



## **Машины і обладнання технологічних процесів будівельної індустрії**

УДК 693.546

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

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

<sup>1</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041

<sup>2</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури  
Повітрофлотський пр-т, 31, 03680, Київ, Україна; e-mail: shanovniy@ukr.net

**АНОТАЦІЯ.** З метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступального руху формувального візка з реверсуванням при оптимальних крайових умовах за прискоренням четвертого порядку. Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при реверсуванні 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 оптимальним значенням крайових умов. Також запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в уключувальні ролики формувального візка установки. Застосування в установці вказаного приводного механізму приводить до підвищення якості поверхні оброблюваної бетонної суміші, зменшення динамічних навантажень в елементах приводного механізму, зникненню зайвих руйнівних навантажень на рамну конструкцію і, відповідно, до підвищення надійності та довговічності установки в цілому.

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

### **ОБОСНОВАНИЕ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РЕВЕРСИРОВАНИЯ РОЛИКОВОЙ ФОРМОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ ПО УСКОРЕНИЮ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА**

*В.С. Ловейкин<sup>1</sup>, К.И. Почка<sup>2\*</sup>*

<sup>1</sup> Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины  
ул. Героев Оборони, 15, г. Киев, 03041

<sup>2</sup> Киевский национальный университет строительства и архитектуры  
Воздухофлотский пр-т, 31, 03680, Киев, Украина; e-mail: shanovniy@ukr.net

**АННОТАЦИЯ.** С целью повышения надежности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочного тележки с реверсированием при оптимальных краевых условиях с ускорением четвертого порядка. Рассчитано кинематические характеристики формовочного тележки при реверсировании по ускорению четвертого порядка с оптимальным значением краевых условий. Предложена конструкция поводу установки в виде кулачкового механизма и построено профиль кулачка для обеспечения реверсирования формовочного тележки с ускорением четвертого порядка с оптимальным значением краевых условий. Также предложена конструкция роликовой формовочной установки с приводом от высокомоментного шагового двигателя, встроенный в уплотняющие ролики формовочной тележки. Применение в установке указанного приводного механизма приводит к повышению качества поверхности обрабатываемой бетонной смеси, уменьшению динамических нагрузок в элементах приводного механизма, исчезновению лишних разрушающих нагрузок на рамную конструкцию и, соответственно, к повышению надежности и долговечности установки в целом.

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

## SUBSTANTIATION OF BOUNDARY CONDITIONS FOR THE OPTIMAL MODE OF REVERSAL OF THE ROTATIONAL MOLDING UNIT WITH ACCELERATION OF THE FOURTH ORDER

V.S. Loveykin<sup>1</sup>, K.I. Pochka<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
15, street Heroes of Defense, Kyiv, 03041

<sup>2</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture,  
31, Povitroflotsky Ave., 03680, Kyiv, Ukraine; e-mail: shanovnyy@ukr.net

**ABSTRACT.** For the purpose of increase in reliability and durability of roller forming installation the combined mode of back and forth motion of the forming cart with a reversal under optimum boundary conditions on acceleration of the fourth order is calculated. Kinematic characteristics of the forming cart at a reversal on acceleration of the fourth order with optimum values of boundary conditions 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 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 also offered. Use in installation of the specified driving mechanism leads to improvement of quality of a surface to the processed concrete mix, reduction of dynamic loadings in elements of the driving mechanism, to disappearance of excess destructive loads of a frame design and, respectively, to increase in reliability and durability of installation in general.

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

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

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликового формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність [1-3]. Разом з тим недостатньо уваги приділено дослідженню діючим динамічним навантаженням та режимам руху, що в значній мірі впливає на роботу установки та на якість готової продукції. Під час постійних пускогальмівних режимів руху виникають значні динамічні навантаження в елементах приводного механізму та в елементах формувального візка, що може привести до передчасного виходу установки з ладу [1-6]. В роботі [7] здійснено оптимізацію динамічного режиму реверсування роликової 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 роликової 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 роликової формувальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формувального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

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

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для роликової формувальної установки при ущільненні бетонної суміші бажано мати постійну швидкість зворотно-поступального руху формувального візка на всій ділянці, що позитивно вплинуло б на якість готового



виробу. Однак на практиці такий режим руху здійснити неможливо, оскільки в ньому відсутні ділянки розгону та гальмування, без яких не може бути циклічного руху. Тому пропонується реалізувати такий режим руху формувального візка при його переміщенні, у якому були б ділянки реверсування з мінімальними динамічними навантаженнями та ділянки руху з постійною швидкістю.

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

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

де  $t$  – час;  $t_\delta$  – тривалість реверсування;  $Q$  – енергія прискорень четвертого порядку:

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

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

Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Пуассона:

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

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

З виразу (3) можна записати:

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

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

$$\begin{aligned}
 x &= 0; & \overset{ix}{x} &= C_1; & \overset{viii}{x} &= C_1 \cdot t + C_2; & \overset{vii}{x} &= \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \\
 \overset{vi}{x} &= \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4; & \overset{v}{x} &= \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t^2 + C_4 \cdot t + C_5; \\
 \overset{iv}{x} &= \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t^2 + C_5 \cdot t + C_6; \\
 \ddot{x} &= \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t^2 + C_6 \cdot t + C_7; \\
 \ddot{x} &= \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot t^2 + C_7 \cdot t + C_8; \\
 \dot{x} &= \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_5 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_6 \cdot t^3 + \\
 & \quad + \frac{1}{2} \cdot C_7 \cdot t^2 + C_8 \cdot t + C_9; \\
 x &= \frac{1}{362880} \cdot C_1 \cdot t^9 + \frac{1}{40320} \cdot C_2 \cdot t^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_3 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_4 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_5 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_6 \cdot t^4 + \\
 & \quad + \frac{1}{6} \cdot C_7 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_8 \cdot t^2 + C_9 \cdot t + C_{10},
 \end{aligned} \tag{5}$$

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

Розділимо процес реверсування на два етапи: гальмування та пуск.

При гальмуванні початковими умовами є:  $t = 0: x = -x_1; \dot{x} = \dot{x}_\phi; \ddot{x} = 0; \overset{iv}{\ddot{x}} = 0; x = 0$ .

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

При пуску початковими умовами є:  $t = 0: x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = a; \overset{iv}{\ddot{x}} = b; x = \tilde{n}$ . Кінцеві умови при пуску:  $t = t_r: x = -x_1; \dot{x} = -\dot{x}_\phi; \ddot{x} = 0; \overset{iv}{\ddot{x}} = 0; x = 0$ .

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

$$t = 0: C_{10} = -x_1; \tilde{N}_9 = \dot{x}_\phi; \tilde{N}_8 = 0; \tilde{N}_7 = 0; \tilde{N}_6 = 0; \tag{6}$$

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



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

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

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

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

або

$$v_x = \frac{5}{t_{\bar{a}}} \cdot \left[ \begin{aligned}
 &126 \cdot \left( \tilde{n} - 20 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} + 180 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_{\bar{a}}^3} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_{\bar{a}}^4} + \\
 &+ 224 \cdot \left( -\tilde{n} + 21 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} - 195 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} + 960 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_{\bar{a}}^3} - 1890 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_{\bar{a}}^3} + \\
 &+ 126 \cdot \left( \tilde{n} - 22 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} + 212 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} - 1120 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_{\bar{a}}^3} + 2160 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_{\bar{a}}^2} + \\
 &+ 24 \cdot \left( -\tilde{n} + 23 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} - 231 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_{\bar{a}}^3} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t}{t_{\bar{a}}} + \\
 &+ \left( \tilde{n} - 24 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} + 252 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} - 1680 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_{\bar{a}}^3} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right)
 \end{aligned} \right]. \tag{10}$$

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

$$I_{Q\bar{a}} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_{\bar{a}}} v^2 dt = \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_{\bar{a}}^2} \cdot \int_0^{t_{\bar{a}}} \left[ \begin{aligned} & 126 \cdot \left( \tilde{n} - 20 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} + 180 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} - 840 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^3} + 1680 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_{\bar{a}}} + \\ & + 224 \cdot \left( -\tilde{n} + 21 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} - 195 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} + 960 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^3} - 1890 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_{\bar{a}}} + \\ & + 126 \cdot \left( \tilde{n} - 22 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} + 212 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} - 1120 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^3} + 2160 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_{\bar{a}}} + \\ & + 24 \cdot \left( -\tilde{n} + 23 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} - 231 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^3} - 2520 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \cdot \frac{t}{t_{\bar{a}}} + \\ & + \left( \tilde{n} - 24 \cdot \frac{b}{t_{\bar{a}}} + 252 \cdot \frac{a}{t_{\bar{a}}^2} - 1680 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^3} + 3024 \cdot \frac{x_1}{t_{\bar{a}}^4} \right) \end{aligned} \right]^2 dt = \tag{11} \\
 = \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_{\bar{a}}} \cdot \left[ \begin{aligned} & c^2 - 24 \cdot \frac{c \cdot b}{t_{\bar{a}}} + 168 \cdot \frac{c \cdot a}{t_{\bar{a}}^2} - \frac{2688}{5} \cdot \frac{c \cdot \dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^3} + \frac{6048}{5} \cdot \frac{c \cdot x_1}{t_{\bar{a}}^4} + 192 \cdot \frac{b^2}{t_{\bar{a}}^2} - \\ & - 3024 \cdot \frac{b \cdot a}{t_{\bar{a}}^3} + \frac{56448}{5} \cdot \frac{b \cdot \dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^4} - 24192 \cdot \frac{b \cdot x_1}{t_{\bar{a}}^5} + \frac{63504}{5} \cdot \frac{a^2}{t_{\bar{a}}^4} - 104832 \cdot \frac{a \cdot \dot{x}_{\bar{o}}}{t_{\bar{a}}^5} + \\ & + 217728 \cdot \frac{a \cdot x_1}{t_{\bar{a}}^6} + 258048 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}}^2}{t_{\bar{a}}^6} - 1016064 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}} \cdot x_1}{t_{\bar{a}}^7} + 1016064 \cdot \frac{x_1^2}{t_{\bar{a}}^8} \end{aligned} \right].$$

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

$$t = 0: \quad C_6 = c; \quad \tilde{N}_7 = b; \quad \tilde{N}_8 = a; \quad \tilde{N}_9 = 0; \quad \tilde{N}_{10} = 0; \tag{12}$$

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

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

$$C_1 = 15120 \cdot \left( -\frac{\tilde{n}}{t_i^5} - 20 \cdot \frac{b}{t_i^6} - 180 \cdot \frac{a}{t_i^7} + 840 \cdot \frac{\dot{x}_{\bar{o}}}{t_i^8} - 1680 \cdot \frac{x_1}{t_i^9} \right); \tag{14}$$



$$\begin{aligned}
 C_2 &= 1680 \cdot \left( 5 \cdot \frac{\tilde{n}}{t_i^4} + 96 \cdot \frac{b}{t_i^5} + 840 \cdot \frac{a}{t_i^6} - 3720 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^7} + 7560 \cdot \frac{x_1}{t_i^8} \right); \\
 C_3 &= 420 \cdot \left( -5 \cdot \frac{\tilde{n}}{t_i^3} - 90 \cdot \frac{b}{t_i^4} - 756 \cdot \frac{a}{t_i^5} + 3120 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^6} - 6480 \cdot \frac{x_1}{t_i^7} \right); \\
 C_4 &= 60 \cdot \left( 5 \cdot \frac{\tilde{n}}{t_i^2} + 80 \cdot \frac{b}{t_i^3} + 630 \cdot \frac{a}{t_i^4} - 2352 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^5} + 5040 \cdot \frac{x_1}{t_i^6} \right); \\
 C_5 &= 5 \cdot \left( -5 \cdot \frac{\tilde{n}}{t_i} - 60 \cdot \frac{b}{t_i^2} - 420 \cdot \frac{a}{t_i^3} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^4} - 3024 \cdot \frac{x_1}{t_i^5} \right).
 \end{aligned}$$

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  $\dot{x}_o$ :

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

або

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

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



$$I_{Qv} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_i} x^2 dt = \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_i^2} \cdot \int_0^{t_i} \left[ \begin{aligned} & 126 \cdot \left( -\tilde{n} - 20 \cdot \frac{b}{t_i} - 180 \cdot \frac{a}{t_i^2} + 840 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^3} - 1680 \cdot \frac{x_1}{t_i^4} \right) \cdot \frac{t^4}{t_i^4} + \\ & + 56 \cdot \left( 5 \cdot \tilde{n} + 96 \cdot \frac{b}{t_i} + 840 \cdot \frac{a}{t_i^2} - 3720 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^3} + 7560 \cdot \frac{x_1}{t_i^4} \right) \cdot \frac{t^3}{t_i^3} + \\ & + 42 \cdot \left( -5 \cdot \tilde{n} - 90 \cdot \frac{b}{t_i} - 756 \cdot \frac{a}{t_i^2} + 3120 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^3} - 6480 \cdot \frac{x_1}{t_i^4} \right) \cdot \frac{t^2}{t_i^2} + \\ & + 12 \cdot \left( 5 \cdot \tilde{n} + 80 \cdot \frac{b}{t_i} + 630 \cdot \frac{a}{t_i^2} - 2352 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^3} + 5040 \cdot \frac{x_1}{t_i^4} \right) \cdot \frac{t}{t_i} + \\ & + \left( -5 \cdot \tilde{n} - 60 \cdot \frac{b}{t_i} - 420 \cdot \frac{a}{t_i^2} + 1344 \cdot \frac{\dot{x}_o}{t_i^3} - 3024 \cdot \frac{x_1}{t_i^4} \right) \end{aligned} \right] dt = \\
 = \frac{25 \cdot m}{2 \cdot t_i} \cdot \left[ \begin{aligned} & c^2 + 24 \cdot \frac{c \cdot b}{t_i} + 168 \cdot \frac{c \cdot a}{t_i^2} - \frac{2688}{5} \cdot \frac{c \cdot \dot{x}_o}{t_i^3} + \frac{6048}{5} \cdot \frac{c \cdot x_1}{t_i^4} + 192 \cdot \frac{b^2}{t_i^2} + \\ & + 3024 \cdot \frac{b \cdot a}{t_i^3} - \frac{56448}{5} \cdot \frac{b \cdot \dot{x}_o}{t_i^4} + 24192 \cdot \frac{b \cdot x_1}{t_i^5} + \frac{63504}{5} \cdot \frac{a^2}{t_i^4} - 104832 \cdot \frac{a \cdot \dot{x}_o}{t_i^5} + \\ & + 217728 \cdot \frac{a \cdot x_1}{t_i^6} + 258048 \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_i^6} - 1016064 \cdot \frac{\dot{x}_o \cdot x_1}{t_i^7} + 1016064 \cdot \frac{x_1^2}{t_i^8} \end{aligned} \right] \quad (1)$$

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

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

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

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

Для забезпечення виконання нерівності (1) необхідно виконати умови:





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

Із виразів (20) можна отримати:

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

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

$$\begin{aligned} C_1 = 0; \quad C_2 = 1575 \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1^7}; \quad C_3 = -1575 \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1^6}; \quad C_4 = 630 \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1^5}; \quad C_5 = -105 \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1^4}; \\ \tilde{N}_6 = 0; \quad \tilde{N}_7 = 0; \quad \tilde{N}_8 = 0; \quad \tilde{N}_9 = \dot{x}_\phi; \quad C_{10} = -\frac{93}{128} \cdot \dot{x}_\phi \cdot t_1. \end{aligned} \quad (22)$$

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

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{8} \cdot \dot{x}_\phi \cdot \left( \frac{5}{16} \cdot \frac{t^8}{t_1^7} - \frac{5}{2} \cdot \frac{t^7}{t_1^6} + 7 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 7 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 8 \cdot t - \frac{93}{16} \cdot t_1 \right); \\ \dot{x} &= \frac{1}{16} \cdot \dot{x}_\phi \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^7}{t_1^7} - 35 \cdot \frac{t^6}{t_1^6} + 84 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 70 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 16 \right); \\ \ddot{x} &= \frac{35}{16} \cdot \dot{x}_\phi \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^7} - 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^6} + 12 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} - 8 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_\phi \cdot \left( \frac{t^5}{t_1^7} - 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^6} + 8 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 4 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} \right); \\ \overset{IV}{x} &= \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_\phi \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^7} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_1^6} + 24 \cdot \frac{t^2}{t_1^5} - 8 \cdot \frac{t}{t_1^4} \right); \quad \overset{V}{x} = \frac{105}{2} \cdot \dot{x}_\phi \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^3}{t_1^7} - 15 \cdot \frac{t^2}{t_1^6} + 12 \cdot \frac{t}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{1}{t_1^4} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

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

$$\begin{aligned} C_1 = 0; \quad C_2 = 1575 \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1^7}; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = -\frac{315}{2} \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1^5}; \quad C_5 = 0; \\ \tilde{N}_6 = \frac{105}{8} \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1^3}; \quad \tilde{N}_7 = 0; \quad \tilde{N}_8 = -\frac{35}{16} \cdot \frac{\dot{x}_\phi}{t_1}; \quad \tilde{N}_9 = 0; \quad C_{10} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

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

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{1}{128} \cdot \dot{x}_\delta \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^8}{t_1^7} - 28 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} + 70 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 140 \cdot \frac{t^2}{t_1} \right); & \dot{x} &= \frac{1}{16} \cdot \dot{x}_\delta \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^7}{t_1^7} - 21 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} + 35 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 35 \cdot \frac{t}{t_1} \right); \\
 \ddot{x} &= \frac{35}{16} \cdot \dot{x}_\delta \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t^4}{t_1^5} + 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^3} - \frac{1}{t_1} \right); & \ddot{\ddot{x}} &= \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_\delta \cdot \left( \frac{t^5}{t_1^7} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} + \frac{t}{t_1^3} \right); \\
 {}^{IV}x &= \frac{105}{8} \cdot \dot{x}_\delta \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^7} - 6 \cdot \frac{t^2}{t_1^5} + \frac{1}{t_1^3} \right); & {}^Vx &= \frac{105}{2} \cdot \dot{x}_\delta \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^3}{t_1^7} - 3 \cdot \frac{t}{t_1^5} \right).
 \end{aligned} \tag{25}$$

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]:

$$x_\delta = x_{0\delta} + \frac{(x_{1\delta} - x_{0\delta}) \cdot t}{t_\delta}; \quad \dot{x}_\delta = \frac{(x_{1\delta} - x_{0\delta})}{t_\delta} = const; \quad \ddot{x}_\delta = 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_\delta = 0; \quad {}^{IV}x_\delta = 0; \quad {}^Vx_\delta = 0, \tag{26}$$

де  $x_{0\delta}$  та  $x_{1\delta}$  – 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  $x_{0\delta}$  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  $x_{1\delta} = \Delta x - x_1$ .

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

$$\dot{x}_\delta = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_\delta} = \frac{\Delta x - \frac{93}{64} \cdot \dot{x}_\delta \cdot t_1}{t_\delta} \Rightarrow \dot{x}_\delta = \frac{\Delta x}{t_\delta + \frac{93}{64} \cdot t_1}. \tag{27}$$

Прийнявши загальний час руху формульовального візка з одного крайнього положення в інше  $t_\zeta$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_i$ ; час усталеного руху –  $t_\delta$ ; час гальмування –  $t_a$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формульовальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу прийнемо час усталеного руху, наприклад,  $t_\delta = \frac{2}{3} \cdot t_\zeta$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_i = t_a = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_\zeta$ .

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

$$\dot{x}_\delta = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot t_\zeta}; \quad x_1 = \frac{93}{698} \cdot \Delta x. \tag{28}$$

Розглядаючи рух формульовального 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:

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

– на ділянці усталеного руху:

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

– на ділянці гальмування:

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

Задавши амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_\zeta = 3\pi$ , 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.

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

– на ділянці пуску:

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

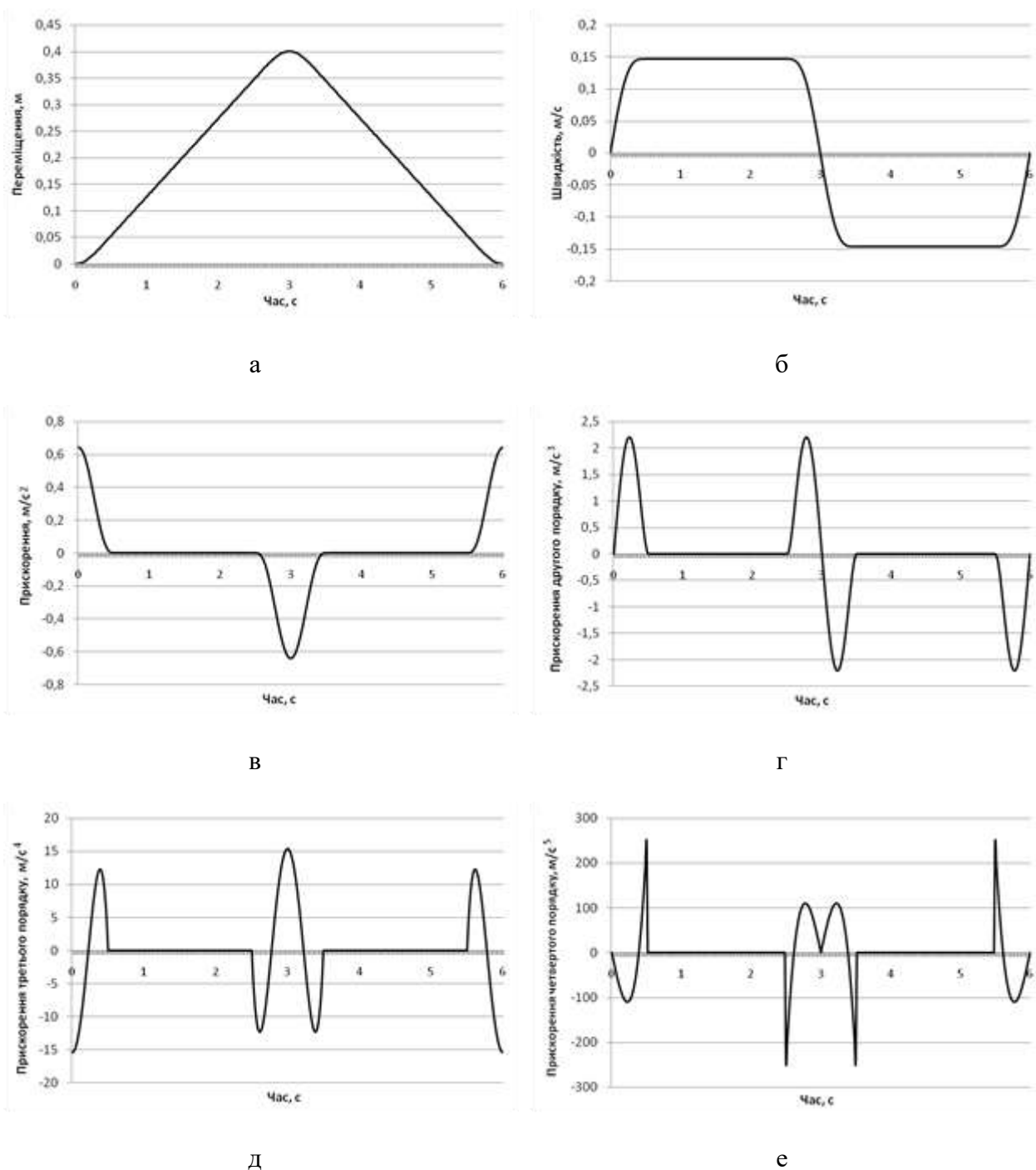


Рис. 1. Графіки зміни переміщення (а), швидкості (б), прискорення (в), прискорення другого порядку (ривка) (г), прискорення третього порядку (відчуття) (д) та прискорення четвертого порядку (е) при русі формувального візка з режимом реверсування за прискоренням третього порядку при оптимальних крайових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

–на ділянці усталеного руху:

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

–на ділянці гальмування:



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

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:

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

– на ділянці усталеного руху:

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

– на ділянці гальмування:

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

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

Час  $t$  можна виключити із залежностей (35)-(37), оскільки  $t = \frac{\varphi}{\omega}$ , а  $t_\zeta = \frac{\pi}{\omega}$ . Тут  $\varphi$  – кутова координата повороту кулачка, а  $\omega$  – кутова швидкість обертання кулачка. Оскільки час пуску формувального візка визначається залежністю  $t_i = \frac{1}{6} \cdot t_\zeta$ , то процес пуску буде здійснюватись при повороті кулачка на кут в межах від  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ ; час усталеного руху –  $t_o = \frac{2}{3} \cdot t_\zeta$ , 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 –  $t_a = \frac{1}{6} \cdot t_\zeta$ , 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:

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

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

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

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

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

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

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

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  $b$  ( $d = b$ ).

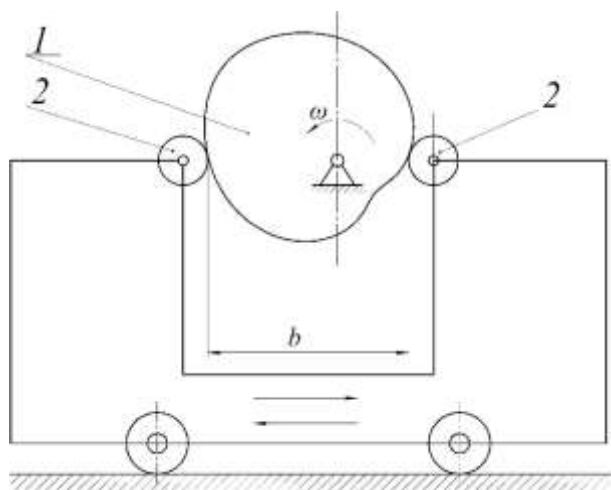


Рис. 2. Схема механізму з кулачковим приводом зворотно-поступального руху візка

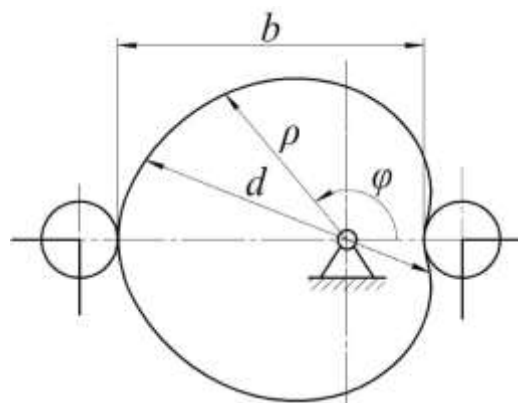


Рис. 3. Профіль кулачка, що реалізує комбінований режим руху формувального візка



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:

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

– на ділянці усталеного руху:

$$\dot{\varphi}_o = \frac{384 \cdot \Delta x}{349 \cdot t_\zeta \cdot R}; \quad (45)$$

– на ділянці гальмування:

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

де  $R$  – радіус укочувальних роликів.

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

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

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



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

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

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

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

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

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. 4). Установка складається з формувального візка 1, що змонтований на порталі 2, і здійснює зворотно-поступальний рух у напрямних 3 над порожниною форми 4. Формувальний візок вміщує подавальний бункер 5 та укочувальні ролики 6 на осі 7.

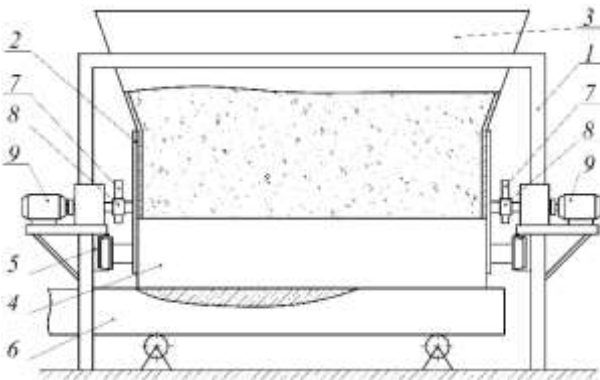


Рис. 4. Роликова формувальна установка з кулачковим приводним механізмом

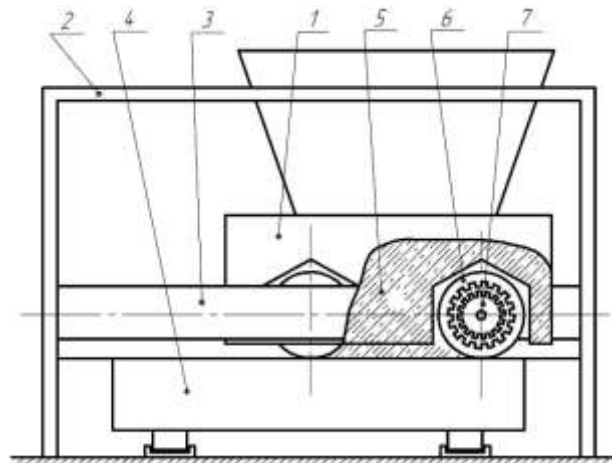


Рис. 5. Роликова формувальна установка з приводом від крокового двигуна

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



## Висновки

1. В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступально-го 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 укочувальні 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.

## Література

1. *Гарнець В.М.* Прогресивні бетоноформуєчі агрегати і комплекси. / В.М. Гарнець – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.

2. *Кузин В.Н.* Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов. / В.Н. Кузин. – Автореф. дис... канд. наук. – М. – 1981. – 20 с.

3. *Рюшин В.Т.* Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей. / В.Т. Рюшин. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К. – 1986.

4. *Ловейкін В.С.* Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. І-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507-514.

5. *Ловейкін В.С.* Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П.Василенка. – Харків, 2007. – № 59, Том 1. – С. 465-474.

6. *Ловейкін В.С.* Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – НУ «Львівська політехніка», 2007. – № 41. – С. 127-134.

7. *Ловейкін В.С.* Динамічна оптимізація режиму реверсування роликової формувальної установки. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Збірник наукових праць «Машинобудування». – Харків: УПА, 2015. – № 15. – С. 76-86.

8. *Ловейкін В.С.* Оптимізація ривкового режиму реверсування роликової 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.

9. *Ловейкін В.С.* Оптимізація режиму реверсування роликової 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.

10. Ловейкин В.С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Учебное пособие. / В.С. Ловейкин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.

11. Патент України на винахід № 105744 кл. B28B13/00: Установка для формування виробів з бетонних сумішей. / Ловейкин В.С., Почка К.І., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г. – Бюл. № 11 від 10.06.2014 р.

## References

1. Harnets', V.M. (1991). *Prohresyivni betonoformuyuchi ahrehaty i komplekxy [Progressive concrete forming units and complexes]*. Kyiv: Budivel'nyk.

2. Kuzyn, V.N. (1981). *Tekhnolohyya rolykovoho formovannya ploskykh yzdelyy yz melkozernistykh betonov [The technology of roller forming of flat products made of fine-grained concrete]*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow.

3. Ryushyn, V.T. (1986). *Yssledovanye rabocheho protsessa y razrabotka metody rascheta mashyn rolykovoho formovannya betonnykh smesey [Investigation of the work process and the development of a method for calculating the machines of roller molding of concrete mixtures]*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Kyiv.

4. Loveykin, V.S., Pochka K.I. (2004). *Dynamichnyy analiz rolykovoyi formovochnoyi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom [Dynamic analysis of roller molding unit with recuperative drive]*. *Dynamika, mitsnist' i nadiynist' sil's'kohospodars'kykh mashyn [Dynamics, durability and reliability of agricultural machines]*: Proc. 1st International Scientific and Technical Conference. Ternopil', 507-514.

5. Loveykin, V.S., Pochka K.I. (2007). *Rezultaty eksperymental'nykh doslidzhen' rezhymiv rukhu rolykovoyi formoval'noyi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom [Results of experimental studies of the modes of motion of a roller molding unit with a recuperative drive]*. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P.Vasylenka [Bulletin of Kharkiv National University of Agriculture of P.Vasilenko]*, 465-474.

6. Loveykin, V.S., Pochka K.I. (2007). *Vyznachennya optymal'noho znachennya kuta zmishchennya kryvoshypiv rolykovoyi formoval'noyi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom [Determination of the optimum value of the angle of displacement of the cranks of the roller molding unit with the recuperative drive]*. *Avtomatyzatsiya vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument making]*, 41, 127-134.

7. Loveykin, V.S., Pochka K.I. (2015). *Dynamichna optymizatsiya rezhymu reversuvannya rolykovoyi formoval'noyi ustanovky [Dynamic optimization of the reverse of the roller molding installation]*. *Zbirnyk naukovykh prats' «Mashynobuduvannya» [Collection of scientific works "Machine-building"]*, 15. Kharkiv: UIPA, 76-86.

8. Loveykin, V.S., Pochka K.I. (2015). *Optymizatsiya ryvkovoho rezhymu reversuvannya rolykovoyi formoval'noyi ustanovky [Optimization of the jerk mode of reversing a roller molding installation]*. *Naukovyy visnyk Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Seriya: tekhnika ta enerhetyka APK [Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: engineering and power engineering of agroindustrial complex]*, 212, P.1, 186-197.

9. Loveykin, V.S., Pochka K.I. (2015). *Optymizatsiya rezhymu reversuvannya rolykovoyi formoval'noyi ustanovky za pryskorenniam tret'oho poryadku [Optimization of the mode of reversing a roller molding installation by acceleration of the third order]*. *Visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi: zbirnyk naukovykh prats' [Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy: a collection of scientific works]*, 3 (36). Kramators'k: DDMA, 16-26.

10. Loveykin, V.S. (1990). *Raschety optymal'nykh rezhymov dvyzheniya mekhanizmov stroytel'nykh mashyn. Uchebnoe posobie [Calculations of the optimal modes of motion of the mechanisms of construction machines. Tutorial]*. Kyiv: UМК ВО.

11. Патент України на винахід № 105744 кл. B28B13/00: Установка для формування виробів з бетонних сумішей [Installation for the formation of products from concrete mixtures.]. Publ. 11, 10.06.2014.