

## РЕАЛИЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РЕВЕРСУВАННЯ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

**Ловейкін В. С., Почка К. І.**

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 роликовой формовочной установки с приводом от высокомоментного шагового двигателя, который вмонтирован в укатывающие ролики формовочной тележки и обеспечивает возвратно-поступательное движения формовочной тележки с оптимальным режимом реверсирования по ускорению четвёртого порядка.

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 роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки і забезпечує зворотно-поступальний рух формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку.

The optimum mode of reciprocal motion of the forming cart with the reversal on acceleration of the fourth order is calculated with the purpose of increasing reliability and durability of the roller forming installation. Kinematic characteristics of the forming cart under the optimum mode of the reversal on acceleration of the fourth order are calculated. The design of the roller forming installation with the drive from the high-moment step engine which is built in rolling rollers of the forming cart and which provides reciprocal movements of the forming cart with the optimum mode of the reversal on acceleration of the fourth order is offered.

Ловейкін В. С.

Почка К. І.

д-р техн. наук, проф.,  
зав. каф. КМіО НУБіП  
канд. техн. наук, доц.,  
зав. каф. ОПН КНУБА  
Shanovniy@ukr.net

НУБіП – Національний університет біоресурсів і природокористування, м. Київ;  
КНУБА – Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ.

УДК 693.546

Ловейкін В. С., Почка К. І.

## РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РЕВЕРСУВАННЯ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

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

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

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

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

Для плавного процесу реверсування формувального візка запропоновано здійснювати його за оптимальним режимом руху за прискоренням 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;

$V$

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

З виразу (3) можна записати:

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

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

$$\begin{aligned} \overset{X}{x} &= 0; \quad \overset{IX}{x} = C_1; \quad \overset{VIII}{x} = C_1 \cdot t + C_2; \quad \overset{VII}{x} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \\ \overset{VI}{x} &= \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4; \quad \overset{V}{x} = \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t^2 + C_4 \cdot t + C_5; \\ \overset{IV}{x} &= \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t^2 + C_5 \cdot t + C_6; \\ \ddot{\overset{IV}{x}} &= \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t^2 + C_6 \cdot t + C_7; \\ \ddot{\overset{V}{x}} &= \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot t^2 + C_7 \cdot t + C_8; \quad (5) \\ \dot{\overset{V}{x}} &= \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_5 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_6 \cdot t^3 + \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot C_7 \cdot t^2 + C_8 \cdot t + C_9; \\ x &= \frac{1}{362880} \cdot C_1 \cdot t^9 + \frac{1}{40320} \cdot C_2 \cdot t^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_3 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_4 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_5 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_6 \cdot t^4 + \\ &\quad + \frac{1}{6} \cdot C_7 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_8 \cdot t^2 + C_9 \cdot t + C_{10}, \end{aligned}$$

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:  $t=0$ :  $x = -x_1$ ;  $\dot{x} = \dot{x}_y$ ;  $\ddot{x} = 0$ ;  $\overset{IV}{\ddot{x}} = 0$ ;  $\overset{V}{x} = 0$ .

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

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

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

$$t=0: C_{10} = -x_1; C_9 = \dot{x}_y; C_8 = 0; C_7 = 0; C_6 = 0; \quad (6)$$

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

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

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

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:

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

або

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

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

$$I_{Q_2} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} x^2 dt = \frac{1411200 \cdot m}{t_2^8} \int_0^{t_2} \left[ \begin{aligned} &315 \left( 2 \frac{x_1}{t_2} - \dot{x}_y \right) \frac{t^4}{t_2^4} + 20 \left( 32 \dot{x}_y - 63 \frac{x_1}{t_2} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &+ 30 \left( 27 \frac{x_1}{t_2} - 14 \dot{x}_y \right) \frac{t^2}{t_2^2} + 12 \left( 8 \dot{x}_y - 15 \frac{x_1}{t_2} \right) \frac{t}{t_2} + \left( 9 \frac{x_1}{t_2} - 5 \dot{x}_y \right) \end{aligned} \right]^2 dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1411200m}{t_2^8} \int_0^{t_2} \left[ \begin{aligned}
&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 \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 \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 \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \left( 27 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 14 \dot{x}_y \right) \frac{t^5}{t_2^5} + 480 \left( 32 \dot{x}_y - 63 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \left( 8 \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 \dot{x}_y \right) \left( 8 \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}
\end{aligned} \right] dt = \\
&= \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 \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 \left( 32 \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]. \tag{11}
\end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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  $\dot{x}_y$ :

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

або

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

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

$$I_{Qn} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{1411200 \cdot m}{t_n^8} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 315 \left( \dot{x}_y - 2 \frac{x_1}{t_n} \right) \frac{t^4}{t_n^4} + 20 \left( 63 \frac{x_1}{t_n} - 31 \dot{x}_y \right) \frac{t^3}{t_n^3} + \right. \\ \left. + 30 \left( 13 \dot{x}_y - 27 \frac{x_1}{t_n} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + 12 \left( 15 \frac{x_1}{t_n} - 7 \dot{x}_y \right) \frac{t}{t_n} + \left( 4 \dot{x}_y - 9 \frac{x_1}{t_n} \right) \right]^2 dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \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 \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \left( 63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^7}{t_n^7} + 18900 \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \left( 13 \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \frac{t^6}{t_n^6} + \\
&+ 7560 \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^5}{t_n^5} + 630 \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \left( 4 \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \frac{t^4}{t_n^4} + \\
&+ 1200 \left( 63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \dot{x}_y \right) \left( 13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \frac{t^5}{t_n^5} + 480 \left( 63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \dot{x}_y \right) \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^4}{t_n^4} + \\
&+ 40 \left( 63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \dot{x}_y \right) \left( 4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + 720 \left( 13 \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \frac{t^3}{t_n^3} + \\
&+ 60 \left( 13 \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \left( 4 \cdot \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + 24 \left( 15 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 7 \cdot \dot{x}_y \right) \left( 4 \dot{x}_y - 9 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \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) \left( 13 \cdot \dot{x}_y - 27 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + 96 \left( 63 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 31 \cdot \dot{x}_y \right) \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) \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) \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) \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) \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]. \tag{17}
\end{aligned}$$

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

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

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 формуального візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 100800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = -50400 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 10080 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = -840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad (22)$$

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

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 формуального візка в процесі гальмування:

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

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

$$\ddot{x} = 140 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^6} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} - \frac{t^3}{t_1^4} \right); \quad (23)$$

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

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

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

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

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 100800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = -50400 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 10080 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = -840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad (24)$$

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

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 формуального візка в процесі пуску:



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

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

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

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  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

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

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

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_3$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_2$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу пуску 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, прискорення другого порядку (ривка), прискорення третього порядку (відчуття) та прискорення четвертого порядку візка

– на ділянці пуску:

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

–на ділянці усталеного руху:

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

–на ділянці гальмування:

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

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (29)–(31) було розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 1, а), швидкості (рис. 1, б), прискорення (рис. 1, в) 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.

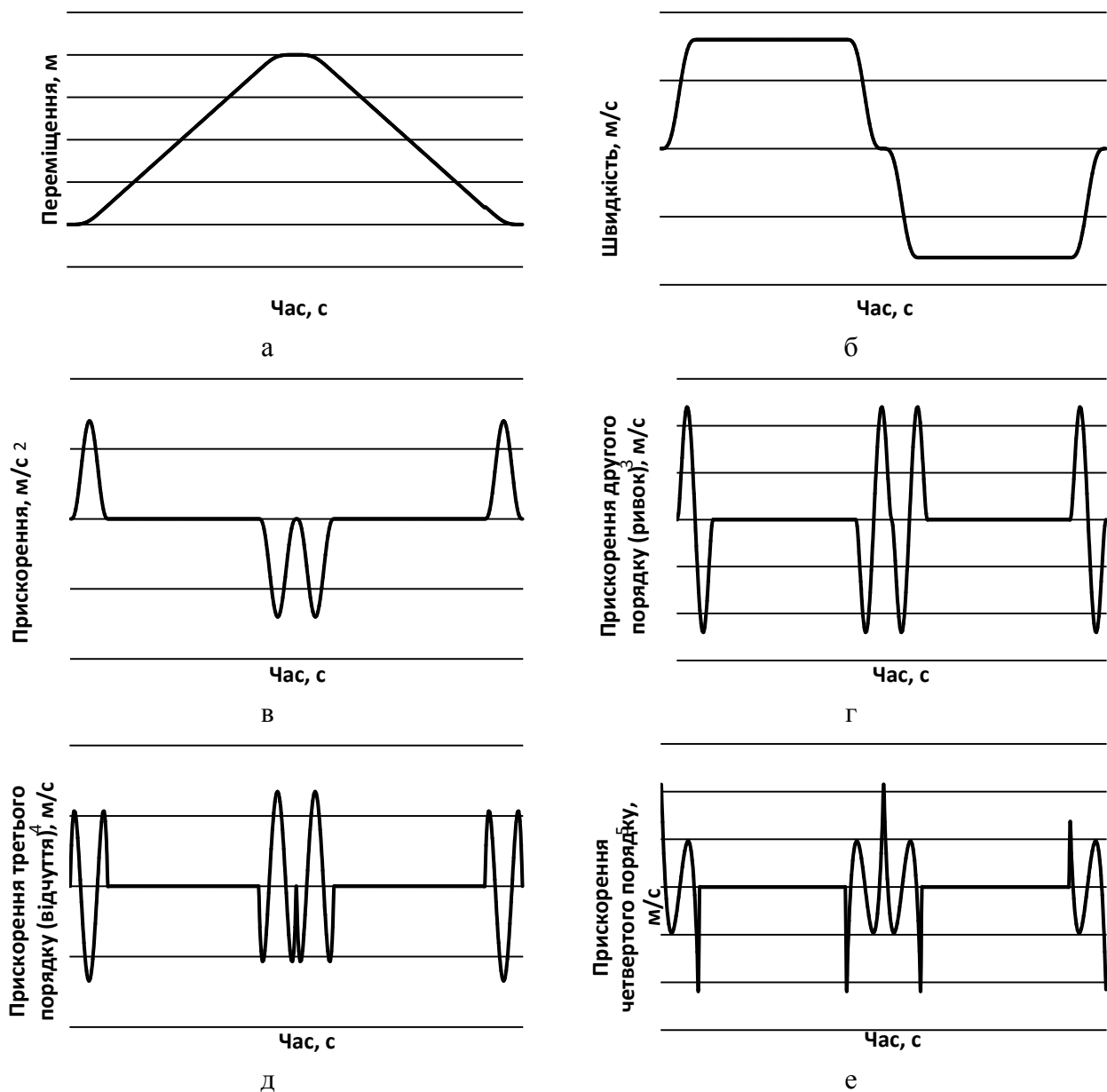


Рис. 1. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в, прискорення другого порядку (ривка) – г, прискорення третього порядку (відчуття) – д та прискорення четвертого порядку – е при русі формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку

Закон руху візка, описаний рівняннями (29)–(31), 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 описується рівняннями:

–на ділянці пуску:

$$\dot{\varphi}_n = -\frac{1}{R} \cdot \frac{7776 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 2520 \frac{t^2}{t_3^2} + 504 \frac{t}{t_3} - 35 \right) \frac{t^4}{t_3^5}; \quad (32)$$

–на ділянці усталеного руху:

$$\dot{\varphi}_y = \frac{1}{R} \cdot \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad (33)$$

–на ділянці гальмування:

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{1}{R} \cdot \frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 5598720 \cdot \frac{t^7}{t_3^8} - 3265920 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} + 653184 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45360 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \right). \quad (34)$$

де  $R$  – радіус укочувальних роликів.

Прийнявши час пуску формувального візка  $t_n = 1/6 \cdot t_3$ , час усталеного руху –  $t_y = 2/3 \cdot t_3$  та час гальмування –  $t_2 = 1/6 \cdot t_3$ , отримуємо закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна при русі формувального візка від одного крайнього положення до іншого:

$$\dot{\varphi} = -\frac{7776 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 4320 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 2520 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 504 \cdot \frac{t}{t_3} - 35 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^5}, \quad 0 \leq t \leq \frac{t_3}{6}; \quad (35)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R \cdot t_3}, \quad \frac{t_3}{6} < t < \frac{5 \cdot t_3}{6}; \quad (36)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 5598720 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{t_3^8} - 3265920 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{t_3^7} + \right. \\ \left. + 653184 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} - 45360 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \right), \quad \frac{5 \cdot t_3}{6} < t \leq t_3. \quad (37)$$

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

$$\dot{\varphi} = \frac{7776 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 4320 \cdot \frac{(t-t_3)^3}{t_3^3} - 2520 \cdot \frac{(t-t_3)^2}{t_3^2} + 504 \cdot \frac{(t-t_3)}{t_3} - 35 \right) \cdot \frac{(t-t_3)^4}{t_3^5}, \quad t_3 \leq t \leq \frac{7 \cdot t_3}{6}; \quad (38)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R \cdot t_3}, \quad \frac{7 \cdot t_3}{6} < t < \frac{11 \cdot t_3}{6}; \quad (39)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 5598720 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{t_3^8} - 3265920 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{t_3^7} + \right. \\ \left. + 653184 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} - 45360 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \right), \quad \frac{11 \cdot t_3}{6} < t \leq 2 \cdot t_3. \quad (40)$$

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. 2). 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. 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 цілому.

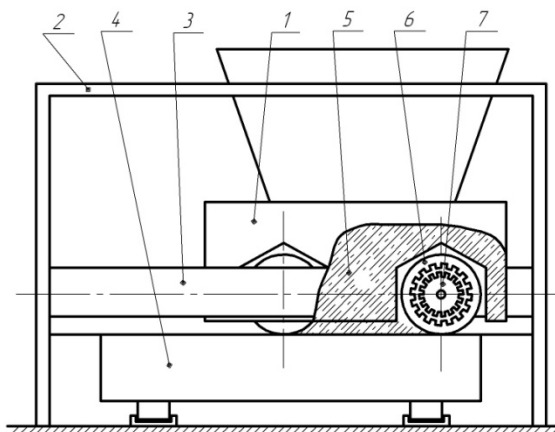


Рис. 2. Роликова формувальна установка з приводом від крокового двигуна

### ВИСНОВКИ

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

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

3. Запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки для забезпечення оптимального режиму реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку.

4. 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 ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гарнець В.М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В.М. Гарнець – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
2. Кузин В.Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов / В.Н. Кузин. – Автореф. дис... канд. наук. – М. – 1981. – 20 с.
3. Рюшин В.Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей / В.Т. Рюшин. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К. – 1986.
4. Ловейкін В.С. Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. I-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507–514.
5. Ловейкін В.С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекуперативним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільськогосподарства 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 рекуперативним приводом / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – НУ «Львівська політехніка», 2007. – № 41. – С. 127–134.
7. Ловейкін В.С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Учебное пособие. / В.С. Ловейкин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.
8. Патент України на винахід № 105744 кл. B28B13/00: 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.