

ОБҐРУНТУВАННЯ КРАЙОВИХ РИВКІВ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РЕВЕРСУВАННЯ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

Вячеслав Ловеїкін¹, Костянтин Почка²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна

² Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна

THE OPTIMUM MODE REVERSAL OF ROLLER FORMING INSTALLATION ON ACCELERATION IS FOURTH ORDER A JUSTIFICATION OF BOUNDARY BREAKTHROUGHS

Vjacheslav Lovejkin¹, Konstantin Pochka²

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, Ukraine

² Kyiv National University of Construction and Architecture,
Povitroflotsky Prospect, 31, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. З метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступального руху формувального візка з реверсуванням за прискоренням четвертого порядку при оптимальних значеннях крайових ривків. Розраховано кінематичні характеристики візка при реверсуванні за прискоренням четвертого порядку з оптимальним значенням крайових ривків. Запропоновано конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення реверсування візка за прискоренням четвертого порядку з оптимальним значенням крайових ривків. Також запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки.

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

АННОТАЦИЯ. С целью повышения надёжности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвёртого порядка при оптимальных значениях граничных рывков. Рассчитаны кинематические характеристики тележки при режиме реверсирования по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных рывков. Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения реверсирования тележки по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных рывков. Также предложена конструкция роликовой формовочной установки с приводом от высокомоментного шагового двигателя, который вмонтирован в укатывающие ролики формовочной тележки установки.

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

ABSTRACT. Purpose. Improvement of a design of the driving mechanism of roller forming installation for increase of its reliability and durability is the purpose of work. **Methodology/approach.** Researches in this work are of analytical character. **Findings.** As a result of the conducted researches the combined mode of back and forth motion of the forming cart with a reversal on acceleration of the fourth order at optimum values of boundary breakthroughs is calculated. Kinematic characteristics of the forming cart at the reversal mode on acceleration of the fourth order with optimum values of boundary breakthroughs are calculated. The design of the drive of installation in a type of the cam mechanism is offered and the cam profile for providing a reversal of the forming cart on acceleration of the fourth order with optimum values of boundary breakthroughs is constructed. The design of roller forming installation with the drive from the high-moment step engine which is built in the rolling rollers of the forming cart of installation is also offered. **Research limitations/implications.** Results of work can be further useful at specification and improvement of the existing engineering methods of a calculation of driving mechanisms of cars of roller formation both at design/designing stages, and in the modes of real operation. **Originality/value.** The work has scientific and practical interest.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

виробів під час їхньої роботи виникають значні динамічні навантаження в елементах привідного механізму та в елементах формувальних візків [1...6]. Не дивлячись на досить широкі дослідження технологічного процесу формування залізобетонних виробів безвібраційним роликівим 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 привідного механізму.

ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликівим формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність [1...5]. 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 привідного механізму та в елементах формувального візка, що може призвести до передчасного виходу установки з ладу [1...8]. В роботі [9] здійснено оптимізацію динамічного режиму реверсування роликівим формувальної установки. Однак в такому режимі прискорення та ривок візка мають велике значення в крайніх його положеннях. При оптимізації ривкового режиму реверсування установки [8] прискорення візка в крайніх положеннях змінюється плавно, однак ривок змінюється різко і має досить велике значення. Оптимізація режиму реверсування роликівим формувальної установки за прискоренням третього порядку [11] приводить до того, що в крайніх положеннях візка прискорення і ривок змінюються плавно, однак прискорення третього порядку при цьому має досить велике значення і змінюється різко від нуля до свого максимально-

В установках роликівим формування залізобетонних значення. Тому актуальною є задача удосконалення привідного механізму роликівим формувальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формувального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає в удосконаленні конструкції привідного механізму роликівим формувальної установки для підвищення її надійності та довговічності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для роликівим формувальної установки при ущільненні бетонної суміші бажано мати постійну швидкість зворотно-поступального руху формувального візка на всій ділянці, що буде позитивно впливати 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 [12, 13]. 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 [12]. В даній роботі за критерій режиму руху використана

критеріальна дія, яка становить 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:

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

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

З виразу (3) випливає, що:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \ddot{\ddot{x}}} = \frac{\partial Q}{\partial x^{IV}} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x^V} = m \cdot x; \quad \frac{d^5}{dt^5} \frac{\partial Q}{\partial x^V} = m \cdot x = 0.$$

З останнього рівняння отримуємо диференціальне рівняння та його розв'язки:

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

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 наступні: $t = 0$: $x = -x_1$; $\dot{x} = \dot{x}_y$; $\ddot{x} = 0$;

$\overset{IV}{\ddot{x}} = 0$; $x = 0$, кінцевими $t = t_2$: $x = 0$;

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

При пуску початковими умовами є такі:

$t = 0$: $x = 0$; $\dot{x} = 0$; $\ddot{x} = 0$; $\overset{IV}{\ddot{x}} = b$; $x = 0$, а кінцевими $t = t_n$: $x = -x_1$; $\dot{x} = -\dot{x}_y$; $\ddot{x} = 0$;

$\overset{IV}{\ddot{x}} = 0$; $x = 0$.

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

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

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

$$t = t_2: \begin{cases} \frac{1}{120} C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} C_2 \cdot t_2^4 + \\ + \frac{1}{6} C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} C_4 \cdot t_2^2 + C_5 \cdot t_2 = 0. \end{cases}$$

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

$$\begin{aligned} C_1 &= 302400 \cdot \left(-\frac{b}{t_2^6} - 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^8} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_2^9} \right); \\ C_2 &= 20160 \cdot \left(7 \cdot \frac{b}{t_2^5} + 320 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^7} - 630 \cdot \frac{x_1}{t_2^8} \right); \\ C_3 &= 2520 \cdot \left(-11 \cdot \frac{b}{t_2^4} - 560 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} + 1080 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); \\ C_4 &= 120 \cdot \left(23 \cdot \frac{b}{t_2^3} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} \right); \\ C_5 &= 120 \cdot \left(-\frac{b}{t_2^2} - 70 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} + 126 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} \overset{V}{x} &= 12600 \cdot \left(-b - 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^6} + \\ &+ 3360 \cdot \left(7 \cdot b + 320 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 630 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^5} + \\ &+ 1260 \cdot \left(-11 \cdot b - 560 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 1080 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^4} + \\ &+ 120 \cdot \left(23 \cdot b + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{t}{t_2^3} + \\ &+ 120 \cdot \left(-b - 70 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 126 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \cdot \frac{1}{t_2^2} \end{aligned} \quad (9)$$

або

$$x = \frac{60}{t_2^2} \times \left[\begin{aligned} &210 \left(-b - 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^4}{t_2^4} + \\ &+ 56 \left(7 \cdot b + 320 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 630 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &\times + 21 \left(-11 \cdot b - 560 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 1080 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 2 \left(23 \cdot b + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t}{t_2} + \\ &+ 2 \left(-b - 70 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 126 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right] \cdot (10)$$

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

$$I_{Q_2} = \frac{m}{2} \int_0^{t_2} x^2 dt = \frac{1800m}{t_2^4} \times \left[\begin{aligned} &210 \left(-b - 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 84 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^4}{t_2^4} + \\ &+ 56 \left(7b + 320 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 630 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &\times \int_0^{t_2} + 21 \left(-11b - 560 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 1080 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t^2}{t_2^2} + dt = \\ &+ 2 \left(23b + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \frac{t}{t_2} + \\ &+ 2 \left(-b - 70 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} + 126 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \right) \end{aligned} \right]^2 = \frac{7200 \cdot m}{t_2^3} \times \left[\begin{aligned} &\frac{1}{3} \cdot b^2 + \frac{98}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} \cdot b - 42 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot b + \\ &\times \left[+ 448 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^4} - 1764 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \cdot \dot{x}_y + 1764 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^6} \right] \end{aligned} \right] \cdot (11)$$

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

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

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

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

$$C_1 = 302400 \cdot \left(-\frac{b}{t_n^6} + 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^8} - 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^9} \right); \quad (14)$$

$$C_2 = 40320 \cdot \left(4 \cdot \frac{b}{t_n^5} - 155 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^7} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^8} \right);$$

$$C_3 = 12600 \cdot \left(-3 \cdot \frac{b}{t_n^4} + 104 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} - 216 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right);$$

$$C_4 = 960 \cdot \left(5 \cdot \frac{b}{t_n^3} - 147 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right);$$

$$C_5 = 60 \cdot \left(-5 \cdot \frac{b}{t_n^2} + 112 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} - 252 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right).$$

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 :

$$\begin{aligned} x = & 12600 \cdot \left(-b + 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^6} + \\ & + 6720 \cdot \left(4 \cdot b - 155 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^5} + \\ & + 6300 \cdot \left(-3 \cdot b + 104 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 216 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^4} + \\ & + 960 \cdot \left(5 \cdot b - 147 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{t}{t_n^3} + \\ & + 60 \cdot \left(-5 \cdot b + 112 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 252 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \cdot \frac{1}{t_n^2} \end{aligned} \quad (15)$$

або

$$\begin{aligned} x = & \frac{60}{t_n^2} \times \\ & \times \left[\begin{aligned} & 210 \left(-b + 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^4}{t_n^4} + \\ & + 112 \left(4 \cdot b - 155 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 105 \left(-3b + 104 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 216 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 16 \left(5 \cdot b - 147 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t}{t_n} + \\ & + \left(-5 \cdot b + 112 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 252 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Після цього критерій оптимальності руху в процесі пуску з урахуванням виразів (2) та (16) набуває вигляду

$$\begin{aligned} I_{Qn} = & \frac{m}{2} \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{1800m}{t_n^4} \times \\ & \times \int_0^{t_n} \left[\begin{aligned} & 210 \left(-b + 42 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 84 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^4}{t_n^4} + \\ & + 112 \left(4b - 155 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 105 \left(-3b + 104 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 216 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + \\ & + 16 \left(5b - 147 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} + 315 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \frac{t}{t_n} + \\ & + \left(-5b + 112 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} - 252 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \\ & = \frac{7200 \cdot m}{t_n^3} \times \\ & \times \left[\begin{aligned} & \frac{1}{3} \cdot b^2 - \frac{98}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 42 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + \\ & + 448 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 1764 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 1764 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6} \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

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

$$\begin{aligned} I_Q = & I_{Q2} + I_{Qn} = \frac{7200m}{t_2^3} \times \\ & \times \left[\begin{aligned} & \frac{1}{3} \cdot b^2 + \frac{98}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^2} \cdot b - 42 \cdot \frac{x_1}{t_2^3} \cdot b + \\ & + 448 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^4} - 1764 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \cdot \dot{x}_y + 1764 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^6} \end{aligned} \right] + \\ & + \frac{7200m}{t_n^3} \times \\ & \times \left[\begin{aligned} & \frac{1}{3} \cdot b^2 - \frac{98}{5} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^2} \cdot b + 42 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot b + \\ & + 448 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^4} - 1764 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \cdot \dot{x}_y + 1764 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^6} \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

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

$$I_Q = \frac{14400m}{t_n^3} \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3} \cdot b^2 + 448 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^4} - \\ -1764 \cdot \frac{x_1}{t_1^5} \cdot \dot{x}_y + 1764 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^6} \end{array} \right]. \quad (19)$$

Для забезпечення виконання нерівності (1) необхідне виконання наступної умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial I_Q}{\partial x_1} = \frac{14400 \cdot m}{t_n^3} \left[3528 \cdot \frac{x_1}{t_1^6} - 1764 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5} \right] = \\ = \frac{25401600 \cdot m}{t_n^8} \left[2 \cdot \frac{x_1}{t_1} - \dot{x}_y \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Q}{\partial b} = \frac{14400 \cdot m}{t_n^3} \left[\frac{2}{3} \cdot b \right] = \frac{9600 \cdot m}{t_n^3} \cdot b = 0. \end{array} \right. \quad (20)$$

Із виразів (20) можна отримати

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

Підстановкою виразів (21) у (6) та (8) отримуються постійні інтегрування в процесі гальмування візка:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0; \quad C_2 = 100800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; \\ C_3 &= -50400 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 10080 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \\ C_5 &= -840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \\ C_8 &= 0; \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_{10} = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \end{aligned} \quad (22)$$

З урахуванням постійних інтегрування (22) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення, прискорення другого порядку (ривка), прискорення третього порядку (відчуття) та прискорення четвер-

того порядку формувального візка в процесі гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \times \\ &\times \left(5 \frac{t^8}{t_1^7} - 20 \frac{t^7}{t_1^6} + 28 \frac{t^6}{t_1^5} - 14 \frac{t^5}{t_1^4} + 2t - t_1 \right); \\ \dot{x} &= \dot{x}_y \cdot \left(20 \frac{t^7}{t_1^7} - 70 \frac{t^6}{t_1^6} + 84 \frac{t^5}{t_1^5} - 35 \frac{t^4}{t_1^4} + 1 \right); \\ \ddot{x} &= 140 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^6}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^6} + 3 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} - \frac{t^3}{t_1^4} \right); \\ \ddot{\ddot{x}} &= 420 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(2 \cdot \frac{t^5}{t_1^7} - 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^6} + 4 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - \frac{t^2}{t_1^4} \right); \\ x^{IV} &= 840 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(5 \frac{t^4}{t_1^7} - 10 \frac{t^3}{t_1^6} + 6 \frac{t^2}{t_1^5} - \frac{t}{t_1^4} \right); \\ x^V &= 840 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(20 \frac{t^3}{t_1^7} - 30 \frac{t^2}{t_1^6} + 12 \frac{t}{t_1^5} - \frac{1}{t_1^4} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Підставивши вирази (21) у (12) та (14) можна отримати постійні інтегрування в процесі пуску візка:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0; \quad C_2 = 100800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; \\ C_3 &= -50400 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 10080 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \\ C_5 &= -840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \\ C_8 &= 0; \quad C_9 = 0; \quad C_{10} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

З урахуванням постійних інтегрування (24) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення, прискорення другого порядку (ривка), прискорення третього порядку (відчуття) та прискорення четвертого порядку візка в процесі пуску:

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

В усталеному режимі руху візка координати переміщення, швидкості, прискорення, прискорення другого порядку (ривка), прискорення третього порядку (відчуття) та прискорення четвертого порядку його центра мас описуються рівняннями [10] такими рівняннями:

$$\begin{aligned}
 x_y &= x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \\
 \dot{x}_y &= \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \\
 \ddot{x}_y &= 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_y = 0; \quad \text{IV} \quad \ddot{\ddot{\ddot{x}}}_y = 0; \quad \text{V} \quad \ddot{\ddot{\ddot{\ddot{x}}}}_y = 0,
 \end{aligned} \tag{26}$$

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 як $x_{1y} = \Delta x - x_1$.

Підстановкою координат x_{0y} та x_{1y} у другий вираз (26) отримується залежність

для визначення швидкості руху візка в усталеному режимі \dot{x}_y :

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

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

$$t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3.$$

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

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

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:

$$\begin{aligned}
 x &= -\frac{7776 \Delta x}{5} \times \\
 &\times \left(540 \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \frac{t^2}{t_3^2} + 84 \frac{t}{t_3} - 7 \right) \frac{t^5}{t_3^5}; \\
 \dot{x} &= -\frac{7776 \Delta x}{5} \times \\
 &\times \left(4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 2520 \frac{t^2}{t_3^2} + 504 \frac{t}{t_3} - 35 \right) \frac{t^4}{t_3^5};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x = -217728 \cdot \Delta x \times \\
& \times \left(216 \frac{t^3}{t_3^3} - 108 \frac{t^2}{t_3^2} + 18 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t^3}{t_3^5}; \\
& \dot{x} = -653184 \cdot \Delta x \times \\
& \times \left(432 \frac{t^3}{t_3^3} - 180 \frac{t^2}{t_3^2} + 24 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t^2}{t_3^5}; \\
& \overset{IV}{x} = -1306368 \cdot \Delta x \times \\
& \times \left(1080 \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \frac{t^2}{t_3^2} + 36 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t}{t_3^5}; \\
& \overset{V}{x} = -1306368 \cdot \Delta x \times \\
& \times \left(4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 1080 \frac{t^2}{t_3^2} + 72 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{1}{t_3^5};
\end{aligned} \tag{29}$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\begin{aligned}
x &= \frac{\Delta x}{10} \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \\
\ddot{x} &= 0; \quad \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \quad \overset{V}{x} = 0; \quad \overset{V}{\dot{x}} = 0;
\end{aligned} \tag{30}$$

– на ділянці гальмування:

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

$$\begin{aligned}
& \overset{IV}{x} = 1306368 \cdot \Delta x \times \\
& \times \left(1080 \frac{t^3}{t_3^3} - 360 \frac{t^2}{t_3^2} + 36 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{t}{t_3^5}; \\
& \overset{V}{x} = 1306368 \cdot \Delta x \times \\
& \times \left(4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 1080 \frac{t^2}{t_3^2} + 72 \frac{t}{t_3} - 1 \right) \frac{1}{t_3^5}.
\end{aligned} \tag{31}$$

Для прийнятих значень амплітуди переміщення формувального візка $\Delta x = 0,4 \text{ м}$ та загального часу 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 від одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку при оптимальному значенні крайового ривка з режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку.

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

– на ділянці пуску:

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

– на ділянці усталеного руху:

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

– на ділянці гальмування:

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

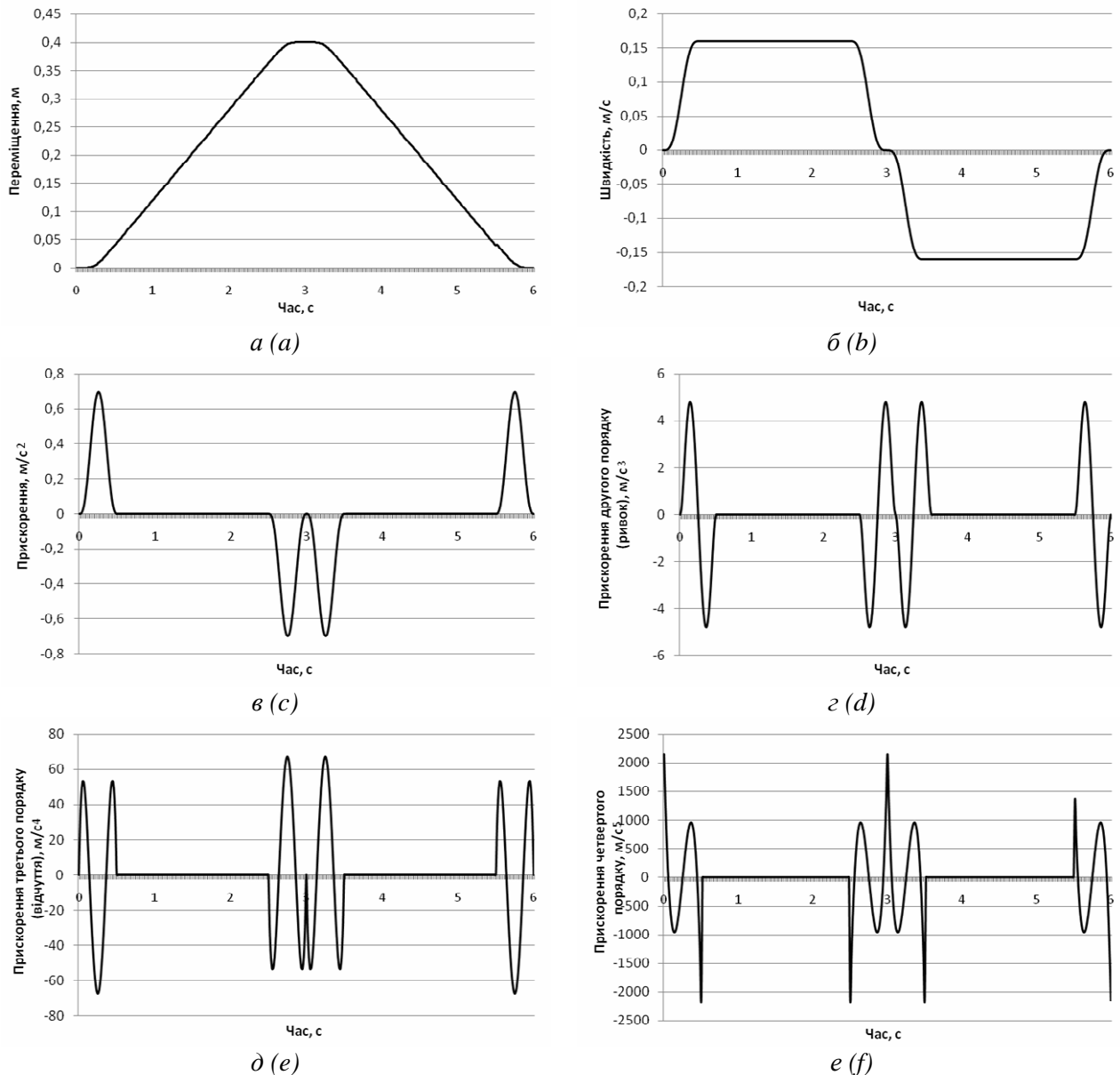


Рис. 1. Графіки зміни переміщення (а), швидкості (б), прискорення (в), прискорення другого порядку (ривка) (г), прискорення третього порядку (відчуття) (д) та прискорення четвертого порядку (е) при русі формувального візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку

Fig. 1. Schedules of change of movement (a), speeds (b), accelerations (c), acceleration of the second order (breakthrough) (d), acceleration of the third order (feeling) (e) and acceleration of the fourth order (f) at the movement of the forming cart with the optimum mode of a reversal on acceleration of the fourth order

Закон руху візка, описаний рівняннями (32)-(34), може бути здійснений приводом з кулачковим механізмом (рис. 2) зворотно-поступального руху. 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 наступними залежностями:

– на ділянці пуску:

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

– 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:

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

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

Час t можна виключити із залежностей (35)-(37), оскільки $t = \frac{\varphi}{\omega}$, а $t_3 = \frac{\pi}{\omega}$. Тут φ – кутова координата повороту кулачка, а ω – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску візка визначається залежністю $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_3$, то процес пуску буде здійснюватись при повороті кулачка на кут в межах від $\varphi = 0$ до $\varphi = \frac{\pi}{6}$, час усталеного руху – $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$, тоді усталений рух візка буде забезпечуватись поворотом кулачка на кут в межах від $\varphi = \frac{\pi}{6}$ до $\varphi = \frac{5\pi}{6}$, час гальмування – $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$. Таким чином, процес гальмування буде здійснюватись при повороті кулачка на кут в межах від $\varphi = \frac{5\pi}{6}$ до $\varphi = \pi$. Після відповідних перетворень радіус кулачка, що описує його профіль, пов'язується з кутовою координатою наступними виразами:

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

$$0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6};$$

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

$$\frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6};$$

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

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

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

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{7776 \Delta x}{5} \times \left(540 \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} - 360 \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} + 84 \frac{(\varphi - \pi)}{\pi} - 7 \right) \times \frac{(\varphi - \pi)^5}{\pi^5} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (41)$$

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

$$\frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6};$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \times$$

$$\left[\begin{aligned} &1399680 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^8 \frac{1}{\pi^8} - \\ &- 933120 \cdot \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7 \frac{1}{\pi^7} + \\ &+ 217728 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \frac{1}{\pi^6} - \\ &- 18144 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \frac{1}{\pi^5} + \\ &+ 2 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} - \frac{1}{6} \end{aligned} \right], \quad (43)$$

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

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

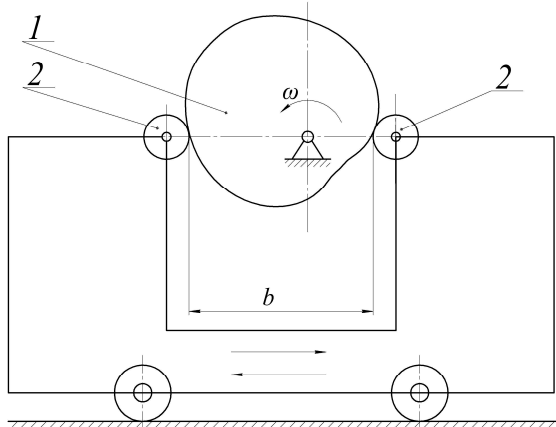


Рис. 2. Схема механізму з кулачковим приводом зворотно-поступального руху візка

Fig. 2. The scheme of the mechanism with cam drive of back and forth motion of the cart

З метою зменшення динамічних навантажень в елементах установки та для підвищення її надійності запропоновано конс-

трукцію з приводним механізмом для забезпечення зворотно-поступального руху візка з оптимальним режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку (рис. 4). Привідний механізм виконаний у вигляді шарнірно встановлених на порталі кулачкових механізмів, що контактують з штовхачами, жорстко прикріпленими до візка.

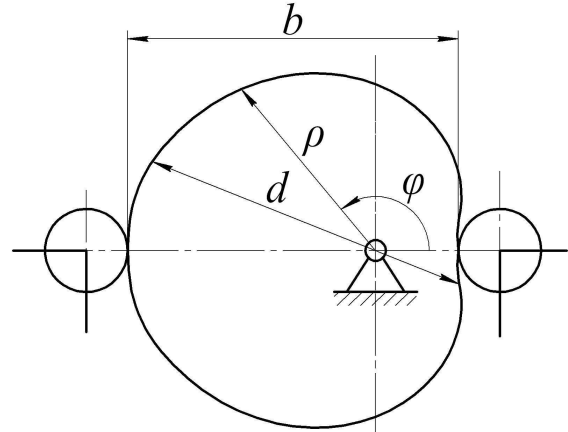


Рис. 3. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка

Fig. 3. The cam profile realizing the combined mode of the movement of the forming cart

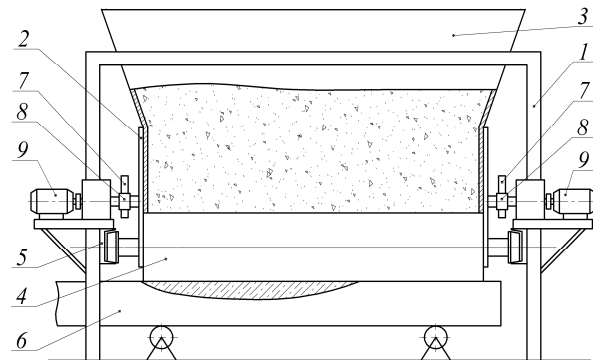


Рис. 4. Роликова формувальна установка з кулачковим приводним механізмом

Fig. 4. Roller forming installation with cam driving mechanism

Установка містить змонтований на нерухомому порталі 1 формувальний візок 2, що містить подавальний бункер 3 та укочувальні ролики 4 і здійснює зворотно-поступальний рух в напрямках 5 над порожниною форми 6. Візок приводиться до зворотно-поступального руху 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, жорст-

ко 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 привідного механізму з кожного боку формувального візка унеможливується його осьовий перекосяк, підвищується якість поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшуються динамічні навантаження в елементах приводу, зменшуються зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується довговічність установки в цілому.

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

– на ділянці пуску:

$$\dot{\phi}_n = -\frac{7776\Delta x}{5R} \left(\begin{array}{l} 4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 2520 \frac{t^2}{t_3^2} + \\ + 504 \frac{t}{t_3} - 35 \end{array} \right) \frac{t^4}{t_3^5}; \quad (44)$$

– на ділянці усталеного руху:

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

– на ділянці гальмування:

$$\dot{\phi}_2 = \frac{6\Delta x}{5R} \left(\begin{array}{l} 5598720 \frac{t^7}{t_3^8} - 3265920 \frac{t^6}{t_3^7} + \\ + 653184 \frac{t^5}{t_3^6} - 45360 \frac{t^4}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \end{array} \right), \quad (46)$$

де R – радіус укочувальних роликів.

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

$$\dot{\phi} = -\frac{7776\Delta x}{5R} \left(\begin{array}{l} 4320 \frac{t^3}{t_3^3} - 2520 \frac{t^2}{t_3^2} + \\ + 504 \frac{t}{t_3} - 35 \end{array} \right) \frac{t^4}{t_3^5}, \quad (47)$$

$$0 \leq t \leq \frac{t_3}{6};$$

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

$$\dot{\phi} = \frac{6\Delta x}{5R} \left[\begin{array}{l} 5598720 \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^7 \frac{1}{t_3^8} - \\ - 3265920 \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^6 \frac{1}{t_3^7} + \\ + 653184 \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^5 \frac{1}{t_3^6} - \\ - 45360 \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^4 \frac{1}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \end{array} \right], \quad (49)$$

$$\frac{5 \cdot t_3}{6} < t \leq t_3.$$

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

$$\dot{\phi} = \frac{7776 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \times \left[\begin{array}{l} 4320 \frac{(t-t_3)^3}{t_3^3} - 2520 \frac{(t-t_3)^2}{t_3^2} + \\ + 504 \frac{(t-t_3)}{t_3} - 35 \end{array} \right] \times \quad (50)$$

$$\times \frac{(t-t_3)^4}{t_3^5}, \quad t_3 \leq t \leq \frac{7 \cdot t_3}{6};$$

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

$$\dot{\varphi} = -\frac{6\Delta x}{5R} \left[\begin{array}{l} 5598720 \left(t - \frac{11t_3}{6} \right)^7 \frac{1}{t_3^8} - \\ - 3265920 \left(t - \frac{11t_3}{6} \right)^6 \frac{1}{t_3^7} + \\ + 653184 \left(t - \frac{11t_3}{6} \right)^5 \frac{1}{t_3^6} - \\ - 45360 \left(t - \frac{11t_3}{6} \right)^4 \frac{1}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \end{array} \right], \quad (52)$$

$$\frac{11 \cdot t_3}{6} < t \leq 2 \cdot t_3.$$

Також запропоновано конструкцію роликів формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна для забезпечення зворотного-поступального руху візка з режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням четвертого порядку (рис. 5) [14]. Установка складається з формувального візка 1, що змонтований на порталі 2, і здійснює зворотний-поступальний рух у напрямних 3 над порожниною форми 4. Формувальний візок містить подавальний бункер 5 та укочувальні ролики 6 на осі 7.

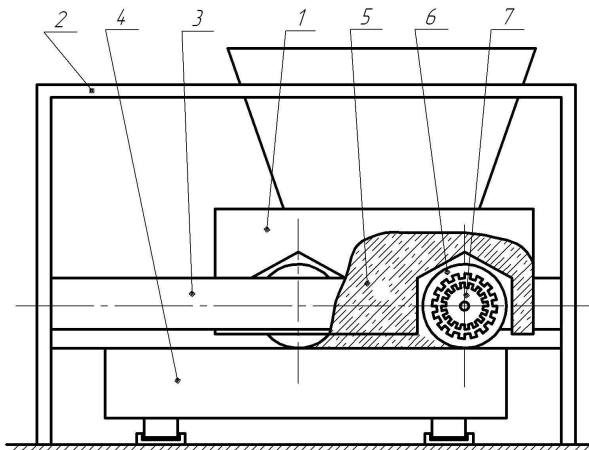


Рис. 5. Роликова формувальна установка з приводом від крокового двигуна

Fig. 5. Roller forming installation with the drive from the step engine

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

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 привідного механізму, зникають зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується надійність та довговічність установки в цілому.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликів формувальної установки розраховано режим реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку з оптимальним значенням крайових ривків.

2. Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при реверсуванні за прискоренням четвертого порядку з оптимальним значенням крайових ривків.

3. Запропоновано конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку з оптимальним значенням крайових ривків.

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

5. Результати роботи можуть в подальшому бути корисними для уточнення та удосконалення існуючих інженерних методів розрахунку привідних механізмів машин роликів формування як на стадіях проектування/конструювання, так і в режимах реальної експлуатації. Також результати роботи можуть бути корисними при проектуванні або удосконаленні механізмів із зворотним-поступальним рухом виконавчих елементів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Гарнець В.М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В.М. Гарнець. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
2. *Гарнець В.* Теорія і практика створення бетоноформувальних агрегатів (БФА) / В. Гарнець, Ю. Човнюк, С. Зайченко, В. Шаленко, Я. Приходько // Гірничі будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2014. – №83. – С. 58-62.
3. *Ловейкін В.* Реалізація оптимального динамічного режиму реверсування роликів формувальної установки / В. Ловейкін, К. Почка // Гірничі будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2015. – №86. – С. 34-41.
4. *Кузин В.Н.* Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: Автореф. дис... канд. наук. / В.Н. Кузин. – М. – 1981. – 20 с.
5. *Рюшин В.Т.* Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей: Дис. кандидата техн. наук / В.Т. Рюшин – К. – 1986. – 152 с.
6. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Динамічний аналіз роликів формувальної установки з рекуперативним приводом / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. І-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507-514.
7. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Результати експериментальних досліджень режимів руху роликів формувальної установки з рекуперативним приводом / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П.Василенка. – Харків, 2007. – № 59, Том 1. – С. 465-474.
8. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликів 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.
9. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Динамічна оптимізація режиму реверсування роликів формувальної установки / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Збірник наукових праць «Машинобудування». – Харків: УПА, 2015. – № 15. – С. 76-86.
10. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Оптимізація ривкового режиму реверсування роликів формувальної установки / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С. 186-197.
11. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Оптимізація режиму реверсування роликів формувальної установки за прискоренням третього порядку / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – № 3 (36). – С. 16-26.
12. *Ловейкін В.С.* Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Учебное пособие / В.С. Ловейкин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.
13. *Ловейкін В.С.* Визначення оптимальних режимів руху маніпулятора за процес пуску (гальмування) під час роботи за однією з узагальнених координат / В.С. Ловейкін, Д.О. Мішук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – №73, 2009. – С. 35-42.
14. *Ловейкін В.С., Почка К.І., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г.* Патент України на винахід № 105744 кл. В28В13/00: Установка для формирования виробів з бетонних сумішей. – Бюл. № 11 від 10.06.2014 р.

REFERENCES

1. *Garnec V.M., 1991.* Progresivni betonoformujuchi agregati i kompleksi [Progressive concrete the forming units and complexes]. Kyiv, Budivelnik Publ., 144.
2. *Garnets V., Chovnjuk Ju., Zajchenko S., Shalenko V., Prihodko Ja., 2014.* Teorija i praktika stvorennja betonoformuval'nih agregativ (BFA) [Theory and practical worker of creation betonoformuval'nikh aggregates (BFA)]. Girnichi budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining building, road and melioration machines], No. 83, 58-62. – (in Ukrainian).
3. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., 2015.* Realizacia optimalnogo dinamichnogo rezhimy reversuvania rolikovoi formuvalnoi ustanovki [Realization of the optimum dynamic mode of a reversal of roller forming installation]. Girnichi budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining building, road and melioration machines], No. 86, 34-41. – (in Ukrainian).

4. *Kuzin V.N., 1981.* Tehnologija rolkovogo formovaniya ploskih izdelij iz melkozernistyh betonov [Technology of roller formation of flat articles from fine-grained concrete]. Avtoref. dis... kand. nauk [Abstract of the thesis of the candidate of science]. Moscow, 20.
5. *Rjushin V.T., 1986.* Issledovanie raboche-go processa i razrabotka metodiki rascheta mashin rolkovogo formovaniya betonnyh smesey [Research of working process and development of a method of calculation of cars of roller formation of concrete mixes]. Dis. kandidata tehn. nauk. [Thesis of Candidate of Technical Sciences]. Kyiv, 152.
6. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., 2004.* Dinamichnij analiz rolkovoyi formovochnoyi ustanovki z rekuperacijnim privodom [The dynamic analysis of roller forming installation with the recuperative drive]. Dinamika, micnist i nadijnist silsko-gospodarskih mashin [Dynamics, durability and reliability of farm vehicles]. Pr. I-i Mizhna-rodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii (DSR AM-I) [Works of the first International scientific and technical conference (DSR AM-I)]. Ternopil, 507-514. – (in Ukrainian).
7. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., 2007.* Rezultati eksperimentalnih doslidzhen rezhimiv ruhu rolkovoyi formovalnoyi ustanovki z rekuperacijnim privodom [Results of pilot studies of the modes of the movement of roller forming installation with the recuperative drive]. Visnik Harkiv-skogo nacionalnogo universitetu silskogo gospodarstva im. P.Vasilenka [The bulletin of the Kharkov national university of agriculture of P. Vasilenko], No. 59, Vol.1, 465-474. – (in Ukrainian).
8. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., 2007.* Vznachennja optimalnogo znachennja kuta zmishhennja krivoshipiv rolkovoi formovalnoi ustanovki z rekuperacijnim privodom [Determination of optimum value of a corner of shift of cranks of roller forming installation with the recuperative drive]. Avtomatizacija virobnychih procesiv u mashino-buduvanni ta priladobuduvanni [Automation of productions in mechanical engineering and instrument making], No. 41, 127-134. – (in Ukrainian).
9. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., 2015.* Dinamichna optimizacija rezhimu reversuvannja rolkovoi formovalnoi ustanovki [Dynamic optimization of the mode of a reversal of roller forming installation]. Zbirnik naukovih prac' «Mashhino-buduvannja» [Collection of scientific works «Mechanical engineering»], No. 15, 76-86. – (in Ukrainian).
10. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., 2015.* Optimizacija rivkovogo rezhimu reversuvannja rolkovoi formovalnoi ustanovki [Optimization of the breakthrough mode of a reversal of roller forming installation]. Naukovij visnik Nacionalnogo universitetu bioresursiv i prirodokoristuvannja Ukraini. Serija: tehnika ta energetika APK. [Scientific bulletin of National university of bioresources and environmental management of Ukraine. Series: equipment and power of agro-industrial complex], No. 212, Vol. 1, 186-197. – (in Ukrainian).
11. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., 2015.* Optimizacija rezhimu reversuvannja rolkovoi formovalnoi ustanovki za priskorennjam tret'ogo porjadku [Optimization of the mode of a reversal of roller forming installation on acceleration of the third order]. Visnik Donbas'koi derzhavnoi mashi-nobudivnoi akademi: zbirnik naukovih prac' [Bulletin of the Donbass state machine-building academy: collection of scientific works], No. 3 (36), 16-26.
12. *Lovejkin V.S., 1990.* Raschjoty optimalnyh rezhimov dvizhenija mehanizmov stroitelnyh mashin [Calculations of the optimum modes of the movement of mechanisms of construction cars]. Uchebnoe posobie [Manual]. Kiev, UMK VO Publ., 168.
13. *Lovejkin V.S., Mishhuk D.O., 2009.* Vznachennja optimalnih rezhimiv ruhu manipuljatora za proces pysku (galmuvannja) pid chas roboti za odnoi z uzagalnenih koordinat [Determining the optimal modes of motion of the manipulator for process start (inhibition) while working for one of the generalized coordinates]. Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and reclamation machines], No. 73, 35-42. – (in Ukrainian).
14. *Lovejkin V.S., Pochka K.I., Chovnjuk Ju.V., Dikeruk M.G., 2014.* Ustanovka dlja formuvannja virobiv z betonnih sumishej [Installation for formation of products from concrete mixes]. Patent of Ukraine No. 105744. – (in Ukrainian).