

УДК 693.546

Ловейкін В. С., Почка К. І.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РЕВЕРСУВАННЯ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ

В установках роликового формування залізобетонних виробів під час їхньої роботи виникають значні динамічні навантаження в елементах приводного механізму та в елементах формувальних візків [1–6]. Не дивлячись на досить широке дослідження технологічного процесу формування залізобетонних виробів безвібраційним роликовим методом [1–3], до цих пір не було досліджено динаміку руху формувального візка та її вплив на процес формування. Мало приділялось уваги режимам руху формувального візка та зусиллям, що виникають в елементах приводного механізму.

В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликового формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність [1–3]. Разом з тим недостатньо уваги приділено дослідженню діючим динамічним навантаженням та режимам руху, що в значній мірі впливає на роботу установки та на якість готової продукції. Під час постійних пускогальмівних режимів руху виникають значні динамічні навантаження в елементах приводного механізму та в елементах формувального візка, що може привести до передчасного виходу установки з ладу [1–6]. Тому актуальною є задача удосконалення приводного механізму роликової формувальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формувального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

Мета даної роботи полягає в удосконаленні конструкції приводного механізму роликової формувальної установки для підвищення її надійності та довговічності.

Для роликової формувальної установки при ущільненні бетонної суміші бажано мати постійну швидкість зворотно-поступального руху формувального візка на всій ділянці, що позитивно вплинуло б на якість готового виробу. Однак на практиці такий режим руху здійснити неможливо, оскільки в ньому відсутні ділянки розгону та гальмування, без яких не може бути циклічного руху. Тому пропонується реалізувати такий режим руху формувального візка при його переміщенні, у якому були б ділянки реверсування з мінімальними динамічними навантаженнями та ділянки руху з постійною швидкістю.

Для плавного процесу реверсування формувального візка запропоновано здійснювати його за оптимальним режимом руху за прискоренням третього порядку [7]. При цьому швидкість, прискорення та ривок формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, що в свою чергу позитивно впливає на її довговічність.

Критеріями режиму руху механізмів і машин можуть бути коефіцієнти нерівномірності руху та динамічності [7]. В даній роботі в якості критерію режиму руху використана критеріальна дія, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає міру руху або дію системи. Для оптимального режиму реверсування за прискоренням третього порядку критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

$$I_Z = \int_0^{t_p} Z dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де t – час; t_p – тривалість реверсування; Z – енергія прискорень третього порядку:

$$Z = \frac{1}{2} \cdot m \cdot x^{IV}, \quad (2)$$

де m – маса формувального візка; x – прискорення третього порядку.
Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial Z}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial Z}{\partial \overset{IV}{x}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Z}{\partial \overset{IV}{x}} = 0, \quad (3)$$

де x , \dot{x} , \ddot{x} , $\overset{IV}{x}$ – координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок візка.
З виразу (3) можна записати:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \overset{IV}{x}} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial \overset{IV}{x}} = m \cdot x; \quad \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Z}{\partial \overset{IV}{x}} = m \cdot \overset{VIII}{x} = 0. \quad (4)$$

З останнього рівняння (4) отримуємо диференціальне рівняння та його розв'язки:

$$\begin{aligned} \overset{VIII}{x} &= 0; \quad \overset{VII}{x} = C_1; \quad \overset{VI}{x} = C_1 \cdot t + C_2; \quad \overset{V}{x} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \\ \overset{IV}{x} &= \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4; \quad \ddot{x} = \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t^2 + C_4 \cdot t + C_5; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t^2 + C_5 \cdot t + C_6; \\ \dot{x} &= \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t^2 + C_6 \cdot t + C_7; \\ x &= \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot t^2 + C_7 \cdot t + C_8, \end{aligned} \quad (5)$$

де $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$ – постійні інтегрування, які визначаються з граничних умов.

Розділимо процес реверсування на два етапи: гальмування та пуск.

При гальмуванні початковими умовами є: $t=0: x=-x_1; \dot{x}=\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \overset{IV}{x}=0$. Кінцеві умови при гальмуванні: $t=t_2: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \overset{IV}{x}=0$. Тут x_1 – координата початку процесу гальмування; \dot{x}_y – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування.

При пуску початковими умовами є: $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \overset{IV}{x}=0$. Кінцеві умови при пуску: $t=t_n: x=-x_1; \dot{x}=-\dot{x}_y; \ddot{x}=0; \overset{IV}{x}=0$.

Розглянемо процес гальмування. Підставивши крайові умови гальмування у рівняння (5), отримуємо:

$$t=0: C_8=-x_1; C_7=\dot{x}_y; C_6=0; C_5=0; \quad (6)$$

$$t=t_2: \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + C_4 \cdot t_2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язавши систему рівнянь (7), отримуємо постійні інтегрування C_1, C_2, C_3 та C_4 :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 50400 \cdot \left(\frac{\dot{x}_y}{t_2^6} - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); & C_2 &= 1440 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} - 18 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} \right); \\
 C_3 &= 360 \cdot \left(15 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right); & C_4 &= 120 \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} - 4 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} \right).
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (6) та (8) у систему (5) отримаємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості \dot{x}_y до повної зупинки:

$$\begin{aligned}
 {}^{IV}x &= 8400 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^6} + 720 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^5} + \\
 &+ 360 \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2^4} + 120 \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{1}{t_2^3}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

або

$${}^{IV}x = \frac{120}{t_2^3} \cdot \left[\begin{aligned} &70 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 6 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 3 \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \end{aligned} \right].
 \tag{10}$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі гальмування з урахуванням виразів (2) та (10) матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 I_{Z_2} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} x^2 dt = \frac{7200 \cdot m}{t_2^6} \cdot \int_0^{t_2} \left[\begin{aligned} &70 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 6 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 3 \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \\
 &= \frac{7200 \cdot m}{t_2^6} \cdot \int_0^{t_2} \left[\begin{aligned} &4900 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_2^6} + 840 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^5}{t_2^5} + \\ &+ 36 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 420 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + \\ &+ \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 36 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &+ 9 \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 140 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &+ 12 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 6 \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_2} \end{aligned} \right] dt =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[\begin{aligned} &700 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \frac{36}{5} \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 3 \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \\ &+ \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 140 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) + \\ &+ 84 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + 9 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + \\ &+ 35 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) + 4 \cdot \left(35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) + \\ &+ 3 \cdot \left(15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \end{aligned} \right] = \\
 &= \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[7 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right].
 \end{aligned} \tag{11}$$

Розглянемо процес пуску. Підставивши крайові умови пуску у рівняння (5), отримуємо:

$$t = 0: C_5 = 0; C_6 = 0; C_7 = 0; C_8 = 0; \tag{12}$$

$$t = t_n: \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_n^6 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_n^4 = -x_1; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_n^3 = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_n^2 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_n^2 + C_4 \cdot t_n = 0. \end{cases} \tag{13}$$

Розв'язавши систему рівнянь (13), отримуємо постійні інтегрування C_1 , C_2 , C_3 та C_4 :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 50400 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} - \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} \right); & C_2 &= 1440 \cdot \left(17 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\
 C_3 &= 360 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} - 13 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} \right); & C_4 &= 120 \cdot \left(3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right).
 \end{aligned} \tag{14}$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (12) та (14) у систему (5) отримуємо функцію зміни прискорення третього порядку формувального візка в процесі пуску від нерухомого стану до руху з усталеною швидкістю \dot{x}_y :

$$\begin{aligned}
 x^{IV} &= 8400 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^6} + 720 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^5} + \\
 &+ 360 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n^4} + 120 \cdot \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{1}{t_n^3}
 \end{aligned} \tag{15}$$

або

$$IV_x = \frac{120}{t_n^3} \cdot \left[\begin{aligned} &70 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 6 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 3 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \end{aligned} \right]. \quad (16)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (2) та (16) матиме вигляд:

$$I_{Zn} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{7200 \cdot m}{t_n^6} \cdot \int_0^{t_n} \left[\begin{aligned} &70 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 6 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 3 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \end{aligned} \right]^2 dt =$$

$$= \frac{7200 \cdot m}{t_n^6} \cdot \int_0^{t_n} \left[\begin{aligned} &4900 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_n^6} + 36 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 9 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 840 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + 6 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \\ &+ 420 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 140 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ &+ 36 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right)^2 + \\ &+ 12 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} \end{aligned} \right] dt =$$

$$= \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[\begin{aligned} &700 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 + \frac{36}{5} \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + 3 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \\ &+ 140 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + 3 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) + \\ &+ 84 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) + 35 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) + \\ &+ 9 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) + \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right)^2 + \\ &+ 4 \cdot \left(17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \right) \end{aligned} \right] = \quad (17)$$

$$= \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[7 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right].$$

Загальний критерій оптимальності руху в процесі реверсування з урахуванням виразів (11) та (17) буде визначатися наступним виразом:

$$I_Z = I_{Z_2} + I_{Z_n} = \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[7 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right] + \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[7 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (18)$$

Прийнявши рівність часу гальмування візка та його пуску $t_2 = t_n = t_1$, вираз (18) можна подати у наступному вигляді:

$$I_Z = \frac{7200 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[14 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^2} - 14 \cdot \frac{x_1}{t_1} \cdot \dot{x}_y + \frac{18}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (19)$$

Для забезпечення виконання нерівності (1) необхідно виконати умову:

$$\frac{\partial I_Z}{\partial x_1} = \frac{7200 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[28 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = \frac{7200 \cdot m}{t_1^6} \cdot \left[28 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 14 \cdot \dot{x}_y \right] = 0. \quad (20)$$

Із виразу (20) можна отримати:

$$28 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 14 \cdot \dot{x}_y = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (21)$$

Підставивши другий вираз (21) у рівності (6) та (8) отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формуального візка:

$$\begin{aligned} C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \\ C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_8 = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \end{aligned} \quad (22)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (22) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формуального візка в процесі гальмування:

$$\begin{aligned} x = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left(2 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 2 \cdot t + t_1 \right); \quad \dot{x} = -\dot{x}_y \cdot \left(6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 1 \right); \\ \ddot{x} = -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Підставивши другий вираз (21) у рівності (12) та (14) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формуального візка:

$$\begin{aligned} C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \\ C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (24) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формуального візка в процесі пуску:

$$\begin{aligned} x = -\dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^6}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + \frac{5}{2} \cdot \frac{t^4}{t_1^3} \right); \quad \dot{x} = -\dot{x}_y \cdot \left(6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right); \\ \ddot{x} = -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

На усталеному режимі руху формувального візка координата переміщення, швидкості, прискорення та ривка його центра мас описуються рівняннями [7]:

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0, \quad (26)$$

де x_{0y} та x_{1y} – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі; t_y – тривалість усталеного руху.

У виразах (26) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі x_{0y} приймаємо рівною x_1 . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше Δx , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити $x_{1y} = \Delta x - x_1$.

Підставивши отримані координати x_{0y} та x_{1y} у другий вираз (26) отримано залежність для визначення швидкості руху візка на усталеному режимі \dot{x}_y :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + t_1}. \quad (27)$$

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше t_3 , його можна розділити на три частини: час пуску – t_n ; час усталеного руху – t_y ; час гальмування – t_2 . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад, $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$, тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами: $t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$.

Після цього вирази швидкості руху візка на усталеному режимі та координати x_1 матимуть вигляд:

$$\dot{x}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{\Delta x}{10}. \quad (28)$$

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (28) у рівності (23), (25) та (26), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right); \quad \dot{x} = \frac{2592 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \quad (29)$$

$$\ddot{x} = 7776 \cdot \Delta x \cdot \left(36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = 15552 \cdot \Delta x \cdot \left(72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right);$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{10} \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad (30)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned}
 x &= \Delta x - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right); \\
 \dot{x} &= -\frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(46656 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right); \\
 \ddot{x} &= -7776 \cdot \Delta x \cdot \left(36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = -15552 \cdot \Delta x \cdot \left(72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right).
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка $\Delta x = 0,4 \text{ м}$ та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше $t_3 = 3 \text{ с}$, за виразами (29)-(31) було розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 1, а), швидкості (рис. 1, б), прискорення (рис. 1, в) та ривка (рис. 1, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше з оптимальним режимом реверсування за прискоренням третього порядку.

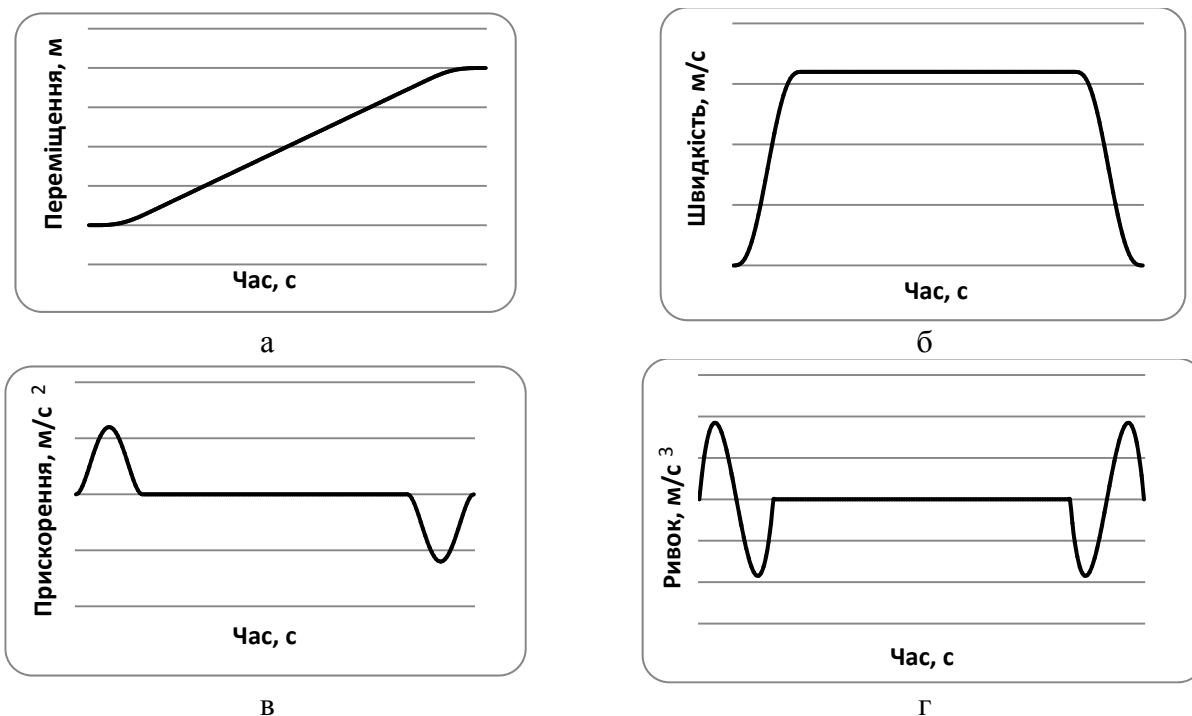


Рис. 1. Графіки зміни переміщення (а), швидкості (б), прискорення (в) та ривка (г) при русі формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням третього порядку

Перетворивши перші рівняння виразів (29)–(31) для випадку, коли початок координат відраховується від середнього положення переміщення формувального візка, отримаємо:

– на ділянці пуску:

$$x = \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2};
 \tag{32}$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right);
 \tag{33}$$

– на ділянці гальмування:

$$x = \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right). \quad (34)$$

Закон руху візка, описаний рівняннями (32)–(34), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2) зворотно-поступального руху візка. При цьому рух візка в одному напрямку здійснюється за рахунок повороту кулачка 1 на половину оберту (тобто $\varphi = \pi$) і в зворотному напрямку ще на половину оберту; повний цикл руху візка – за один оберт кулачка.

Для здійснення описаного закону руху візка необхідно, щоб приріст радіуса кулачка відповідав приросту переміщення візка. Згідно з цим перемінний радіус кулачка визначається залежностями:

– на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (35)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (36)$$

– на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right), \quad (37)$$

де b – відстань між штовхачами 2 (рис. 2).

Час t можна виключити із залежностей (35)–(37), оскільки $t = \frac{\varphi}{\omega}$, а $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$.

Тут φ – кутова координата повороту кулачка, а ω – кутова швидкість обертання кулачка.

Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$, то процес пуску

буде здійснюватись при повороті кулачка на кут в межах від $\varphi = 0$ до $\varphi = \frac{\pi}{6}$; час усталеного

руху – $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$, тоді усталений рух візка буде забезпечуватись поворотом кулачка

на кут в межах від $\varphi = \frac{\pi}{6}$ до $\varphi = \frac{5\pi}{6}$; час гальмування – $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$, тоді процес гальмування

буде здійснюватись при повороті кулачка на кут в межах від $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ до $\varphi = \pi$. Після відпо-

відних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(72 \cdot \frac{\varphi^6}{\pi^6} - 36 \cdot \frac{\varphi^5}{\pi^5} + 5 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} \right) - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (38)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[3 \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (39)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[\begin{aligned} &15552 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6}\right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 7776 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6}\right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ &+ 1080 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6}\right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 2 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6}\right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{1}{6} \end{aligned} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (40)$$

Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від π до 2π , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[72 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^6}{\pi^6} - 36 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^5}{\pi^5} + 5 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (41)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{2 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[1 - 3 \cdot \left(\varphi - \frac{7\pi}{6}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (42)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left[\begin{aligned} &15552 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6}\right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 7776 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6}\right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ &+ 1080 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6}\right)^4 \cdot \frac{1}{\pi^4} - 2 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6}\right) \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{1}{6} \end{aligned} \right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (43)$$

Для унеможливлення ударів кулачка об штовхачі при зміні напрямку руху візка описаний рівняннями (38)–(43) профіль кулачка (рис. 3) має такий вид, що в будь-якому положенні його діаметр d – величина постійна і рівна відстані між штовхачами b ($d = b$).

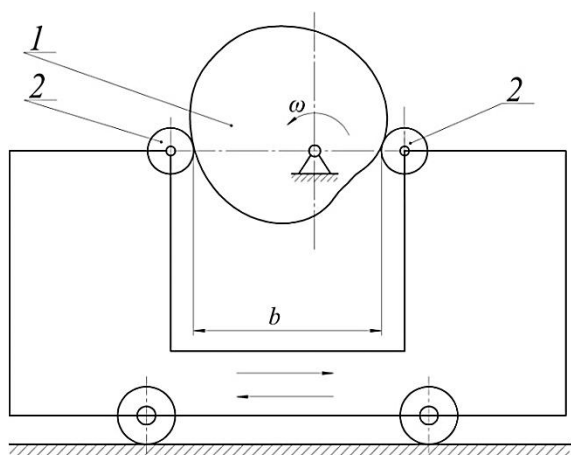


Рис. 2. Схема механізму з кулачковим приводом зворотно-поступального руху візка

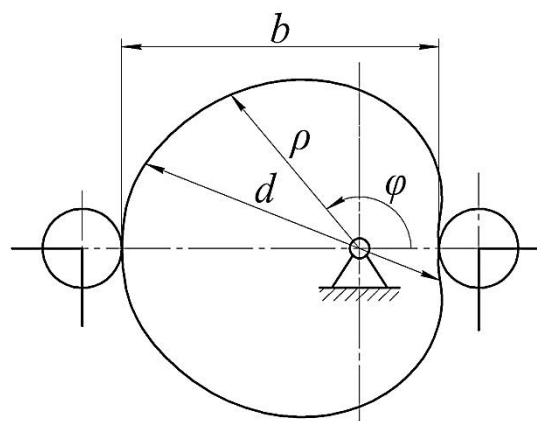


Рис. 3. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка

З метою зменшення динамічних навантажень в елементах установки та для підвищення її надійності запропоновано конструкцію установки з приводним механізмом для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням третього порядку (рис. 4). Приводний механізм виконаний у вигляді шарнірно встановлених на порталі кулачкових механізмів, що контактують з штовхачами, жорстко прикріпленими до формувального візка.

Установка вміщує змонтований на нерухомому порталі 1 формувальний візок 2, що вміщує подавальний бункер 3 та уочувальні ролики 4 і здійснює зворотно-поступальний рух в напрямках 5 над порожниною форми 6. Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою двох приводів 7, прикріплених до порталу 1 у вигляді двох кулачкових механізмів, що обертаються з постійною кутовою швидкістю ($\omega = const$), але різною за напря-

мами, і контактують з двома штовхачами 8, жорстко з'єднаними з візком 2. Наявність двох штовхачів 8 з кожного боку формувального візка 2 дозволяє створювати жорсткий силовий ланцюг при його прямому і зворотному ході.

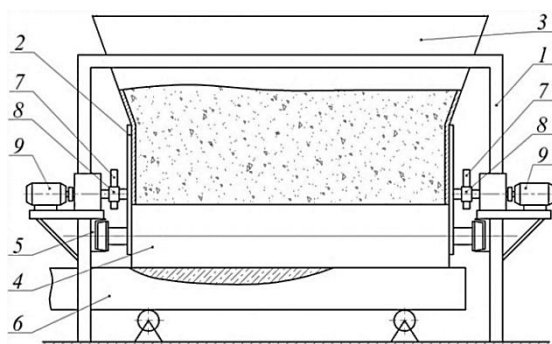


Рис. 4. Роликова формувальна установка з кулачковим приводним механізмом

При застосуванні в установці кулачкового приводного механізму з кожного боку формувального візка унеможливується його осьове перекошування, підвищується якість поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшуються динамічні навантаження в елементах приводу, зменшуються зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується довговічність установки в цілому.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розроблено конструкцію її приводу у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням третього порядку.
2. Запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з кулачковим приводним механізмом з обох боків формувального візка для унеможливлення його осьового перекошування, що в свою чергу приводить до підвищення якості поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшення динамічних навантажень в елементах приводу, зменшення зайвих руйнівних навантажень на рамну конструкцію і, відповідно, до підвищення довговічності установки в цілому.
3. Результати роботи можуть в подальшому бути корисними для уточнення та удосконалення існуючих інженерних методів розрахунку приводних механізмів машин роликового формування як на стадіях проектування/конструювання, так і в режимах реальної експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гарнець В. М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси. / В. М. Гарнець – К. : Будівельник, 1991. – 144 с.
2. Кузин В. Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов. / В. Н. Кузин. – Автореф. дис... канд. наук. – М. – 1981. – 20 с.
3. Рюшин В. Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей. / В. Т. Рюшин. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К. – 1986.
4. Ловейкін В. С. Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. I-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507–514.
5. Ловейкін В. С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2007. – № 59, Том 1. – С. 465–474.
6. Ловейкін В. С. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – НУ «Львівська політехніка», 2007. – № 41. – С. 127–134.
7. Ловейкін В. С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Учебное пособие. / В. С. Ловейкин. – Киев : УМК ВО, 1990. – 168 с.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2015 р.