виду навантаження:

- 1, 2 – холостий хід та робочий режим з одним формувальним візком;
- 3, 4 – холостий хід та робочий режим з двома формувальними візками

Аналізуючи графіки на рис. 12 та 13, можна побачити, що значення коефіцієнта K_1 для установки з двома формувальними візками в робочому режимі у 2,5 рази менше в порівнянні з установкою з одним формувальним візком, значення коефіцієнта K_2 – у 1,1 разів, значення коефіцієнта K_3 – у 1,22 рази, а значення потужності, що необхідна на процес формування, для установки з двома формувальними візками в робочому режимі у 1,21 разів більше в

порівнянні із установкою з одним формувальним візком при збільшенні продуктивності у 2 рази.

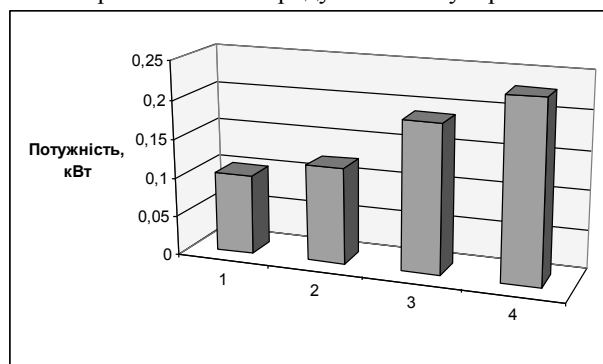


Рис. 13. Графіки зміни потужності, що необхідна для процесу формування в залежності від виду навантаження установки: 1, 2 – холостий хід з одним та з двома формувальними візками відповідно; 3, 4 – робочий режим з одним та з двома формувальними візками відповідно

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що роликотва формувальна установка з рекуперативним приводом з двома формувальними візками має значні переваги над установкою з одним формувальним візком. При цьому коефіцієнт нерівномірності руху

зменшується в 2,6 разів, коефіцієнт динамічності – в 3,5 рази, узагальнений коефіцієнт оцінки руху – в 4,3 рази, а значення потужності, що необхідна на процес формування, у 1,21 разів більше при збільшенні продуктивності у 2 рази.

Література

1. Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. Теорія технічних систем: Навч. посібник. – Київ – Полтава: ІЗМН – ПДТУ, 1998. – 175 с.
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука. – 1975. – 640 с.
3. Ловейкин В.С. Оценка движения механизмов и машин // Подъемно-транспортное оборудование. – К.: Техника. – 1989. – С. 16...18.