

УДК 693.546

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

©Ловейкін В. С.<sup>1</sup>, Почка К. І.<sup>2</sup>

*Національний університет біоресурсів і природокористування України<sup>1</sup>*

*Київський національний університет будівництва і архітектури<sup>2</sup>*

**Інформація про авторів:**

**Ловейкін Вячеслав Сергійович:** ORCID: 0000-0003-4259-3900; lovvs@ukr.net; доктор технічних наук; завідувач кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус № 11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

**Почка Костянтин Іванович:** ORCID: 0000-0002-0355-002X; Shanovniy@ukr.net; кандидат технічних наук; завідувач кафедри основ професійного навчання; Київський національний університет будівництва і архітектури; проспект Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна.

Проведено оптимізацію крайових умов режиму реверсування роликкової формувальної установки для ущільнення виробів з бетонних сумішей за прискоренням четвертого порядку.

При проведенні оптимізації в якості критерію режиму руху використано критеріальну дію, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає енергію прискорень четвертого порядку установки.

Отримано функції зміни кінематичних характеристик формувального візка при його русі від одного крайнього положення в інше, що відповідають режиму реверсування за прискоренням четвертого порядку з оптимальним значенням крайових умов.

Запропоновано конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку з оптимальними крайовими умовами.

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

**Ключові слова:** роликкова формувальна установка; режим руху; кулачковий механізм; кроковий двигун; привод.

*Ловейкин В. С., Почка К. И.* «Обоснование граничных условий оптимального режима реверсирования роликковой формовочной установки по ускорению четвёртого порядка».

Проведена оптимизация граничных условий режима реверсирования роликковой формовочной установки для уплотнения изделий из бетонных смесей по ускорению четвёртого порядка.

При проведении оптимизации в качестве критерия режима движения использовано критериальное действие, которое представляет собой интеграл по времени с подынтегральной функцией, которая выражает энергию ускорений четвёртого порядка установки.

Получены функции изменения кинематических характеристик формовочной тележки при её движении от одного крайнего положения в другое, которые соответствуют режиму реверсирования по ускорению четвёртого порядка с оптимальным значением граничных условий.

Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения реверсирования формовочной тележки по ускорению четвёртого порядка с оптимальными граничными условиями.

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.

*Loveykin V., Pochka K.* “Justification of boundary conditions of the optimum mode of reversal of roller forming installation on acceleration of the fourth order”.

Optimization of boundary conditions of the mode of reversal of roller forming installation for consolidation of products from concrete mixes on acceleration of the fourth order is performed.

When carrying out optimization as criterion of the mode of the movement criteria action which represents integral on time with subintegral function which expresses energy of accelerations of the fourth order of installation is used.

Functions of change of kinematic characteristics of the forming cart at her movement are received from one extreme situation in another which correspond to the reversal mode on acceleration of the fourth order with optimum value of boundary conditions.

The design of the drive of installation in a type of the cam mechanism is offered and the cam profile for ensuring reversal of the forming cart on acceleration of the fourth order with optimum boundary conditions 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 offered.

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

## **1. Постановка проблеми**

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

## **2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

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

## Динаміка та міцність машин

---

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]. В роботі [7] здійснено оптимізацію динамічного режиму реверсування роlikової 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 роlikової формувальної установки за прискоренням третього порядку [9] 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 максимального значення. Тому актуальною є задача удосконалення приводного механізму роlikової формувальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формувального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

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

### 4. Виклад основного матеріалу дослідження

Для роlikової 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 [10]. 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 [10]. 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;

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

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

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

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

З виразу (3) можна записати:

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

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

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

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:  $t = 0: x = -x_1; \dot{x} = \dot{x}_0; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{x} = 0; \overset{IV}{x} = 0$ .

Кінцеві умови при гальмуванні:  $t = t_a: x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = a; \overset{IV}{x} = b; \overset{IV}{x} = c$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_0$  – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування;  $a$  – прискорення візка в кінці етапу гальмування;  $b$  – ривок візка в кінці етапу гальмування;  $\overset{IV}{c}$  – прискорення третього порядку в кінці етапу гальмування.

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

**Динаміка та міцність машин**

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

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

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

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

$$\begin{aligned} C_1 &= 15120 \cdot \left( \frac{c}{t_2^5} - 20 \cdot \frac{b}{t_2^6} + 180 \cdot \frac{a}{t_2^7} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^8} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_2^9} \right); \\ C_2 &= 6720 \cdot \left( -\frac{c}{t_2^4} + 21 \cdot \frac{b}{t_2^5} - 195 \cdot \frac{a}{t_2^6} + 960 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^7} - 1890 \cdot \frac{x_1}{t_2^8} \right); \\ C_3 &= 1260 \cdot \left( \frac{c}{t_2^3} - 22 \cdot \frac{b}{t_2^4} + 212 \cdot \frac{a}{t_2^5} - 1120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} + 2160 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); \\ C_4 &= 120 \cdot \left( -\frac{c}{t_2^2} + 23 \cdot \frac{b}{t_2^3} - 231 \cdot \frac{a}{t_2^4} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} \right); \\ C_5 &= 5 \cdot \left( \frac{c}{t_2} - 24 \cdot \frac{b}{t_2^2} + 252 \cdot \frac{a}{t_2^3} - 1680 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} x &= 630 \cdot \left( c - 20 \cdot \frac{b}{t_2} + 180 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^5} + \\ &+ 1120 \cdot \left( -c + 21 \cdot \frac{b}{t_2} - 195 \cdot \frac{a}{t_2^2} + 960 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} - 1890 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^4} + \\ &+ 630 \cdot \left( c - 22 \cdot \frac{b}{t_2} + 212 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 1120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 2160 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^3} + \\ &+ 120 \cdot \left( -c + 23 \cdot \frac{b}{t_2} - 231 \cdot \frac{a}{t_2^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t}{t_2^2} + \\ &+ 5 \cdot \left( c - 24 \cdot \frac{b}{t_2} + 252 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 1680 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{1}{t_2} \end{aligned} \quad (9)$$

або

$$x = \frac{v}{t_2} \cdot \left[ \begin{aligned} &126 \cdot \left( c - 20 \cdot \frac{b}{t_2} + 180 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + \\ &+ 224 \cdot \left( -c + 21 \cdot \frac{b}{t_2} - 195 \cdot \frac{a}{t_2^2} + 960 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} - 1890 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &+ 126 \cdot \left( c - 22 \cdot \frac{b}{t_2} + 212 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 1120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 2160 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 24 \cdot \left( -c + 23 \cdot \frac{b}{t_2} - 231 \cdot \frac{a}{t_2^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \\ &+ \left( c - 24 \cdot \frac{b}{t_2} + 252 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 1680 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \end{aligned} \right]. \quad (10)$$

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

$$I_{Qz} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} x^2 dt = \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_2^2} \cdot \int_0^{t_2} \left[ \begin{aligned} &126 \cdot \left( c - 20 \cdot \frac{b}{t_2} + 180 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + \\ &+ 224 \cdot \left( -c + 21 \cdot \frac{b}{t_2} - 195 \cdot \frac{a}{t_2^2} + 960 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} - 1890 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \\ &+ 126 \cdot \left( c - 22 \cdot \frac{b}{t_2} + 212 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 1120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 2160 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \\ &+ 24 \cdot \left( -c + 23 \cdot \frac{b}{t_2} - 231 \cdot \frac{a}{t_2^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \\ &+ \left( c - 24 \cdot \frac{b}{t_2} + 252 \cdot \frac{a}{t_2^2} - 1680 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \quad (11)$$

$$= \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_2} \cdot \left[ \begin{aligned} &c^2 - 24 \cdot \frac{c \cdot b}{t_2} + 168 \cdot \frac{c \cdot a}{t_2^2} - \frac{2688}{5} \cdot \frac{c \cdot \dot{x}_y}{t_2^3} + \frac{6048}{5} \cdot \frac{c \cdot x_1}{t_2^4} + 192 \cdot \frac{b^2}{t_2^2} - \\ &- 3024 \cdot \frac{b \cdot a}{t_2^3} + \frac{56448}{5} \cdot \frac{b \cdot \dot{x}_y}{t_2^4} - 24192 \cdot \frac{b \cdot x_1}{t_2^5} + \frac{63504}{5} \cdot \frac{a^2}{t_2^4} - 104832 \cdot \frac{a \cdot \dot{x}_y}{t_2^5} + \\ &+ 217728 \cdot \frac{a \cdot x_1}{t_2^6} + 258048 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^6} - 1016064 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot x_1}{t_2^7} + 1016064 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^8} \end{aligned} \right].$$

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

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

**Динаміка та міцність машин**

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

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

$$\begin{aligned} C_1 &= 15120 \cdot \left( -\frac{c}{t_n^5} - 20 \cdot \frac{b}{t_n^6} - 180 \cdot \frac{a}{t_n^7} + 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^8} - 1680 \cdot \frac{x_1}{t_n^9} \right); \\ C_2 &= 1680 \cdot \left( 5 \cdot \frac{c}{t_n^4} + 96 \cdot \frac{b}{t_n^5} + 840 \cdot \frac{a}{t_n^6} - 3720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^7} + 7560 \cdot \frac{x_1}{t_n^8} \right); \\ C_3 &= 420 \cdot \left( -5 \cdot \frac{c}{t_n^3} - 90 \cdot \frac{b}{t_n^4} - 756 \cdot \frac{a}{t_n^5} + 3120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} - 6480 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right); \\ C_4 &= 60 \cdot \left( 5 \cdot \frac{c}{t_n^2} + 80 \cdot \frac{b}{t_n^3} + 630 \cdot \frac{a}{t_n^4} - 2352 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} + 5040 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\ C_5 &= 5 \cdot \left( -5 \cdot \frac{c}{t_n} - 60 \cdot \frac{b}{t_n^2} - 420 \cdot \frac{a}{t_n^3} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} - 3024 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} x &= 630 \cdot \left( -c - 20 \cdot \frac{b}{t_n} - 180 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 1680 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^5} + \\ &+ 280 \cdot \left( 5 \cdot c + 96 \cdot \frac{b}{t_n} + 840 \cdot \frac{a}{t_n^2} - 3720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 7560 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^4} + \\ &+ 210 \cdot \left( -5 \cdot c - 90 \cdot \frac{b}{t_n} - 756 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 3120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 6480 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^3} + \\ &+ 60 \cdot \left( 5 \cdot c + 80 \cdot \frac{b}{t_n} + 630 \cdot \frac{a}{t_n^2} - 2352 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 5040 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t}{t_n^2} + \\ &+ 5 \cdot \left( -5 \cdot c - 60 \cdot \frac{b}{t_n} - 420 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 3024 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{1}{t_n} \end{aligned} \quad (15)$$

або

$$x = \frac{5}{t_n} \cdot \left[ \begin{aligned} &126 \cdot \left( -c - 20 \cdot \frac{b}{t_n} - 180 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 1680 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\ &+ 56 \cdot \left( 5 \cdot c + 96 \cdot \frac{b}{t_n} + 840 \cdot \frac{a}{t_n^2} - 3720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 7560 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ &+ 42 \cdot \left( -5 \cdot c - 90 \cdot \frac{b}{t_n} - 756 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 3120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 6480 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 12 \cdot \left( 5 \cdot c + 80 \cdot \frac{b}{t_n} + 630 \cdot \frac{a}{t_n^2} - 2352 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 5040 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \\ &+ \left( -5 \cdot c - 60 \cdot \frac{b}{t_n} - 420 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 3024 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \end{aligned} \right] \cdot \quad (16)$$

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

$$I_{Qn} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_n^2} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned} &126 \cdot \left( -c - 20 \cdot \frac{b}{t_n} - 180 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 1680 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + \\ &+ 56 \cdot \left( 5 \cdot c + 96 \cdot \frac{b}{t_n} + 840 \cdot \frac{a}{t_n^2} - 3720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 7560 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ &+ 42 \cdot \left( -5 \cdot c - 90 \cdot \frac{b}{t_n} - 756 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 3120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 6480 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 12 \cdot \left( 5 \cdot c + 80 \cdot \frac{b}{t_n} + 630 \cdot \frac{a}{t_n^2} - 2352 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 5040 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \\ &+ \left( -5 \cdot c - 60 \cdot \frac{b}{t_n} - 420 \cdot \frac{a}{t_n^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 3024 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \quad (17)$$

$$= \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_n} \cdot \left[ \begin{aligned} &c^2 + 24 \cdot \frac{c \cdot b}{t_n} + 168 \cdot \frac{c \cdot a}{t_n^2} - \frac{2688}{5} \cdot \frac{c \cdot \dot{x}_y}{t_n^3} + \frac{6048}{5} \cdot \frac{c \cdot x_1}{t_n^4} + 192 \cdot \frac{b^2}{t_n^2} + \\ &+ 3024 \cdot \frac{b \cdot a}{t_n^3} - \frac{56448}{5} \cdot \frac{b \cdot \dot{x}_y}{t_n^4} + 24192 \cdot \frac{b \cdot x_1}{t_n^5} + \frac{63504}{5} \cdot \frac{a^2}{t_n^4} - 104832 \cdot \frac{a \cdot \dot{x}_y}{t_n^5} + \\ &+ 217728 \cdot \frac{a \cdot x_1}{t_n^6} + 258048 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^6} - 1016064 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot x_1}{t_n^7} + 1016064 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^8} \end{aligned} \right] \cdot$$

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



**Динаміка та міцність машин**

$$I_Q = I_{Q_e} + I_{Q_n} = \frac{25m}{2t_2} \left[ \begin{aligned} & c^2 - 24 \frac{c \cdot b}{t_2} + 168 \frac{c \cdot a}{t_2^2} - \frac{2688}{5} \frac{c \cdot \dot{x}_y}{t_2^3} + \frac{6048}{5} \frac{c \cdot x_1}{t_2^4} + 192 \frac{b^2}{t_2^2} - \\ & - 3024 \frac{b \cdot a}{t_2^3} + \frac{56448}{5} \frac{b \dot{x}_y}{t_2^4} - 24192 \frac{b x_1}{t_2^5} + \frac{63504}{5} \frac{a^2}{t_2^4} - 104832 \frac{a \cdot \dot{x}_y}{t_2^5} + \\ & + 217728 \frac{a \cdot x_1}{t_2^6} + 258048 \frac{\dot{x}_y^2}{t_2^6} - 1016064 \frac{\dot{x}_y \cdot x_1}{t_2^7} + 1016064 \frac{x_1^2}{t_2^8} \end{aligned} \right] + \frac{25m}{2t_n} \left[ \begin{aligned} & c^2 + 24 \frac{c \cdot b}{t_n} + 168 \frac{c \cdot a}{t_n^2} - \frac{2688}{5} \frac{c \cdot \dot{x}_y}{t_n^3} + \frac{6048}{5} \frac{c \cdot x_1}{t_n^4} + 192 \frac{b^2}{t_n^2} + \\ & + 3024 \frac{b \cdot a}{t_n^3} - \frac{56448}{5} \frac{b \dot{x}_y}{t_n^4} + 24192 \frac{b x_1}{t_n^5} + \frac{63504}{5} \frac{a^2}{t_n^4} - 104832 \frac{a \cdot \dot{x}_y}{t_n^5} + \\ & + 217728 \frac{a \cdot x_1}{t_n^6} + 258048 \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^6} - 1016064 \frac{\dot{x}_y \cdot x_1}{t_n^7} + 1016064 \frac{x_1^2}{t_n^8} \end{aligned} \right]. \quad (18)$$

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

$$I_Q = \frac{25 \cdot m}{t_1} \left[ \begin{aligned} & c^2 + 168 \cdot \frac{c \cdot a}{t_1^2} - \frac{2688}{5} \cdot \frac{c \cdot \dot{x}_y}{t_1^3} + \frac{6048}{5} \cdot \frac{c \cdot x_1}{t_1^4} + 192 \cdot \frac{b^2}{t_1^2} + \frac{63504}{5} \cdot \frac{a^2}{t_1^4} - \\ & - 104832 \cdot \frac{a \cdot \dot{x}_y}{t_1^5} + 217728 \cdot \frac{a \cdot x_1}{t_1^6} + 258048 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^6} - 1016064 \cdot \frac{\dot{x}_y \cdot x_1}{t_1^7} + 1016064 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^8} \end{aligned} \right]. \quad (19)$$

Для забезпечення виконання нерівності (1) необхідно виконати умови:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial I_Q}{\partial x_1} &= \frac{30240 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ c + 180 \cdot \frac{a}{t_1^2} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Q}{\partial a} &= \frac{840 \cdot m}{t_1^3} \cdot \left[ 5 \cdot c + 756 \cdot \frac{a}{t_1^2} - 3120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 6480 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Q}{\partial b} &= \frac{9600 \cdot m}{t_1^3} \cdot [b] = 0; \\ \frac{\partial I_Q}{\partial c} &= \frac{10 \cdot m}{t_1} \cdot \left[ 5 \cdot c + 420 \cdot \frac{a}{t_1^2} - 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = 0. \end{aligned} \right. \quad (20)$$

Із виразів (20) можна отримати:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[ c + 180 \cdot \frac{a}{t_1^2} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = 0 \\ & \left[ 5 \cdot c + 756 \cdot \frac{a}{t_1^2} - 3120 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 6480 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = 0 \\ & b = 0 \\ & \left[ 5 \cdot c + 420 \cdot \frac{a}{t_1^2} - 1344 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = 0 \end{aligned} \right. \Rightarrow \begin{aligned} x_1 &= \frac{93}{128} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1; & a &= -\frac{35}{16} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; \\ b &= 0; & c &= \frac{105}{8} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}. \end{aligned} \quad (21)$$

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

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 1575 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = -1575 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 630 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = -105 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4};$$

$$C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_{10} = -\frac{93}{128} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1.$$
(22)

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

$$x = \frac{1}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{5}{16} \cdot \frac{t^8}{t_1^7} - \frac{5}{2} \cdot \frac{t^7}{t_1^6} + 7 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 7 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 8 \cdot t - \frac{93}{16} \cdot t_1 \right);$$

$$\dot{x} = \frac{1}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^7}{t_1^7} - 35 \cdot \frac{t^6}{t_1^6} + 84 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 70 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 16 \right);$$

$$\ddot{x} = \frac{35}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^7} - 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^6} + 12 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} - 8 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^5}{t_1^7} - 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^6} + 8 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 4 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} \right);$$

$$x^{IV} = \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^7} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^6} + 24 \cdot \frac{t^2}{t_1^5} - 8 \cdot \frac{t}{t_1^4} \right); \quad x^V = \frac{105}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^3}{t_1^7} - 15 \cdot \frac{t^2}{t_1^6} + 12 \cdot \frac{t}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{1}{t_1^4} \right).$$
(23)

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

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 1575 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = -\frac{315}{2} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = 0;$$

$$C_6 = \frac{105}{8} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = -\frac{35}{16} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad C_9 = 0; \quad C_{10} = 0.$$
(24)

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

$$x = \frac{1}{128} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^8}{t_1^7} - 28 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} + 70 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 140 \cdot \frac{t^2}{t_1} \right); \quad \dot{x} = \frac{1}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^7}{t_1^7} - 21 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} + 35 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 35 \cdot \frac{t}{t_1} \right);$$

$$\ddot{x} = \frac{35}{16} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} + 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^3} - \frac{1}{t_1} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^5}{t_1^7} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} + \frac{t}{t_1^3} \right);$$

$$x^{IV} = \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^7} - 6 \cdot \frac{t^2}{t_1^5} + \frac{1}{t_1^3} \right); \quad x^V = \frac{105}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^3}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t}{t_1^5} \right).$$
(25)

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

**Динаміка та міцність машин**

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

де  $x_{0y}$  та  $x_{1y}$  – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі;  $t_\delta$  – 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  $\dot{x}_y$ :

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \frac{93}{64} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + \frac{93}{64} \cdot t_1}. \quad (27)$$

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 –  $t_z$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу прийемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_z = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

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

$$\dot{x}_y = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot t_3}; \quad x_1 = \frac{93}{698} \cdot \Delta x. \quad (28)$$

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:

$$\begin{aligned}
 x &= -\frac{72}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 58320 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 9072 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 630 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 35 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^2}; \\
 \dot{x} &= -\frac{144}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 233280 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 27216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 1260 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 35 \right) \cdot \frac{t}{t_3}; \\
 \ddot{x} &= -\frac{5040}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 46656 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 3888 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 108 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_3^2}; \\
 \ddot{\ddot{x}} &= -\frac{1088640}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 1296 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 72 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 1 \right) \cdot \frac{t}{t_3^4}; \\
 x^{IV} &= -\frac{1088640}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 6480 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 216 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 1 \right) \cdot \frac{1}{t_3^4}; \quad v = -\frac{470292480}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 60 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 1 \right) \cdot \frac{t}{t_3^6};
 \end{aligned} \tag{29}$$

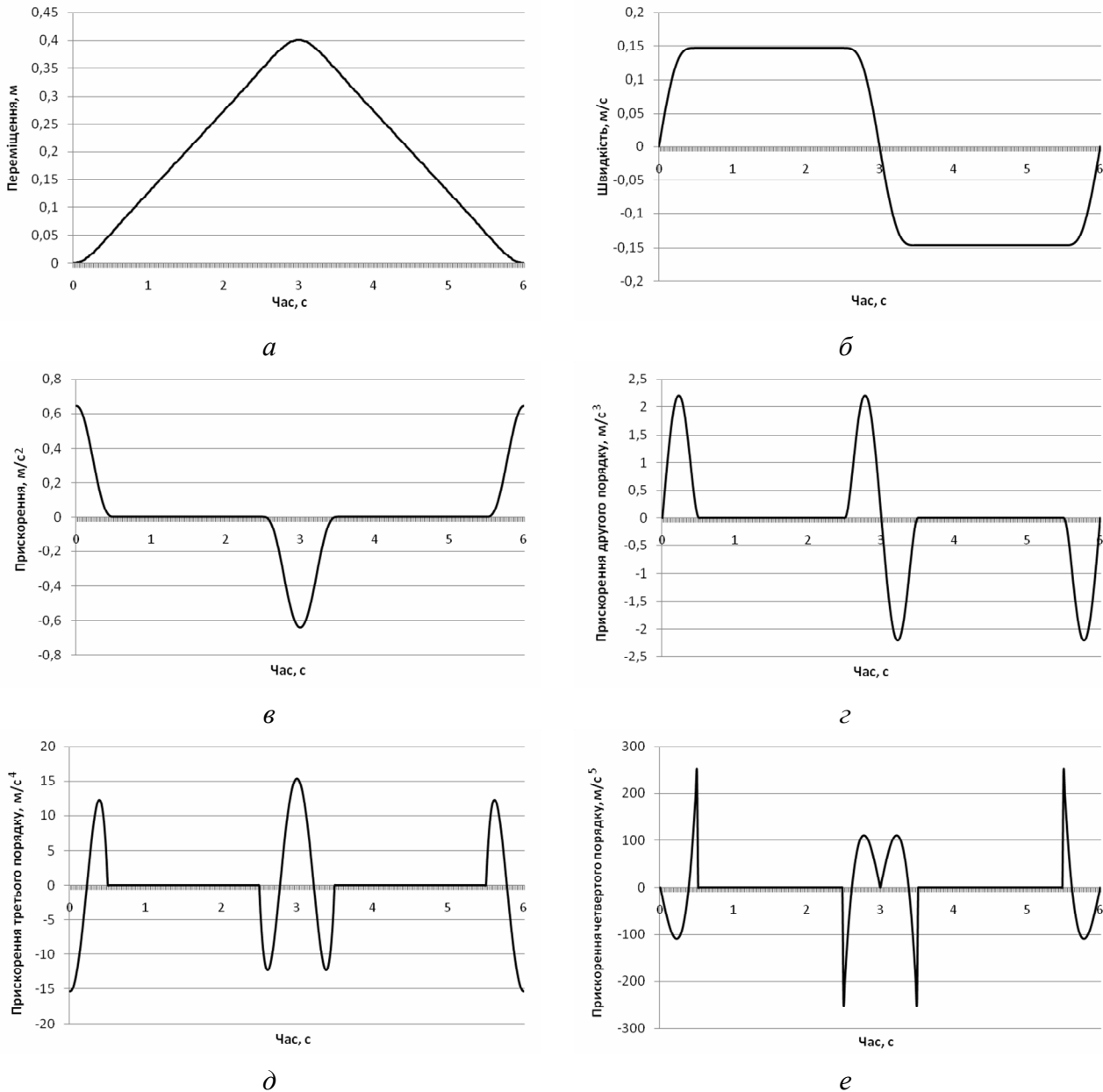
– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{3}{698} \cdot \Delta x \cdot \left( 31 + 256 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad x^{IV} = 0; \quad v = 0; \tag{30}$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned}
 x &= \Delta x + \frac{48}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 87480 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} - 116640 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} + 54432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 9072 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} - \frac{31}{32} \right); \\
 \dot{x} &= \frac{384}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 87480 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} - 102060 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + 40824 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} - 5670 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + \frac{1}{t_3} \right); \\
 \ddot{x} &= \frac{8709120}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 27 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 27 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 9 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t^3}{t_3^5}; \\
 \ddot{\ddot{x}} &= -\frac{26127360}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 54 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 45 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 12 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^5}; \\
 x^{IV} &= \frac{52254720}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 135 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 90 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 18 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t}{t_3^5}; \\
 v &= \frac{52254720}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 540 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 270 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 36 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_3^5};
 \end{aligned} \tag{31}$$

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 режимом реверсування при оптимальних крайових умовах за прискоренням четвертого порядку.

**Динаміка та міцність машин**

**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 режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку при оптимальних крайових умовах

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

– на ділянці пуску:

$$x = -\frac{72}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 58320 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 9072 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 630 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 35 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (32)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{128}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (33)$$

- на ділянці гальмування:

$$x = \frac{\Delta x}{2} + \frac{48}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 87480 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} - 116640 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} + 54432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 9072 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} - \frac{31}{32} \right). \quad (34)$$

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

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

- на ділянці пуску:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{72}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 58320 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 9072 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 630 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 35 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (35)$$

- на ділянці усталеного руху:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{128}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 3 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right); \quad (36)$$

- на ділянці гальмування:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} + \frac{48}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 87480 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} - 116640 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} + 54432 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 9072 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 8 \cdot \frac{t}{t_3} - \frac{31}{32} \right), \quad (37)$$

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

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

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{72}{349} \cdot \Delta x \cdot \left( 58320 \cdot \frac{\varphi^6}{\pi^6} - 9072 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} + 630 \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} - 35 \right) \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (38)$$

**Динаміка та міцність машин**

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{128}{349} \cdot \Delta x \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (39)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} + \frac{48}{349} \cdot \Delta x \cdot \left[ \begin{aligned} &87480 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^8 \cdot \frac{1}{\pi^8} - 116640 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{\pi^7} + \\ &+ 54432 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 9072 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ &+ 8 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - \frac{31}{32} \end{aligned} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (40)$$

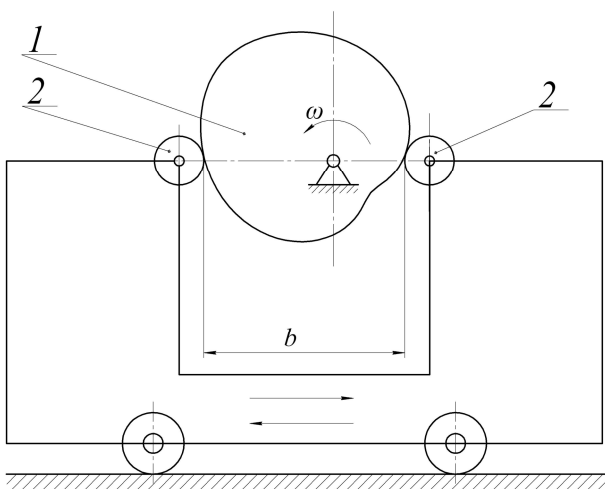
Аналогічно визначається профіль кулачка на ділянці його повороту від  $\pi$  до  $2\pi$ , який описується радіусом, що змінюється залежностями:

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{72}{349} \cdot \Delta x \cdot \left[ \begin{aligned} &58320 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^6}{\pi^6} - 9072 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + \\ &+ 630 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - 35 \end{aligned} \right] \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (41)$$

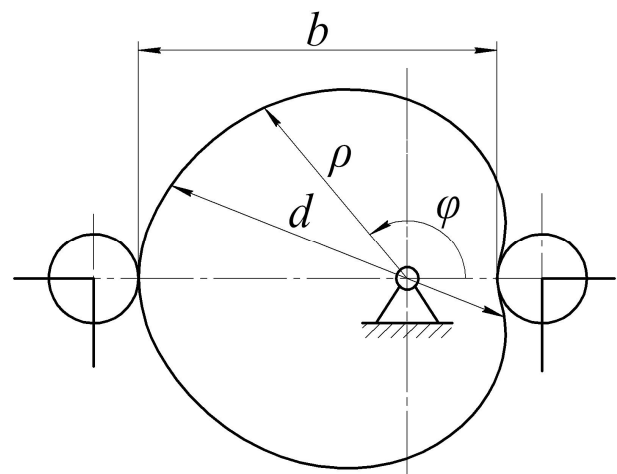
$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{128}{349} \cdot \Delta x \cdot \left[ 3 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (42)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} - \frac{48}{349} \cdot \Delta x \cdot \left[ \begin{aligned} &87480 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^8 \cdot \frac{1}{\pi^8} - 116640 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{\pi^7} + \\ &+ 54432 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 9072 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ &+ 8 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - \frac{31}{32} \end{aligned} \right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (43)$$

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



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



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

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

Установка вміщує змонтований на нерухомому порталі 1 формувальний візок 2, що вміщує подавальний бункер 3 та укочувальні ролики 4 і здійснює зворотно-поступальний рух в напрямних 5 над порожниною форми 6. Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою двох приводів 7, прикріплених до порталу 1 у вигляді двох кулачкових механізмів, що обертаються з постійною кутовою швидкістю ( $\omega = const$ ), але різною за напрямками, і контактують з двома штовхачами 8, жорстко з'єднаними з візком 2. Наявність двох штовхачів 8 з кожного боку формувального візка 2 дозволяє створювати жорсткий силовий ланцюг при його прямому і зворотному ході.

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

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

– на ділянці пуску:

$$\dot{\varphi}_n = -\frac{144 \cdot \Delta x}{349 \cdot R} \cdot \left( 233280 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 27216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 1260 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 35 \right) \cdot \frac{t}{t_3^2}; \quad (44)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\dot{\varphi}_y = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot t_3 \cdot R}; \quad (45)$$

– на ділянці гальмування:

$$\dot{\varphi}_z = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot R} \cdot \left( 87480 \cdot \frac{t^7}{t_3^8} - 102060 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} + 40824 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 5670 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \right), \quad (46)$$

де  $R$  – радіус укочувальних роликів.

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



**Динаміка та міцність машин**

$$\dot{\varphi} = -\frac{144 \cdot \Delta x}{349 \cdot R} \cdot \left( 233280 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 27216 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} + 1260 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 35 \right) \cdot \frac{t}{t_3}, \quad 0 \leq t \leq \frac{t_3}{6}; \quad (47)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot t_3 \cdot R}, \quad \frac{t_3}{6} < t < \frac{5t_3}{6}; \quad (48)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot R} \cdot \left[ \begin{array}{l} 87480 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{t_3^8} - 102060 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{t_3^7} + \\ 40824 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} - 5670 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \end{array} \right], \quad \frac{5t_3}{6} < t \leq t_3. \quad (49)$$

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

$$\dot{\varphi} = \frac{144 \cdot \Delta x}{349 \cdot R} \cdot \left[ 233280 \cdot \frac{(t-t_3)^6}{t_3^6} - 27216 \cdot \frac{(t-t_3)^4}{t_3^4} + 1260 \cdot \frac{(t-t_3)^2}{t_3^2} - 35 \right] \cdot \frac{(t-t_3)}{t_3}, \quad t_3 \leq t \leq \frac{7t_3}{6}; \quad (50)$$

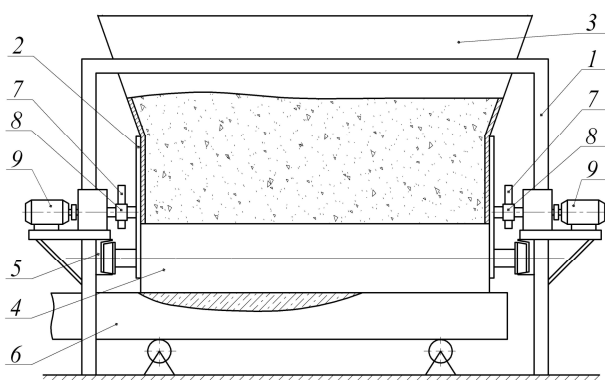
$$\dot{\varphi} = -\frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot t_3 \cdot R}, \quad \frac{7t_3}{6} < t < \frac{11t_3}{6}; \quad (51)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot R} \cdot \left[ \begin{array}{l} 87480 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{t_3^8} - 102060 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{t_3^7} + \\ 40824 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} - 5670 \cdot \left( t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_3^5} + \frac{1}{t_3} \end{array} \right], \quad \frac{11t_3}{6} < t \leq 2 \cdot t_3. \quad (52)$$

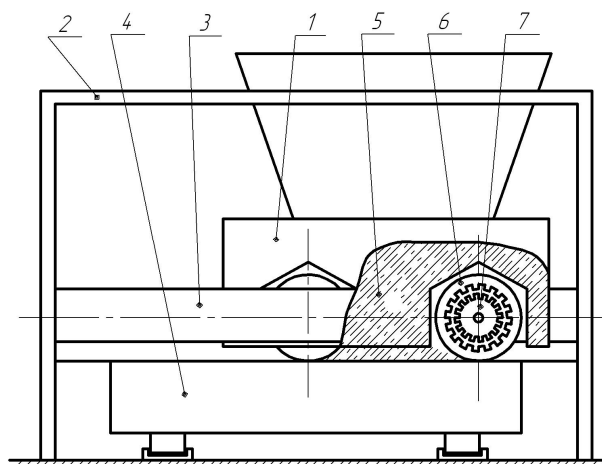
Також запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка з режимом реверсування за прискоренням четвертого порядку при оптимальних крайових умовах (рис. 5). Установка складається 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 [11].

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



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



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

### Висновки

1. В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступального руху формувального візка з реверсування за прискоренням четвертого порядку при оптимальних крайових умовах. Визначено оптимальні значення прискорення, прискорення другого порядку (ривка) та прискорення третього порядку (відчуття) візка в кінці етапу гальмування.

2. Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при реверсуванні за прискоренням четвертого порядку при оптимальних крайових умовах.

3. Запропоновано конструкцію приводу установки у вигляді кулачкового механізму та побудовано профіль кулачка для забезпечення реверсування формувального візка за прискоренням четвертого порядку з оптимальними крайовими умовами.

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

5. Результати роботи можуть в подальшому бути корисними для уточнення та удосконалення існуючих інженерних методів розрахунку приводних механізмів машин роликового формування як на стадіях проектування/конструювання, так і в режимах реальної експлуатації. 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 бетоноформуєчі агрегати і комплекси / В. М. Гарнець. – Київ : Будівельник, 1991. – 144 с.
2. Кузин В. Н. Технологія роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов : автореф. дис... канд. техн. наук / Кузин Вячеслав Николаевич. – М., 1981. – 20 с.
3. Рюшин В. Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей : дис. ... канд. техн. наук / В. Т. Рюшин. – Киев, 1986. – 200 с.
4. Ловейкін В. С. Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекуперативним приводом. / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин : праці I Міжнар. наук.-техн. конф. (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507-514.

**Динаміка та міцність машин**

5. Ловейкін В. С. 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.
6. Ловейкін В. С. 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*. – 2007. – № 41. – С. 127-134.
7. Ловейкін В. С. Динамічна оптимізація режиму реверсування роликів формувальної установки / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2015. – № 15. – С. 76-86.
8. Ловейкін В. С. 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. – Київ, 2015. – Вип. 212. – Ч. 1. – С. 186-197.
9. Ловейкін В. С. Оптимізація режиму реверсування роликів формувальної установки за прискоренням третього порядку / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – № 3 (36). – С. 16-26.
10. Ловейкин В. С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин: учеб. пособие / В. С. Ловейкин. – Киев : УМК ВО, 1990. – 168 с.
11. Пат. 105744 Україна, МПК В28В13/00 (2014.01). Установка для формирования виробів з бетонних сумішей / В. С. Ловейкін, К. І. Почка, Ю. В. Човнюк, М. Г. Діктерук ; Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № а201309305 ; заявл. 25.07.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

**References**

1. Harnets, V 1991, *Prohresyvni betonoformuiuchi ahrehaty i komplekisy*, Budivelnyk, Kyiv.
2. Kuzin, V 1981, 'Tekhnologiya rolikovogo formovaniya ploskikh izdeliy iz melkozernistykh betonov', *Kand.tekhn.n. abstract*, Moskva.
3. Ryushin, V 1986, 'Issledovaniye rabocheho protsessa i razrabotka metodiki rascheta mashin rolikovogo formovaniya betonnykh smesey', *Kand.tekhn.n. thesis*, Kyiv.
4. Loveikin, V & Pochka, K 2004, 'Dynamichniy analiz rolykovo formovochnoi ustanovky z rekupe ratsi inym pryvodom', *Dynamika, mitsnist i nadiinist silskohospodarskykh mashyn : pratsi I Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. (DSR AM-I)*, pp. 507-514.
5. Loveikin, V & Pochka, K 2007, 'Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen rezhymiv rukhu rolykovo formuvalnoi ustanovky z rekupe ratsi inym pryvodom', *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka*, no. 59, vol 1, pp. 465-474.
6. Loveikin, V & Pochka, K 2007, 'Vyznachennia optymalnoho znachennia kuta zmishchennia kryvoshypiv rolykovo formuvalnoi ustanovky z rekupe ratsi inym pryvodom', *Avtomatyzatsiia vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*, no. 41, pp. 127-134.
7. Loveikin, V & Pochka, K 2015, 'Dynamichna optymizatsiia rezhymu reversuvanni rolykovo formuvalnoi ustanovky', *Mashynobuduvannia*, iss. 15, pp. 76-86.
8. Loveikin V & Pochka, K 2015, 'Optymizatsiia ryvkovoho rezhymu reversuvanni rolykovo formuvalnoi ustanovky', *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK*, iss. 212, p. 1, pp. 186-197.
9. Loveikin V & Pochka, K 2015, 'Optymizatsiia rezhymu reversuvanni rolykovo formuvalnoi ustanovky za pryskorenniam tretoho poriadku', *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii*, no. 3 (36), pp. 16-26.
10. Loveykin, V 1990, *Raschety optimalnykh rezhimov dvizheniya mekhanizmov stroitelnykh mashin*, UMK VO, Kyiv.
11. Loveikin, V, Pochka, K, Chovniuk, Yu, Dikteruk, M 2013, *Ustanovka dlia formuvannia vyrobiv z betonnykh sumishei*, UA Patent 105744.

Стаття надійшла до редакції 6 квітня 2018 р.