



УДК 693.546

*В.С. Ловейкін, д.т.н., професор;
К.І. Почка, к.т.н., доцент*

ОБГРУНТУВАННЯ КРАЙОВИХ РИВКІВ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМУ РЕЖИМІ РЕВЕРСУВАННЯ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

АНОТАЦІЯ. З метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступального руху формувального візка з реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку. Розроблено конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення комбінованого режиму зворотно-поступального руху формувального візка. Також запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки.

Ключові слова: роликова формувальна установка, режим руху, кулачковий механізм, кроковий двигун, привод.

SUMMARY. For the purpose of increase of reliability and durability of roller forming installation the combined mode of back and forth motion of the forming cart with a reversal under optimum regional conditions on acceleration of the third order is calculated. The design of the drive of installation in a type of the cam mechanism is developed and the cam profile for providing the combined mode of back and forth motion of the forming cart is constructed. The design of roller forming installation with the drive from the high-moment step engine which is built in the rolling rollers of the forming cart of installation is also offered.

Key words: roller forming installation, movement mode, cam mechanism, step engine, drive.

Постановка проблеми. 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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликового формування залізобетонних виробів обгрунтовано 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.

Метою даної роботи є удосконалення конструкції приводного механізму роликової формувальної установки для підвищення її надійності та довговічності.

Виклад основного матеріалу дослідження. 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:

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

де x , \dot{x} , \ddot{x} , $\overset{IV}{x}$ – координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок візка.

З виразу (3) можна записати:

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

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

$$\overset{VIII}{x} = 0; \quad \overset{VII}{x} = C_1; \quad \overset{VI}{x} = C_1 \cdot t + C_2; \quad \overset{V}{x} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3;$$

$$\overset{IV}{x} = \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4; \quad \ddot{x} = \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t^2 + C_4 \cdot t + C_5;$$

$$\dot{x} = \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t^2 + C_5 \cdot t + C_6; \quad (5)$$

$$\dot{x} = \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t^2 + C_6 \cdot t + C_7;$$

$$x = \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot t^2 + C_7 \cdot t + C_8,$$

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: $t=t_2: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \overset{IV}{x}=b$. Тут x_1 – координата початку процесу гальмування; \dot{x}_y – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування, b – ривок візка в кінці етапу гальмування.

При пуску початковими умовами є: $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \overset{IV}{x}=b$. 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:

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

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

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

$$\begin{aligned} C_1 &= 840 \cdot \left(\frac{b}{t_2^4} + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); & C_2 &= 360 \cdot \left(-\frac{b}{t_2^3} - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} \right); \\ C_3 &= 60 \cdot \left(\frac{b}{t_2^2} + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right); & C_4 &= 4 \cdot \left(-\frac{b}{t_2} - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

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:

$$\begin{aligned} {}^{IV}x &= 140 \cdot \left(b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^4} + 180 \cdot \left(-b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^3} + \\ &+ 60 \cdot \left(b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2^2} + 4 \cdot \left(-b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{1}{t_2} \end{aligned} \quad (9)$$

або

$${}^{IV}x = \frac{4}{t_2} \cdot \left[\begin{aligned} &35 \cdot \left(b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 45 \cdot \left(-b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 15 \cdot \left(b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left(-b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right]. \quad (10)$$

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

$$I_{Zz} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} {}^{IV}x^2 dt = \frac{8 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[\begin{aligned} &35 \cdot \left(b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 45 \cdot \left(-b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 15 \cdot \left(b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left(-b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right]^2 dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{8 \cdot m}{t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[\begin{aligned} &1225 \left(b + 60 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^6}{t_2^6} + 3150 \left(b + 60 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left(-b - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^5}{t_2^5} + \\ &+ 2025 \left(-b - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^4}{t_2^4} + 1050 \left(b + 60 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left(b + 90 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^4}{t_2^4} + \\ &+ 225 \left(b + 90 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 \frac{t^2}{t_2^2} + 70 \left(b + 60 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left(-b - 120 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &+ \left(-b - 120 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + 1350 \left(-b - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left(b + 90 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &+ 90 \left(-b - 72 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left(-b - 120 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 30 \left(b + 90 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \left(-b - 120 \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t}{t_2} \end{aligned} \right] dt = \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_2} \cdot \left[\begin{aligned} &175 \cdot \left(b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + 525 \cdot \left(b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left(-b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\ &+ 405 \cdot \left(-b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + 210 \cdot \left(b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left(b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\ &+ 75 \cdot \left(b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \frac{35}{2} \cdot \left(b + 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left(-b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\ &+ \left(-b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right)^2 + \frac{675}{2} \cdot \left(-b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left(b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\ &+ 30 \cdot \left(-b - 72 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 140 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left(-b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) + \\ &+ 15 \cdot \left(b + 90 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 168 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \left(-b - 120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 210 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right] = \quad (11) \\
&= \frac{8 \cdot m}{t_2} \cdot \left[b^2 + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} \cdot b - 105 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^6} \right].
\end{aligned}$$

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

$$t = 0: \quad C_5 = b; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad (12)$$

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

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



$$\begin{aligned}
 C_1 &= 840 \cdot \left(\frac{b}{t_n^4} - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right); & C_2 &= 480 \cdot \left(-\frac{b}{t_n^3} + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\
 C_3 &= 120 \cdot \left(\frac{b}{t_n^2} - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right); & C_4 &= 8 \cdot \left(-2 \cdot \frac{b}{t_n} + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right).
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

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

$$\begin{aligned}
 {}^{IV}x &= 140 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^4} + 240 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^3} + \\
 &+ 120 \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n^2} + 8 \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{1}{t_n}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

або

$${}^{IV}x = \frac{4}{t_n} \cdot \left[\begin{aligned} &35 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 60 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 30 \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + 2 \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \end{aligned} \right].
 \tag{16}$$

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

$$\begin{aligned}
 I_{Zn} &= \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{8 \cdot m}{t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[\begin{aligned} &35 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 60 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 30 \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + 2 \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \\
 &= \frac{8 \cdot m}{t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[\begin{aligned} &1225 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_n^6} + 3600 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\ &+ 900 \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 4 \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + \\ &+ 4200 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + \\ &+ 2100 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\ &+ 140 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ &+ 3600 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ &+ 240 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 120 \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n} \end{aligned} \right] dt =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[175 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 700 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \right. \\
& + 720 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 420 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
& + 300 \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 35 \cdot \left(b - 60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
& + 4 \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right)^2 + 900 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
& + 80 \cdot \left(-b + 51 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) + \\
& \left. + 60 \cdot \left(b - 39 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \left(-2 \cdot b + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \right] = \\
& = \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[b^2 - 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6} \right]. \quad (17)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
I_Z = I_{Zz} + I_{Zn} = & \frac{8 \cdot m}{t_z} \cdot \left[b^2 + 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_z^2} \cdot b - 105 \cdot \frac{x_1}{t_z^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_z^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_z^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_z^6} \right] + \\
& + \frac{8 \cdot m}{t_n} \cdot \left[b^2 - 45 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 105 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + 1620 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 6300 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 6300 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6} \right]. \quad (18)
\end{aligned}$$

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

$$I_Z = \frac{8 \cdot m}{t_1} \cdot \left[2 \cdot b^2 + 3240 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^4} - 12600 \cdot \frac{x_1}{t_1^5} \cdot \dot{x}_y + 12600 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^6} \right]. \quad (19)$$

Для забезпечення виконання нерівності (1) необхідно виконати умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_Z}{\partial x_1} = \frac{8 \cdot m}{t_1} \cdot \left[25200 \cdot \frac{x_1}{t_1^6} - 12600 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5} \right] = \frac{100800 \cdot m}{t_1^6} \cdot \left[2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Z}{\partial b} = \frac{8 \cdot m}{t_1} \cdot [4 \cdot b] = \frac{32 \cdot m}{t_1} \cdot b = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Із виразів (20) можна отримати:

$$\begin{cases} \left[2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y \right] = 0 \\ b = 0 \end{cases} \Rightarrow x_1 = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (21)$$

Підставивши два останні вирази (21) у рівності (6) та (8) отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формувального візка:

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



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

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

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

Підставивши два останні вирази (21) у рівності (12) та (14) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формульовального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3};$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0. \quad (24)$$

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

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

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

На усталеному режимі руху формульовального 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 формульовального 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 формульовальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу прийемо 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 рівка візка

– на ділянці пуску:

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

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

– на ділянці усталеного руху:

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

– на ділянці гальмування:

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

$$\dot{x} = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(46656 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right); \quad (31)$$

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

Задавши 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 рівка (рис. 1, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку з режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку.

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

– на ділянці пуску:

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

– на ділянці усталеного руху:

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

– 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:

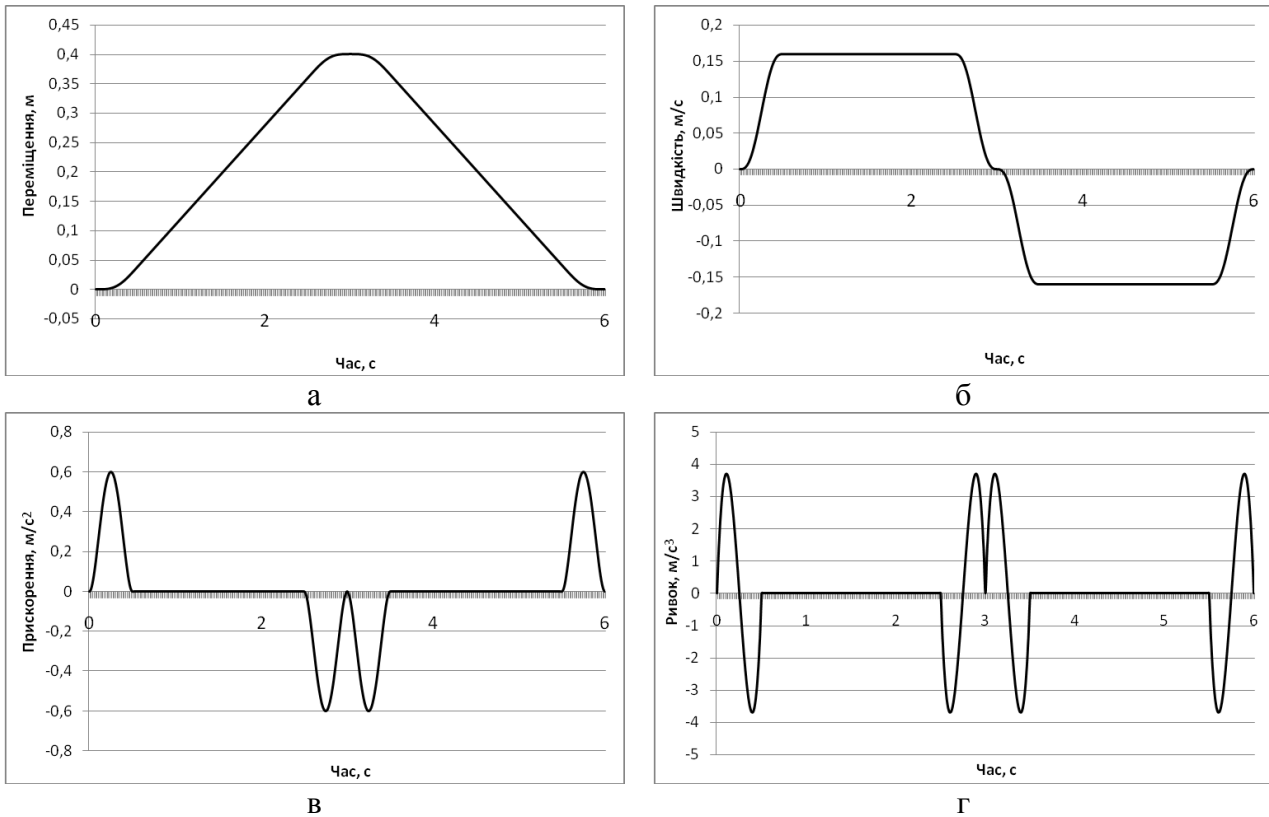


Рисунок 1. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку.

– 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 $\varphi = 5\pi/6$ до $\varphi = \pi$. Після відповідних 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 ($d = b$).

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.

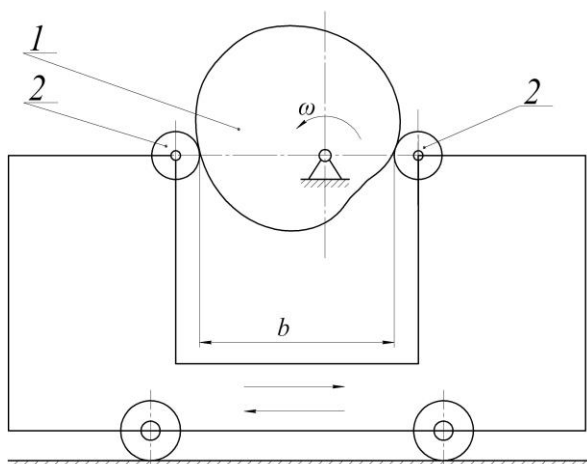


Рисунок 2. Схема механізму з кулачковим приводом зворотно-поступального руху візка.

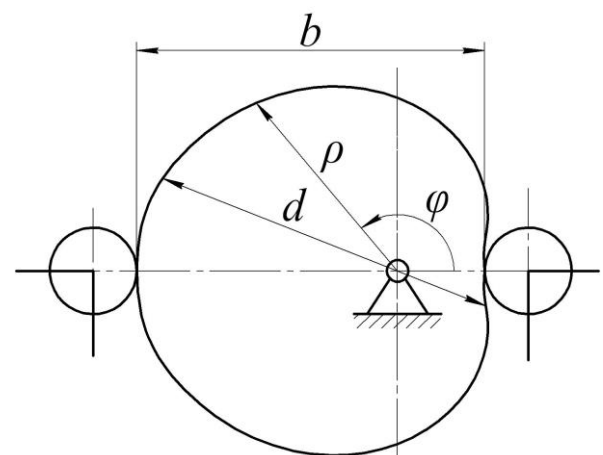


Рисунок 3. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка.



Установка вміщує змонтований на нерухомому порталі 1 формувальний візок 2, що вміщує подавальний бункер 3 та укочувальні ролики 4 і здійснює зворотньо-поступальний рух в напрямних 5 над порожниною форми 6. Візок приводиться в зворотньо-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 напрямками, 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 зворотньому ході.

При застосуванні в установці кулачкового приводного механізму з кожного боку формувального візка унеможлиблюється 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.

Закон руху візка, описаний наведеними вище рівняннями, також може бути здійснений приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки. При цьому закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна, виходячи з виразів (29)-(31), описується рівняннями:

– на ділянці пуску:

$$\dot{\varphi}_n = \frac{2592 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left(108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \quad (44)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\dot{\varphi}_y = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3 \cdot R}; \quad (45)$$

– на ділянці гальмування:

$$\dot{\varphi}_z = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left(46656 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right), \quad (46)$$

де R – радіус укочувальних роликів.

Прийнявши час розгону формувального візка $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$, час усталеного руху – $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ та час гальмування – $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$, отримуємо закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна при русі формувального візка від одного крайнього положення до іншого:

$$\dot{\varphi} = \frac{2592 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left(108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right), \quad 0 \leq t \leq \frac{t_3}{6}; \quad (47)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3 \cdot R}, \quad \frac{t_3}{6} < t < \frac{5 \cdot t_3}{6}; \quad (48)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left[46656 \cdot \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} - 19440 \cdot \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_3^5} + \right. \\ \left. + 2160 \cdot \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^3 \cdot \frac{1}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right], \quad \frac{5 \cdot t_3}{6} < t \leq t_3. \quad (49)$$

Аналогічно визначається закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна при русі формувального візка у зворотньому напрямку:

$$\dot{\varphi} = -\frac{2592 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left(108 \cdot \frac{(t-t_3)^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{(t-t_3)^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{(t-t_3)^3}{t_3^4} \right), \quad t_3 \leq t \leq \frac{7 \cdot t_3}{6}; \quad (50)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3 \cdot R}, \quad \frac{7 \cdot t_3}{6} < t < \frac{11 \cdot t_3}{6}; \quad (51)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left[46656 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} - 19440 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_3^5} + \right. \\ \left. + 2160 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^3 \cdot \frac{1}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right], \quad \frac{11 \cdot t_3}{6} < t \leq 2 \cdot t_3. \quad (52)$$

Також запропоновано конструкцію роликів формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка з режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку (рис. 4). Установка складається з формувального візка 1, що змонтований на порталі 2, і здійснює зворотно-поступальний рух у напрямних 3 над порожниною форми 4. Формувальний візок вміщує подавальний бункер 5 та укочувальні ролики 6 на осі 7.

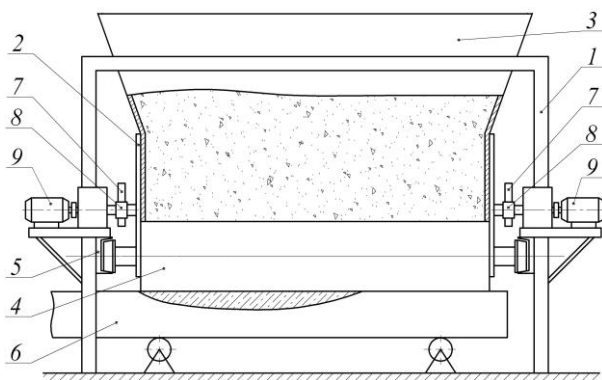


Рисунок 4. Роликів формувальна установка з кулачковим приводним механізмом.

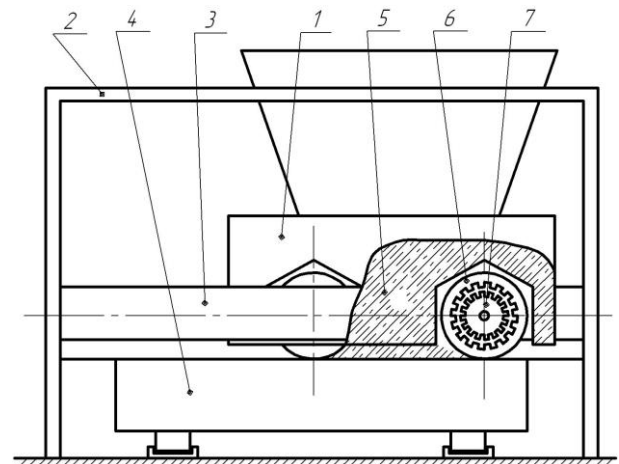


Рисунок 5. Роликів формувальна установка з приводом від крокового двигуна.

Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою високомоментного крокового двигуна, який вмонтовано в ролики, причому вісь ролика виконує роль статора, а сам ролик – ротора [8].

При застосуванні в установці приводу від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики, закон зміни кутової швидкості якого описаний наведеними вище рівняннями, підвищується якість поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшуються динамічні навантаження в елементах приводного механізму, зникають зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується надійність та довговічність установки в цілому.

Висновки.

1. В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликів формувальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступально-го руху формувального візка з реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку. Встановлено, що оптимальне значення ривка візка в кінці етапу гальмування дорівнює нулю.



2. Розроблено конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка з реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку.

3. Запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки.

4. Застосування в установці приводу від кулачкового механізму або від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики, які реалізують режим реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням третього порядку приводить до підвищення якості поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшення динамічних навантажень в елементах приводного механізму, зникненню зайвих руйнівних навантажень на рамну конструкцію і, відповідно, до підвищення надійності та довговічності установки в цілому.

5. 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.

Література

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. І-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. Ловейкин В.С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Учебное пособие. / В.С. Ловейкин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.
8. Патент України на винахід № 105744 кл. В28В13/00: Установка для формирования виробів з бетонних сумішей. / Ловейкін В.С., Почка К.І., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г. – Бюл. № 11 від 10.06.2014 р.