

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РЕВЕРСУВАННЯ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

***В. С. Ловейкін, доктор технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України***

***К. І. Почка, кандидат технічних наук
Київський національний університет будівництва і
архітектури
e-mail: shanovniy@ukr.net***

Анотація. З метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано оптимальний режим зворотно-поступального руху формувального візка з реверсуванням за прискоренням четвертого порядку. Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при оптимальному режимі реверсування за прискоренням четвертого порядку. Запропоновано конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення оптимального режиму зворотно-поступального руху формувального візка з реверсуванням за прискоренням четвертого порядку.

В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано оптимальний режим реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку.

Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при оптимальному режимі реверсування за прискоренням четвертого порядку.

Запропоновано конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення оптимального режиму реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку.

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. Також результати роботи можуть бути корисними при проектуванні або удосконаленні механізмів із зворотно-поступальним рухом виконавчих елементів.

Ключові слова: *роликівна формувальна установка, режим руху, кулачковий механізм, привод*

Постановка проблеми. В установках роликівного 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 роликівним 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. В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликівного 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 роликівної формувальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формувального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

Мета досліджень полягає в удосконаленні конструкції приводного механізму роликівної формувальної установки для підвищення її надійності та довговічності.

Результати досліджень. Для роликівної 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 четвертого порядку [7]. При цьому швидкість, прискорення, прискорення другого порядку (ривок) та прискорення третього порядку (відчуття) 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 четвертого порядку критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

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

де: t – час; t_p – тривалість реверсування; Q – енергія прискорень четвертого порядку:

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

де: m – маса формувального візка; x – прискорення четвертого порядку.

Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial Q}{\partial \ddot{x}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial Q}{\partial \overset{IV}{x}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Q}{\partial \overset{IV}{x}} - \frac{d^5}{dt^5} \frac{\partial Q}{\partial \overset{V}{x}} = 0, \quad (3)$$

де: x , \dot{x} , \ddot{x} , $\overset{IV}{x}$ – координата переміщення, швидкість, прискорення, прискорення другого порядку (ривок) та прискорення третього порядку (відчуття) візка відповідно.

З виразу (3) можна записати:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \overset{IV}{x}} = 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial \overset{V}{x}} = m \cdot x; \quad \frac{d^5}{dt^5} \frac{\partial Q}{\partial \overset{V}{x}} = m \cdot \overset{x}{x} = 0. \quad (4)$$

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot t^2 + C_7 \cdot t + C_8; \\
\dot{x} &= \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_5 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_6 \cdot t^3 + \\
&+ \frac{1}{2} \cdot C_7 \cdot t^2 + C_8 \cdot t + C_9; \\
x &= \frac{1}{362880} C_1 \cdot t^9 + \frac{1}{40320} C_2 \cdot t^8 + \frac{1}{5040} C_3 \cdot t^7 + \frac{1}{720} C_4 \cdot t^6 + \frac{1}{120} C_5 \cdot t^5 + \frac{1}{24} C_6 \cdot t^4 + \\
&+ \frac{1}{6} C_7 \cdot t^3 + \frac{1}{2} C_8 \cdot t^2 + C_9 \cdot t + C_{10},
\end{aligned} \tag{5}$$

де: $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}$ – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов.

Розділимо процес реверсування на два етапи: гальмування та пуск. При гальмуванні початковими умовами є: $t=0: x=-x_1; \dot{x}=\dot{x}_0; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0; \overset{IV}{x}=0$. Кінцеві умови при гальмуванні: $t=t_a: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0; \overset{IV}{x}=0$. Тут x_1 – координата початку процесу гальмування; \dot{x}_0 – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування.

При пуску початковими умовами є: $t=0: x=0; \dot{x}=0; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0; \overset{IV}{x}=0$. Кінцеві умови при пуску: $t=t_i: x=-x_1; \dot{x}=-\dot{x}_0; \ddot{x}=0; \ddot{\ddot{x}}=0; \overset{IV}{x}=0$.

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

$$\begin{aligned}
t=0: \quad & C_{10} = -x_1; \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_8 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_6 = 0; \tag{6} \\
t=t_2: \quad & \begin{cases} \frac{1}{362880} \cdot C_1 \cdot t_2^9 + \frac{1}{40320} \cdot C_2 \cdot t_2^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_3 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_4 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_5 \cdot t_2^5 + \\ + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t_2^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_5 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t_2^3 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t_2^2 = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 + C_5 \cdot t_2 = 0. \end{cases} \tag{7}
\end{aligned}$$

Розв'язавши систему рівнянь (7), отримуємо постійні інтегрування C_1, C_2, C_3, C_4 та C_5 :

$$\begin{aligned}
C_1 &= 12700800 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2^9} - \frac{\dot{x}_y}{t_2^8} \right); \quad C_2 = 201600 \cdot \left(32 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^7} - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2^8} \right); \quad C_5 = 1680 \cdot \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} - 5 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} \right); \\
C_3 &= 100800 \cdot \left(28 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} \right); \quad C_4 = 20160 \cdot \left(8 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} \right). \tag{8}
\end{aligned}$$

Після підстановки визначених постійних інтегрування (6) та (8)

у систему (5) отримаємо функцію зміни прискорення четвертого порядку формувального візка в процесі гальмування від усталеної швидкості \dot{x}_y до повної зупинки:

$$v_x = 529200 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^8} + 33600 \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^7} + 50400 \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^6} + 20160 \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2^5} + 1680 \cdot \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{1}{t_2^4} \quad (9)$$

або

$$v_x = \frac{1680}{t_2^4} \cdot \left[3150 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 20 \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 30 \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 12 \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) \right] \quad (10)$$

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

$$I_{Qz} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} v_x^2 dt = \frac{1411200 \cdot m}{t_2^8} \cdot \int_0^{t_2} \left[3150 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 20 \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 30 \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 12 \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) \right]^2 dt =$$

$$= \frac{1411200 \cdot m}{t_2^8} \cdot \int_0^{t_2} \left[99225 \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right)^2 \frac{t^8}{t_2^8} + 400 \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \frac{t^6}{t_2^6} + 900 \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \frac{t^4}{t_2^4} + 144 \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \frac{t^2}{t_2^2} + \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 12600 \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \frac{t^7}{t_2^7} + 18900 \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^6}{t_2^6} + 7560 \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \frac{t^5}{t_2^5} + 630 \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^4}{t_2^4} + 1200 \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^5}{t_2^5} + 480 \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \frac{t^4}{t_2^4} + 40 \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^3}{t_2^3} + 720 \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + 60 \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^2}{t_2^2} + 24 \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t}{t_2} \right] dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1411200 \cdot m}{t_2^7} \cdot \left[\begin{aligned}
&11025 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right)^2 + \frac{400}{7} \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \\
&+ 180 \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 48 \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \\
&+ 1575 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + 2700 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) + \\
&+ 1260 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + 126 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \cdot \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) + \\
&+ 200 \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) + 96 \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + \\
&+ 10 \cdot \left(32 \cdot \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) + 180 \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + \\
&+ 20 \cdot \left(27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right) + 12 \cdot \left(8 \cdot \dot{x}_y - 15 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left(9 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 5 \cdot \dot{x}_y \right)
\end{aligned} \right] = \\
&= \frac{1411200 \cdot m}{t_2^7} \cdot \left[9 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 9 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{16}{7} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (11)
\end{aligned}$$

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

$$t = 0: C_6 = 0; C_7 = 0; C_8 = 0; C_9 = 0; C_{10} = 0; \quad (12)$$

$$t = t_n: \begin{cases} \frac{1}{362880} \cdot C_1 \cdot t_n^9 + \frac{1}{40320} \cdot C_2 \cdot t_n^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_3 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_4 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_5 \cdot t_n^5 = -x_1; \\ \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t_n^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_5 \cdot t_n^4 = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t_n^3 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t_n^2 = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_n^2 + C_5 \cdot t_n = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Розв'язавши систему рівнянь (13), отримуємо постійні інтегрування C_1, C_2, C_3, C_4 та C_5 :

$$\begin{aligned}
C_1 &= 12700800 \cdot \left(\frac{\dot{x}_y}{t_n^8} - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n^9} \right); C_2 = 201600 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n^8} - 31 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^7} \right); C_5 = 1680 \cdot \left(4 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right); \\
C_3 &= 100800 \cdot \left(13 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right); C_4 = 20160 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} - 7 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} \right). \quad (14)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
v \\
x = 529200 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^8} + 33600 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^7} + \\
+ 50400 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^6} + 20160 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n^5} + 1680 \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{1}{t_n^4}
\end{aligned} \quad (15)$$

або

$$\frac{v}{x} = \frac{1680}{t_n^4} \cdot \left[\begin{aligned} & 315 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 20 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 30 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 12 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \end{aligned} \right] \cdot (16)$$

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

$$\begin{aligned}
I_{Qn} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{1411200 \cdot m}{t_n^8} \cdot \int_0^{t_n} \left[\begin{aligned} & 315 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 20 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 30 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 12 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \\
= \frac{1411200 \cdot m}{t_n^8} \cdot \int_0^{t_n} \left[\begin{aligned} & 99225 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \cdot \frac{t^8}{t_n^8} + 400 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_n^6} + \\ & + 900 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 144 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \\ & + 12600 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^7}{t_n^7} + 18900 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^6}{t_n^6} + \\ & + 7560 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + 630 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\ & + 1200 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + 480 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\ & + 40 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 720 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 60 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 24 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t}{t_n} \end{aligned} \right] dt = \\
= \frac{1411200 \cdot m}{t_n^7} \cdot \left[\begin{aligned} & 11025 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \frac{400}{7} \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \\ & + 180 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + 48 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \\ & + 1575 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) + 2700 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + \\ & + 1260 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) + 126 \cdot \left(\dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + \\ & + 200 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + 96 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) + \\ & + 10 \cdot \left(63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + 180 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) + \\ & + 20 \cdot \left(13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + 12 \cdot \left(15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left(4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \end{aligned} \right] = \\
= \frac{1411200 \cdot m}{t_n^7} \cdot \left[9 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{16}{7} \cdot \dot{x}_y^2 \right] \quad (17)
\end{aligned}$$

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

$$I_Q = I_{Q_2} + I_{Q_n} = \frac{1411200 \cdot m}{t_2^7} \cdot \left[9 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 9 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{16}{7} \cdot \dot{x}_y^2 \right] + \frac{1411200 \cdot m}{t_n^7} \cdot \left[9 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{16}{7} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (18)$$

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

$$I_Q = \frac{2822400 \cdot m}{t_1^7} \cdot \left[9 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^2} - 9 \cdot \frac{x_1}{t_1} \cdot \dot{x}_y + \frac{16}{7} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (19)$$

Для забезпечення виконання нерівності (1) необхідно виконати умову:

$$\frac{\partial I_Q}{\partial x_1} = \frac{2822400 \cdot m}{t_1^7} \cdot \left[18 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 9 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = \frac{25401600 \cdot m}{t_1^8} \cdot \left[2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y \right] = 0. \quad (20)$$

Із виразу (20) можна отримати:

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

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

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 100800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = -50400 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 10080 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = -840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4};$$

$$C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_{10} = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (22)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (22) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення, прискорення другого порядку (ривка), прискорення третього порядку (відчуття) та прискорення четвертого порядку формувального візка в процесі гальмування:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left(5 \cdot \frac{t^8}{t_1^8} - 20 \cdot \frac{t^7}{t_1^7} + 28 \cdot \frac{t^6}{t_1^6} - 14 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} + 2 \cdot t - t_1 \right); \quad \dot{x} = \dot{x}_y \cdot \left(20 \cdot \frac{t^7}{t_1^7} - 70 \cdot \frac{t^6}{t_1^6} + 84 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 35 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 1 \right); \quad (23)$$

$$\ddot{x} = 140 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^6}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^6} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} - \frac{t^3}{t_1^4} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = 420 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(2 \cdot \frac{t^5}{t_1^7} - 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^6} + 4 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - \frac{t^2}{t_1^4} \right);$$

$$\overset{IV}{x} = 840 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(5 \cdot \frac{t^4}{t_1^7} - 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^6} + 6 \cdot \frac{t^2}{t_1^5} - \frac{t}{t_1^4} \right); \quad \overset{V}{x} = 840 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(20 \cdot \frac{t^3}{t_1^7} - 30 \cdot \frac{t^2}{t_1^6} + 12 \cdot \frac{t}{t_1^5} - \frac{1}{t_1^4} \right).$$

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

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 100800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = -50400 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 10080 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = -840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4};$$

$$C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad C_9 = 0; \quad C_{10} = 0. \quad (24)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (24) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення, прискорення другого порядку (ривка), прискорення третього порядку (відчуття) та прискорення четвертого порядку формувального візка в

процесі пуску:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left(5 \cdot \frac{t^8}{t_1^7} - 20 \cdot \frac{t^7}{t_1^6} + 28 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 14 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} \right); & \dot{x} &= \dot{x}_y \cdot \left(20 \cdot \frac{t^7}{t_1^7} - 70 \cdot \frac{t^6}{t_1^6} + 84 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 35 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} \right); \\
 \ddot{x} &= 140 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^6}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^6} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} - \frac{t^3}{t_1^4} \right); & \ddot{x} &= 420 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(2 \cdot \frac{t^5}{t_1^7} - 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^6} + 4 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - \frac{t^2}{t_1^4} \right); \\
 x &= 840 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(5 \cdot \frac{t^4}{t_1^7} - 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^6} + 6 \cdot \frac{t^2}{t_1^5} - \frac{t}{t_1^4} \right); & \dot{x} &= 840 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(20 \cdot \frac{t^3}{t_1^7} - 30 \cdot \frac{t^2}{t_1^6} + 12 \cdot \frac{t}{t_1^5} - \frac{1}{t_1^4} \right).
 \end{aligned} \tag{25}$$

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

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

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 :

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

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 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:

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

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, прискорення другого порядку (ривка), прискорення третього порядку (відчуття) та прискорення четвертого порядку візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= -\frac{7776\Delta x}{5} \left(540 \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \frac{t^2}{t_3^2} + 84 \frac{t}{t_3} - 7 \right) \frac{t^5}{t_3^5}; \quad \dot{x} = -\frac{7776\Delta x}{5} \left(4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 2520 \frac{t^2}{t_3^2} + 504 \frac{t}{t_3} - 35 \right) \frac{t^4}{t_3^4}; \\ \ddot{x} &= -217728 \cdot \Delta x \left(216 \frac{t^3}{t_3^3} - 108 \frac{t^2}{t_3^2} + 18 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t^3}{t_3^3}; \quad \ddot{\ddot{x}} = -653184 \cdot \Delta x \cdot \left(432 \frac{t^3}{t_3^3} - 180 \frac{t^2}{t_3^2} + 24 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t^2}{t_3^2}; \\ {}^{IV}x &= -1306368 \cdot \Delta x \left(1080 \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \frac{t^2}{t_3^2} + 36 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t}{t_3}; \quad {}^Vx = -1306368 \cdot \Delta x \left(4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 1080 \frac{t^2}{t_3^2} + 72 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{1}{t_3^5}; \end{aligned} \quad (29)$$

– на ділянці усталеного руху:

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

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \Delta x + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(1399680 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} - 933120 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} + 217728 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 18144 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 2 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \\ \dot{x} &= \frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(5598720 \cdot \frac{t^7}{t_3^8} - 3265920 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} + 653184 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45360 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \right); \\ \ddot{x} &= 217728 \cdot \Delta x \left(216 \frac{t^3}{t_3^3} - 108 \frac{t^2}{t_3^2} + 18 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t^3}{t_3^3}; \quad \ddot{\ddot{x}} = 653184 \cdot \Delta x \cdot \left(432 \frac{t^3}{t_3^3} - 180 \frac{t^2}{t_3^2} + 24 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t^2}{t_3^2}; \\ {}^{IV}x &= 1306368 \cdot \Delta x \left(1080 \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \frac{t^2}{t_3^2} + 36 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t}{t_3^5}; \quad {}^Vx = 1306368 \cdot \Delta x \left(4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 1080 \frac{t^2}{t_3^2} + 72 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{1}{t_3^5}. \end{aligned} \quad (31)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка $\Delta x = 0,4m$ та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше $t_3 = 3c$, за виразами (29)–(31) було розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 1, а), швидкості (рис. 1, б), прискорення (рис. 1, в) прискорення другого порядку (ривка) (рис. 1, г), прискорення третього порядку (відчуття) (рис. 1, д) та прискорення четвертого порядку (рис. 1, е) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку з оптимальним режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку.

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

– на ділянці пуску:

$$x = -\frac{7776 \cdot \Delta x}{5} \left(540 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 84 \cdot \frac{t}{t_3} - 7 \right) \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (32)$$

– 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:

$$x = \frac{\Delta x}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(1399680 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} - 933120 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} + 217728 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 18144 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 2 \cdot \frac{t}{t_3} - \frac{1}{6} \right). \quad (34)$$

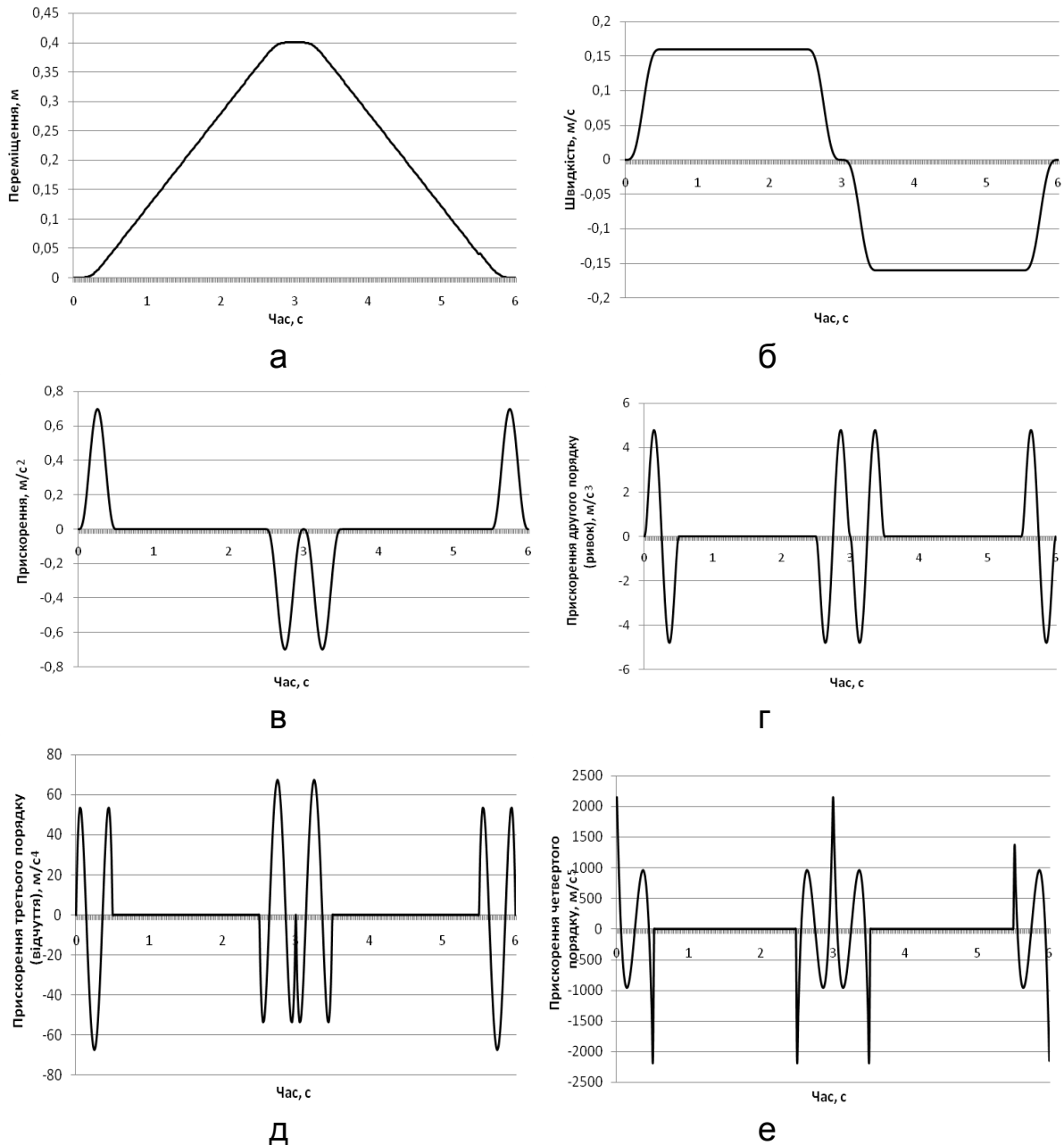


Рис. 1. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в, прискорення другого порядку (ривка) – г, прискорення третього порядку (відчуття) – д та прискорення четвертого порядку – е при русі формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку

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:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{7776 \cdot \Delta x}{5} \left(540 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 84 \cdot \frac{t}{t_3} - 7 \right) \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (35)$$

– 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:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left(1399680 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} - 933120 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} + 217728 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 18144 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 2 \cdot \frac{t}{t_3} - \frac{1}{6} \right), \quad (37)$$

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

Час t можна виключити із залежностей (35)–(37), оскільки $t = \varphi / \omega$, а $t_3 = \pi / \omega$. Тут φ – кутова координата повороту кулачка, а ω – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю $t_n = 1/6 \cdot t_3$, то процес пуску буде здійснюватись при повороті кулачка на кут в межах від $\varphi = 0$ до $\varphi = \pi/6$; час усталеного руху – $t_y = 2/3 \cdot t_3$, тоді усталений рух візка буде забезпечуватись поворотом кулачка на кут в межах від $\varphi = \pi/6$ до $\varphi = 5\pi/6$; час гальмування – $t_z = 1/6 \cdot t_3$, 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:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{7776 \cdot \Delta x}{5} \left(540 \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} - 360 \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} + 84 \cdot \frac{\varphi}{\pi} - 7 \right) \cdot \frac{\varphi^5}{\pi^5} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (38)$$

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

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} + \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \left[1399680 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^8 \frac{1}{\pi^8} - 933120 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^7 \frac{1}{\pi^7} + 217728 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \frac{1}{\pi^6} - 18144 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \frac{1}{\pi^5} + 2 \cdot \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} - \frac{1}{6} \right], \quad (40)$$

$$\frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi.$$

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

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{7776 \cdot \Delta x}{5} \left(540 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} - 360 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} + 84 \cdot \frac{(\varphi - \pi)}{\pi} - 7 \right) \cdot \frac{(\varphi - \pi)^5}{\pi^5} + \frac{\Delta x}{2}, \quad ; (41)$$

$$\pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}$$

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

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \left[1399680 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^8 \frac{1}{\pi^8} - 933120 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7 \frac{1}{\pi^7} + 217728 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \frac{1}{\pi^6} - 18144 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \frac{1}{\pi^5} + 2 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} - \frac{1}{6} \right], \quad (43)$$

$$\frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi.$$

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 четвертого порядку (рис. 4). Приводний механізм виконаний у вигляді шарнірно встановлених на порталі кулачкових механізмів, що контактують з штовхачами, жорстко прикріпленими до формувального візка.

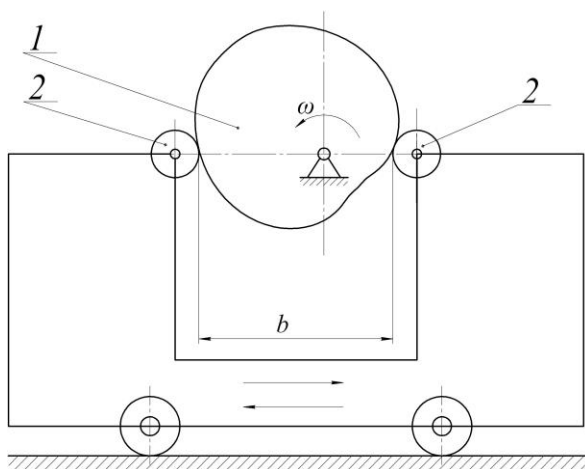


Рис. 2. Схема механізму з кулачковим приводом зворотно-поступального руху візка.

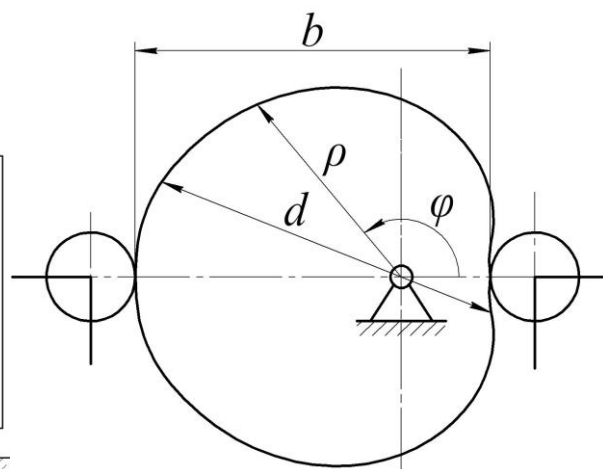


Рис. 3. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка.

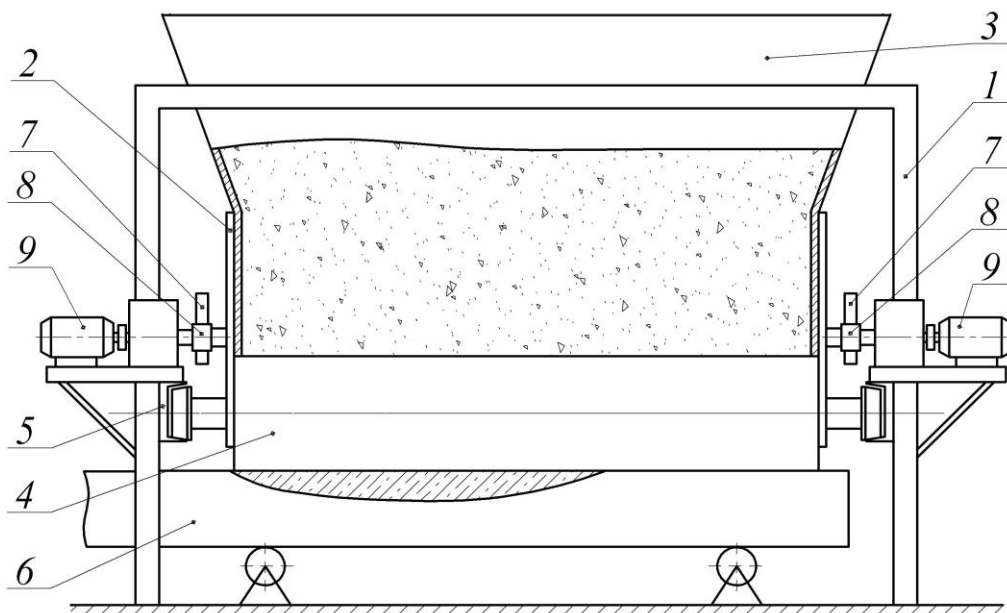


Рис. 4. Роликова формувальна установка з кулачковим приводним механізмом.

Установка вміщує змонтований на нерухомому порталі 1 формувальний візок 2, що вміщує подавальний бункер 3 та укочувальні ролики 4 і здійснює зворотно-поступальний рух в напрямних 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 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 зворотному ході.

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

В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано оптимальний режим реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку.

Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при оптимальному режимі реверсування за прискоренням четвертого порядку.

Запропоновано конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення оптимального режиму реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку.

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. Також результати роботи можуть бути корисними при проектуванні або удосконаленні механізмів із зворотно-поступальним рухом виконавчих елементів.

Список літератури

1. *Гарнець В. М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси. Київ. 1991. 144 с.
2. *Кузин В. Н.* Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 1981. 20 с.
3. *Рюшин В. Т.* Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев. 1986. 196 с.
4. *Ловеїкін В. С., Почка К. І.* Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин (DSR AM-I): I Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль: тези конференції. Тернопіль. 2004. С. 507—514.
5. *Ловеїкін В. С., Почка К. І.* Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 2007. № 59. Т. 1. С. 465—474.
6. *Ловеїкін В. С., Почка К. І.* Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. 2007. № 41. С. 127—34.
7. *Ловеїкін В. С.* Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин: учебное пособие. Киев. 1990. 168 с.

References

1. *Garnets V. M.* (1991). Progressive betonform aggregates and complexes. Kiev. 144.
2. *Kuzin V. N.* (1981). Technology of roller forming of flat products made from fine-grained concrete: abstract of thesis on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences. Moscow. 20.
3. *Ryushin V. T.* (1986). Research of working process and development of methodology for calculating machines, roller forming of concrete mixtures: dissertation on competition of scientific degree of candidate of technical sciences. Kiev. 196.
4. *Loveykin V. S., Pochka K. I.* (2004). Dynamic analysis of roller formovochno installing recuperation drive. Dynamics, durability and reliability of agricultural machinery (DSR AM-I): I International Scientific and Technical Conference, Ternopil: Thesis for the conference. Ternopil. 507-514.

5. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2007). Results of experimental researches of the modes of motion of the molding roller installing recuperation drive. Bulletin of Kharkov National University of Agriculture after Petro Vasilenko. Kharkov. No. 59. Vol. 1. 465-474.
6. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2007). Determination of optimum values of the offset angle of the cranks roller molding installing recuperation drive. Automation of production processes in machine building and instrument making. Lviv. No. 41. 127-34.
7. Loveykin V. S. (1990). Calculation of optimum modes of movement of construction machinery: textbook. Kiev. 168.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РЕВЕРСИРОВАНИЯ РОЛИКОВОЙ ФОРМОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ ПО УСКОРЕНИЮ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

В. С. Ловеikin, К. И. Почка

Аннотация. С целью повышения надёжности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан оптимальный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвёртого порядка. Рассчитаны кинематические характеристики формовочной тележки при оптимальном режиме реверсирования по ускорению четвёртого порядка. Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения оптимального режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвёртого порядка.

В результате проведенных исследований с целью повышения надёжности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан оптимальный режим реверсирования формовочного тележки с ускорением четвертого порядка.

Рассчитаны кинематические характеристики формовочного тележки при оптимальном режиме реверсирования с ускорением четвертого порядка.

Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения оптимального режима реверсирования формовочного тележки с ускорением четвертого порядка.

Результаты работы могут в дальнейшем быть полезными для уточнения и усовершенствования существующих инженерных методов расчета приводных механизмов машин роликового формования как на стадиях проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации. Также результаты работы могут быть полезными при проектировании или усовершенствовании механизмов с возвратно-поступательным движением исполнительных элементов.

Ключевые слова: роликовая формовочная установка, режим движения, кулачковый механизм, привод

OPTIMIZATION OF MODE OF REVERSAL OF ROLLER FORMING INSTALLATION ON ACCELERATION OF FOURTH ORDER

V. S. Loveykin, K. I. Pochka

Abstract. *For the purpose of increase in reliability and durability of roller forming installation the optimum mode of back and forth motion of the forming cart with a reversal on acceleration of the fourth order is calculated. Kinematic characteristics of the forming cart at the optimum mode of a reversal on acceleration of the fourth order are calculated. The design of the drive of installation in a type of the cam mechanism is offered and the cam profile for providing the optimum mode of back and forth motion of the forming cart with a reversal on acceleration of the fourth order is constructed.*

In studies conducted with the aim of increasing the reliability and durability of roller molding set the calculated optimal mode of reversal of the molding truck with the acceleration of the fourth order.

Calculated the kinematic characteristics of the moulding of the bogie when the optimal mode of reversal with the acceleration of the fourth order.

The proposed design of the actuator installation in the form of a Cam mechanism and the Cam profile is built to ensure the optimal mode of reversal of the molding truck with the acceleration of the fourth order.

The results can further be useful to clarify and improve the existing engineering methods of calculation of the drive mechanisms of machines roller forming both the stages of design/construction and in modes of real operation. Also the results can be useful in the design or improvement of mechanisms with reciprocating actuators.

Key words: *roller forming installation, movement mode, cam mechanism, drive*

УДК 531.32

АНАЛІЗ РУХУ ЧАСТИНКИ ПО РАДІАЛЬНІЙ ЛОПАТЦІ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА З УРАХУВАННЯМ ОПОРУ СЕРЕДОВИЩА

Г. А. Голуб, доктор технічних наук

**О. А. Марус, кандидат технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України**

Я. Д. Ярош, кандидат технічних наук

**Житомирський національний агроекологічний університет
e-mail: gagolub@mail.ru**

© Г. А. Голуб, О. А. Марус, Я. Д. Ярош, 2017