

ФОРМУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМБІНОВАНОГО РЕЖИМУ РУХУ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ЗАКОНОМ ПРИСКОРЕННЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

*К. І. Почка, доктор технічних наук, професор
ORCID: 0000-0002-0355-002X*

Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. З метою підвищення надійності та довговічності роlikової формуальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступального руху формуального візка за прискоренням четвертого порядку. Розраховано кінематичні характеристики формуального візка при комбінованому режимі зворотно-поступального руху за прискоренням четвертого порядку. Запропоновано конструкцію роlikової формуальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формуального візка установки і забезпечує комбінований режим зворотно-поступального руху формуального візка за прискоренням четвертого порядку.

Ключові слова: роlikова формуальна установка, привідний механізм, зусилля, режим руху, закон, прискорення, ривок.

Постановка проблеми. В установках роlikового формування залізобетонних виробів під час їхньої роботи виникають значні динамічні навантаження в елементах приводного механізму та в елементах формувальних візків [1-9]. Не дивлячись на досить широке дослідження технологічного процесу формування залізобетонних виробів безвібраційним роlikовим методом [1-4], до цих пір не було досліджено динаміку руху формуального візка та її вплив на процес формування. Мало приділялось уваги режимам руху формуального візка та зусиллям, що виникають в елементах приводного механізму.

Аналіз публікацій по темі дослідження. В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роlikового формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність [1-4]. 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 формуального візка, що може привести до передчасного виходу установки з ладу [7-24]. Тому актуальною є задача удосконалення приводного механізму роlikової формуальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формуального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

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

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для роlikової формуальної установки при ущільненні бетонної суміші бажано мати постійну швидкість зворотно-поступального руху формуального 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 формуального візка при його переміщенні від одного крайнього положення до іншого, у якому були б ділянки розгону і гальмування з мінімальними динамічними навантаженнями та ділянка руху з постійною швидкістю.

Для плавного процесу розгону та гальмування формуального візка запропоновано здійснювати їх за оптимальним режимом руху за прискоренням четвертого порядку [25]. При цьому швидкість, прискорення, прискорення другого порядку (ривок) та прискорення третього порядку (відчуття) формуального 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 [25]. 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 оптимальних режимів розгону та гальмування за прискоренням четвертого порядку критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

$$I_Z = \int_0^{t_{p, \varepsilon}} Q dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де t – час; $t_{p, \varepsilon}$ – тривалість процесу розгону або гальмування формувального візка; Q – енергія прискорень четвертого порядку:

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

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

Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Пуассона:

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

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

З виразу (3) можна записати:

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

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

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

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.

Для ділянки розгону формувального візка з моменту спокою до виходу на усталений режим руху крайові умови мають наступні значення: $t=0: x=0, \dot{x}=0, \ddot{x}=0, \overset{IV}{x}=0, \overset{V}{x}=0$

та $t = t_p$: $\dot{x} = \dot{x}_y$, $\ddot{x} = 0$, $\overset{IV}{x} = 0$, $\overset{V}{x} = 0$. Тут t_p – тривалість розгону формувального візка з моменту спокою до виходу на усталений режим руху; \dot{x}_y – швидкість руху візка на усталеному режимі.

Підставивши вказані вище крайові умови в рівняння (5), отримаємо:

$$t = 0: C_{10} = 0; C_9 = 0; C_8 = 0; C_7 = 0; C_6 = 0; \quad (6)$$

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

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

$$\begin{aligned} C_1 &= 1411200 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^8}; & C_2 &= -806400 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^7}; \\ C_3 &= 201600 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^6}; & C_4 &= -26880 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^5}; & C_5 &= 1680 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_p^4}. \end{aligned} \quad (8)$$

Підставивши визначені постійні інтегрування (6) та (8) в рівняння (5), отримуємо вирази для визначення кінематичних характеристик формувального візка в процесі розгону з моменту спокою до виходу на усталений режим руху:

$$\begin{aligned} x_p &= x_{0p} + \dot{x}_y \cdot \left(\frac{35}{9} \cdot \frac{t^4}{t_p^4} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 40 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - \frac{112}{3} \cdot \frac{t}{t_p} + 14 \right) \cdot \frac{t^5}{t_p^4}; \\ \dot{x}_p &= \dot{x}_y \cdot \left(35 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} - 160 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 280 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - 224 \cdot \frac{t}{t_p} + 70 \right) \cdot \frac{t^4}{t_p^4}; \\ \ddot{x}_p &= 280 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^4}{t_p^4} - 4 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 6 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - 4 \cdot \frac{t}{t_p} + 1 \right) \cdot \frac{t^3}{t_p^4}; \\ \overset{IV}{x}_p &= 280 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(7 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} - 24 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 30 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - 16 \cdot \frac{t}{t_p} + 3 \right) \cdot \frac{t^2}{t_p^4}; \\ \overset{IV}{x}_p &= 1680 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(7 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} - 20 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 20 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - 8 \cdot \frac{t}{t_p} + 1 \right) \cdot \frac{t}{t_p^4}; \\ \overset{V}{x}_p &= 1680 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(35 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} - 80 \cdot \frac{t^3}{t_p^3} + 60 \cdot \frac{t^2}{t_p^2} - 16 \cdot \frac{t}{t_p} + 1 \right) \cdot \frac{1}{t_p^4}, \end{aligned} \quad (9)$$

де x_{0p} – координата початкового положення центра мас візка при розгоні.

На усталеному режимі руху формувального візка координата переміщення та швидкості його центра мас описуються рівняннями [25]:

$$x_y = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x}_y = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = const; \quad \ddot{x}_y = 0; \quad \overset{IV}{\ddot{x}_y} = 0; \quad \overset{V}{\ddot{x}_y} = 0; \quad x_y = 0; \quad \dot{x}_y = 0, \quad (10)$$

де x_{0y} та x_{1y} – координати початкового та кінцевого положень центра мас візка при усталеному русі; t_y – тривалість усталеного руху.

Для ділянки гальмування формувального візка крайові умови мають наступні значення: $t = 0$: $\dot{x} = \dot{x}_y$, $\ddot{x} = 0$, $\overset{IV}{\ddot{x}} = 0$, $\overset{V}{\ddot{x}} = 0$, $x = 0$, $\dot{x} = 0$ та $t = t_2$: $x = x_{12}$, $\dot{x} = 0$, $\ddot{x} = 0$, $\overset{IV}{\ddot{x}} = 0$, $\overset{V}{\ddot{x}} = 0$. Тут t_2 – тривалість гальмування з моменту усталеного руху до повної зупинки; x_{12} – кінцева координата процесу гальмування.

Підставивши вказані вище крайові умови в рівняння (5), отримаємо:

$$t = 0: \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_8 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_5 = 0; \quad (11)$$

$$t = t_2: \quad \begin{cases} \frac{1}{362880} \cdot C_1 \cdot t_2^9 + \frac{1}{40320} \cdot C_2 \cdot t_2^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_3 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_4 \cdot t_2^6 + \dot{x}_y \cdot t_2 + C_{10} = x_{12}, \\ \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t_2^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t_2^5 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Розв'язавши систему рівнянь (12), отримуємо постійні інтегрування C_1 , C_2 , C_3 , C_4 та C_{10} :

$$\begin{aligned} C_1 &= 1411200 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^8}; & C_2 &= -604800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^7}; \\ C_3 &= 100800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^6}; & C_4 &= -6720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5}; & C_{10} &= x_{12} - \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_2. \end{aligned} \quad (13)$$

Підставивши визначені постійні інтегрування (11) та (13) в рівняння (5), отримуємо вирази для визначення кінематичних характеристик формувального візка в процесі гальмування з моменту усталеного руху до повної зупинки:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_{12} + \dot{x}_y \cdot \left(\frac{35}{9} \cdot \frac{t^9}{t_2^8} - 15 \cdot \frac{t^8}{t_2^7} + 20 \cdot \frac{t^7}{t_2^6} - \frac{28}{3} \cdot \frac{t^6}{t_2^5} + t - \frac{5}{9} \cdot t_2 \right); \\ \dot{x}_2 &= \dot{x}_y \cdot \left(35 \cdot \frac{t^8}{t_2^8} - 120 \cdot \frac{t^7}{t_2^7} + 140 \cdot \frac{t^6}{t_2^6} - 56 \cdot \frac{t^5}{t_2^5} + 1 \right); \\ \ddot{x}_2 &= 280 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(\frac{t^3}{t_2^3} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 4 \cdot \frac{t}{t_2} - 1 \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^5}; \\ \overset{IV}{\ddot{x}_2} &= 280 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(7 \cdot \frac{t^3}{t_2^3} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 15 \cdot \frac{t}{t_2} - 4 \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^5}; \\ \overset{V}{\ddot{x}_2} &= 1680 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(7 \cdot \frac{t^3}{t_2^3} - 15 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 10 \cdot \frac{t}{t_2} - 2 \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^5}; \\ \overset{V}{x_2} &= 1680 \cdot \dot{x}_y \cdot \left(35 \cdot \frac{t^3}{t_2^3} - 60 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 30 \cdot \frac{t}{t_2} - 4 \right) \cdot \frac{t}{t_2^5}. \end{aligned} \quad (14)$$

У виразах (9), (10) та (14) координата початкового положення центра мас візка при розгоні x_{0p} та кінцева координата процесу гальмування x_{1z} відповідають його крайнім положенням, однак невідомими є швидкість руху \dot{x}_y формувального візка на усталеному режимі, координати початкового x_{0y} та кінцевого x_{1y} положень центра мас візка при усталеному русі.

Розділимо переміщення S формувального візка від одного крайнього положення до іншого на три ділянки: 1 – ділянка розгону, їй відповідає переміщення S_p ; 2 – ділянка усталеного руху, їй відповідає переміщення S_y ; 3 – ділянка гальмування, їй відповідає переміщення S_z . Із врахуванням залежностей (9), (10) та (14) вирази переміщення на кожній ділянці можна подати у вигляді:

$$S_p = \int_0^{t_p} \dot{x}_p dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_p} \left(35 \cdot \frac{t^8}{t_p^8} - 160 \cdot \frac{t^7}{t_p^7} + 280 \cdot \frac{t^6}{t_p^6} - 224 \cdot \frac{t^5}{t_p^5} + 70 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} \right) dt =$$

$$= \dot{x}_y \cdot \left(\frac{35}{9} \cdot \frac{t^9}{t_p^8} - 20 \cdot \frac{t^8}{t_p^7} + 40 \cdot \frac{t^7}{t_p^6} - \frac{112}{3} \cdot \frac{t^6}{t_p^5} + 14 \cdot \frac{t^5}{t_p^4} \right) \Bigg|_0^{t_p} = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p; \quad (15)$$

$$S_y = \int_0^{t_y} \dot{x}_y dt = \dot{x}_y \cdot t \Big|_0^{t_y} = \dot{x}_y \cdot t_y; \quad (16)$$

$$S_z = \int_0^{t_z} \dot{x}_z dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_z} \left(35 \cdot \frac{t^8}{t_z^8} - 120 \cdot \frac{t^7}{t_z^7} + 140 \cdot \frac{t^6}{t_z^6} - 56 \cdot \frac{t^5}{t_z^5} + 1 \right) dt =$$

$$= \dot{x}_y \cdot \left(\frac{35}{9} \cdot \frac{t^9}{t_z^8} - 15 \cdot \frac{t^8}{t_z^7} + 20 \cdot \frac{t^7}{t_z^6} - \frac{28}{3} \cdot \frac{t^6}{t_z^5} + t \right) \Bigg|_0^{t_z} = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z. \quad (17)$$

Тоді вираз загального переміщення формувального візка можна подати у вигляді:

$$S = S_p + S_y + S_z = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p + \dot{x}_y \cdot t_y + \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z = \dot{x}_y \cdot \left(\frac{5}{9} \cdot t_p + t_y + \frac{5}{9} \cdot t_z \right). \quad (18)$$

Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу прийемо час усталеного руху, наприклад, $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_z$, де t_z – загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше. Тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами: $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_z$ та $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_z$.

Підставивши у вираз (18) $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_z$, $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_z$, $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_z$ та амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше $\Delta x = S$, отримуємо:

$$\Delta x = \dot{x}_y \cdot \left(\frac{5}{9} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_z + \frac{2}{3} \cdot t_z + \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_z \right) = \frac{23}{27} \cdot \dot{x}_y \cdot t_z \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_y = \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot t_z}. \quad (19)$$

Координату положення формувального візка, що визначає закінчення ділянки розгону та початок ділянки усталеного руху x_{0y} , можна визначити з виразів (15) та (19):

$$x_{0y} = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p = \frac{5}{9} \cdot \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot t_z} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_z = \frac{5}{46} \cdot \Delta x, \quad (20)$$

а координату, що визначає закінчення ділянки усталеного руху x_{1y} та початок ділянки гальмування, можна визначити з виразів (16), (19) та (20):

$$x_{1y} = x_{0y} + \dot{x}_y \cdot t_y = \frac{5}{46} \cdot \Delta x + \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot t_3} \cdot \frac{2}{3} \cdot t_3 = \frac{41}{46} \cdot \Delta x. \quad (21)$$

Підставивши вирази (19)-(21) у рівності (9), (10) та (14) і прийнявши $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$, $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$, $t_z = \frac{1}{6} \cdot t_3$, кінематичні характеристики формувального візка на ділянках розгону, усталеного руху та гальмування можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{69984}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{17640}{7} \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 720 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 112 \cdot \frac{t}{t_3} + 7 \right) \cdot \frac{t^5}{t_3^5}; \\ \dot{x}_p &= \frac{69984}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(22680 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 17280 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 5040 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 672 \cdot \frac{t}{t_3} + 35 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^5}; \\ \ddot{x}_p &= \frac{9797760}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(1296 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 864 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 216 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 24 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{t^3}{t_3^5}; \\ \ddot{\ddot{x}}_p &= \frac{29393280}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(3024 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 1728 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 360 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 32 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^5}; \\ x_p^{IV} &= \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(9072 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 4320 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 720 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 48 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{t}{t_3^5}; \\ x_p^V &= \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(45360 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 17280 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 2160 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 96 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{1}{t_3^5}; \end{aligned} \quad (22)$$

$$x_y = \frac{\Delta x}{46} \cdot \left(5 + 54 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x}_y = \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_y = 0; \quad x_y^{IV} = 0; \quad x_y^V = 0; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} x_z &= \Delta x + \frac{27}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(6531840 \cdot \frac{t^9}{t_3^9} - 4199040 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} + 933120 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} - 72576 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + \frac{t}{t_3} - \frac{5}{54} \right); \\ \dot{x}_z &= \frac{27}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(58786560 \cdot \frac{t^8}{t_3^9} - 33592320 \cdot \frac{t^7}{t_3^8} + 6531840 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} - 435456 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} + \frac{1}{t_3} \right); \\ \ddot{x}_z &= \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(216 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 108 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 18 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^6}; \\ \ddot{\ddot{x}}_z &= \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(1512 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 648 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 90 \cdot \frac{t}{t_3} - 4 \right) \cdot \frac{t^3}{t_3^6}; \\ x_z^{IV} &= \frac{705438720}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(756 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 270 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 30 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^6}; \\ x_z^V &= \frac{1410877440}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(1890 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 540 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 45 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t}{t_3^6}. \end{aligned} \quad (24)$$

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 (22)-(24) було розраховано кінематичні характеристики комбінованого режиму руху формувального візка за прискоренням четвертого порядку. За результатами розрахунків побудовано графіки зміни переміщення (рис. 1, а), швидкості (рис. 1, б), прискорення (рис. 2, в), прискорення другого порядку (ривка) (рис. 1, г), прискорення третього порядку (відчуття) (рис. 1, д) та прискорен-

ня четвертого порядку (рис. 1, е) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше.

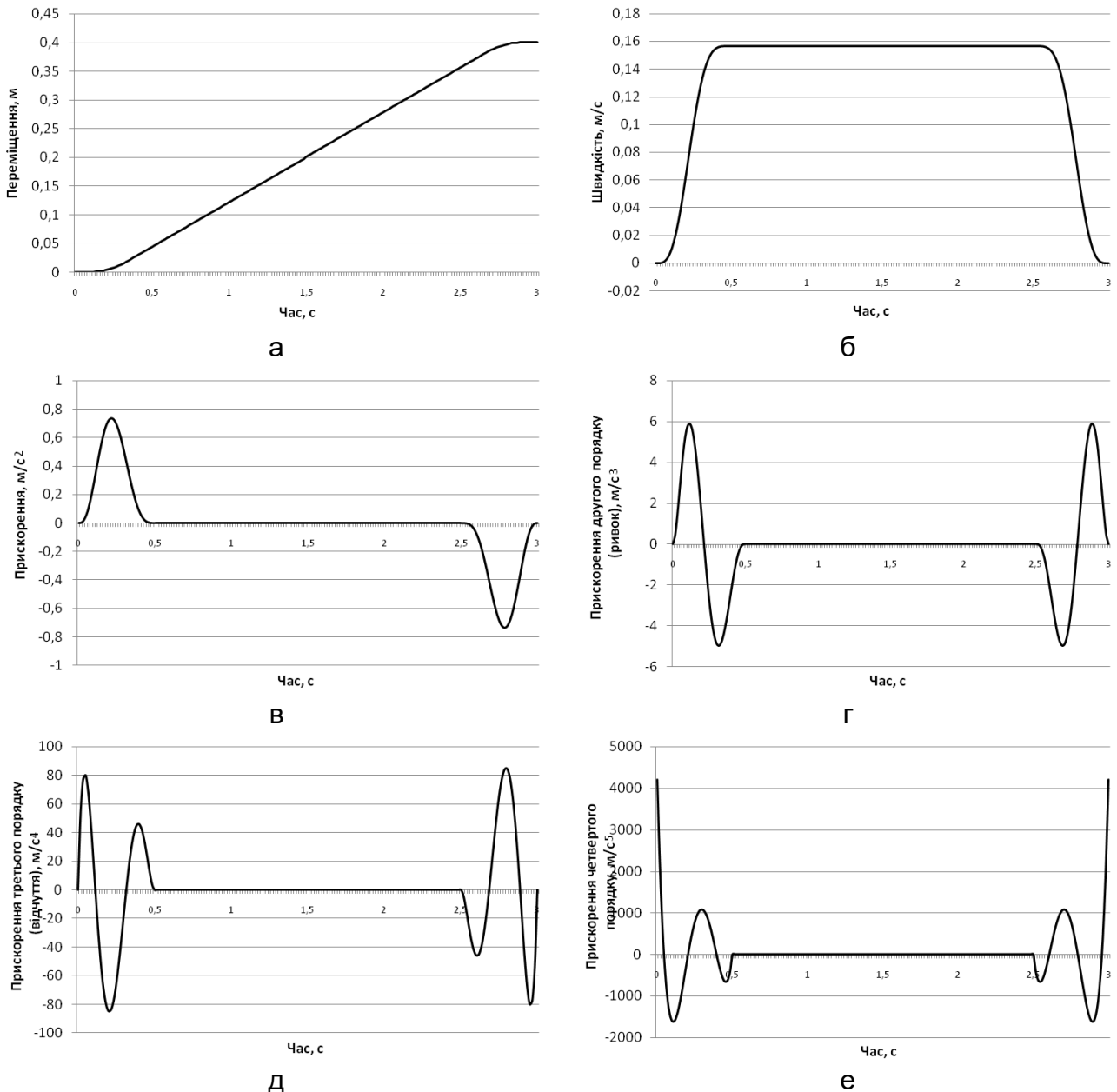


Рис. 1. Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в, прискорення другого порядку (ривок) – г, прискорення третього порядку (відчуття) – д та прискорення четвертого порядку – е при комбінованому режимі руху візка за прискоренням четвертого порядку

Закон руху візка, описаний рівняннями (22)-(24), може бути здійснений приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки. При цьому закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна описується рівняннями:

– на ділянці розгону:

$$\dot{\varphi}_p = \frac{1}{R} \cdot \frac{69984}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(22680 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 17280 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 5040 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 672 \cdot \frac{t}{t_3} + 35 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^5}; \quad (25)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$\dot{\varphi}_y = \frac{1}{R} \cdot \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot t_3}; \quad (26)$$

– на ділянці гальмування:

$$\dot{\varphi}_z = \frac{1}{R} \cdot \frac{27}{23} \cdot \Delta x \cdot \left(58786560 \cdot \frac{t^8}{t_3^9} - 33592320 \cdot \frac{t^7}{t_3^8} + 6531840 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} - 435456 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} + \frac{1}{t_3} \right). \quad (27)$$

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:

$$\dot{\varphi} = \frac{69984 \cdot \Delta x}{23 \cdot R} \cdot \left(22680 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 17280 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 5040 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 672 \cdot \frac{t}{t_3} + 35 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^5}, \quad 0 \leq t \leq \frac{t_3}{6}; \quad (28)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot R \cdot t_3}, \quad \frac{t_3}{6} < t < \frac{5 \cdot t_3}{6}; \quad (29)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot R} \cdot \left(58786560 \cdot \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^8 \cdot \frac{1}{t_3^9} - 33592320 \cdot \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{t_3^8} + 6531840 \cdot \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{t_3^7} - 435456 \cdot \left(t - \frac{5 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} + \frac{1}{t_3} \right), \quad \frac{5 \cdot t_3}{6} < t \leq t_3. \quad (30)$$

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

$$\dot{\varphi} = -\frac{69984 \cdot \Delta x}{23 \cdot R} \cdot \left(22680 \cdot \frac{(t-t_3)^4}{t_3^4} - 17280 \cdot \frac{(t-t_3)^3}{t_3^3} + 5040 \cdot \frac{(t-t_3)^2}{t_3^2} - 672 \cdot \frac{(t-t_3)}{t_3} + 35 \right) \cdot \frac{(t-t_3)^4}{t_3^5}, \quad t_3 \leq t \leq \frac{7 \cdot t_3}{6}; \quad (31)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot R \cdot t_3}, \quad \frac{7 \cdot t_3}{6} < t < \frac{11 \cdot t_3}{6}; \quad (32)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot R} \cdot \left(58786560 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^8 \cdot \frac{1}{t_3^9} - 33592320 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{t_3^8} + 6531840 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{t_3^7} - 435456 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_3}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_3^6} + \frac{1}{t_3} \right), \quad \frac{11 \cdot t_3}{6} < t \leq 2 \cdot t_3. \quad (33)$$

З метою зменшення динамічних навантажень в елементах установки та для підвищення її надійності запропоновано конструкцію установки з приводним механізмом для забезпечення комбінованого режиму зворотно-поступального руху формувального візка за прискоренням четвертого порядку (рис. 2). Установка складається з формувального візка 1, що змонтований на порталі 2, і здійснює зворотно-поступальний рух у напрямних 3 над порожниною форми 4. Формувальний візок вміщує подавальний бункер 5 та укочувальні ролики 6 на осі 7.

Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою високомоментного крокового двигуна, який вмонтовано в ролики, причому вісь ролика виконує роль статора, а сам ролик – ротора [15].

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 руйні-

вні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується надійність та довговічність установки в цілому.

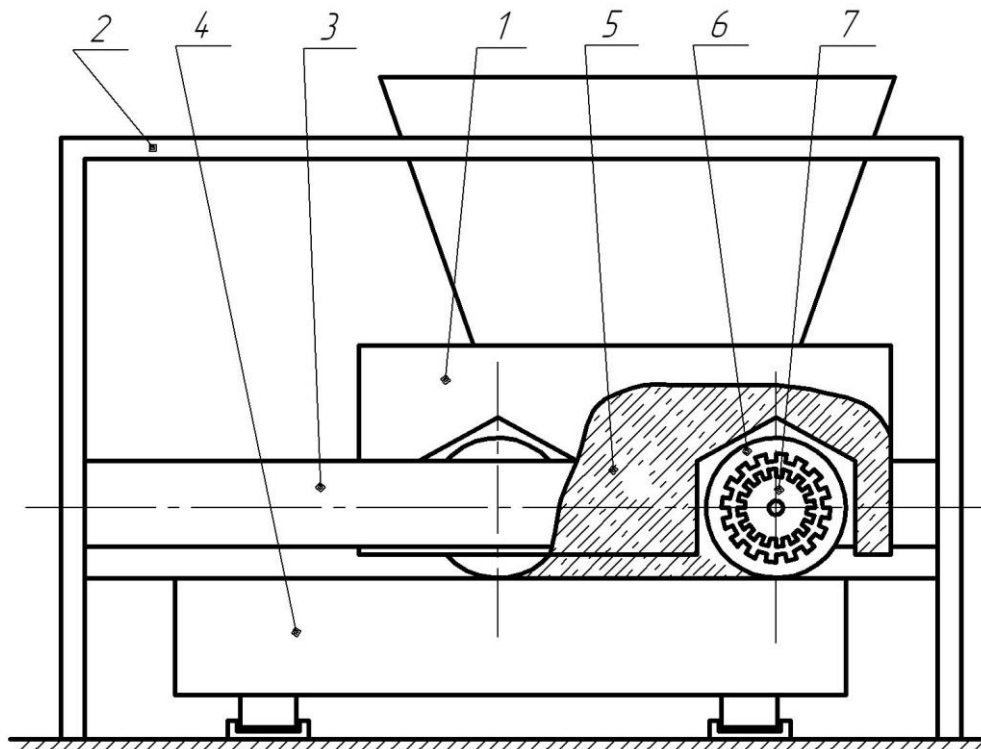


Рис. 2. Роликова формувальна установка з приводом від крокового двигуна

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано комбінований режим зворотно-поступального руху формувального візка за прискоренням четвертого порядку.

2. Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при комбінованому режимі зворотно-поступального руху за прискоренням четвертого порядку.

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pochka K., Zaichenko S., Shalenko V., Masliuk A., Baryliuk M., Baryliuk S. Review of designs of machines for surface compaction of products from construction mixtures. // Ways to Improve Construction Efficiency. – 2024. – Issue 54. Part 1. – P. 91-104. – DOI: 10.32347/2707-501x.2024.54(1).91-104.

2. Гарнець В. М., Зайченко С. В., Човнюк Ю. В., Шаленко В. О., Приходько Я. С. Бетоноформувальні агрегати. Конструктивно-функціональні схеми, принцип дії, основи теорії. К.: Інтерсервіс, 2015. 238 с.

3. Гарнець В.М., Човнюк Ю.В., Зайченко С.В., Шаленко В.О., Приходько Я.С. Теорія і практика створення бетоноформувальних агрегатів (БФА). Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2014. Вип. 83. С. 49-54.

4. Почка К.І. Розробка та аналіз роликової формувальної установки з рекупераційним приводом: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.02 «Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій». Київ, 2008. 24 с.

5. Ловейкін В. С., Почка К. І. Динамічний аналіз роликів формувальної установки з рекупераційним приводом. *Динаміка, міцність і надійність с.-г машин: Пр. І міжнар. наук.-техн. конф. (DSR AM-I)*. (Тернопіль, 4-7 жовт. 2004). Тернопіль, 2004. С. 507–514.
6. Ловейкін В. С., Почка К. І. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликів формувальної установки з рекупераційним приводом. *Вісн. Харк. нац. ун-ту сільськ. госп-ва ім. П. Василенка*. 2007. Т 1. № 59. С. 465-474.
7. Loveikin, V. S., Pochka, K. I. Synthesis of camshaft driving mechanism in roller molding installation with combined motion mode according to acceleration of third order. *Science & Technique*. 2017. No. 16 (3). 206-214. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214.
8. Loveykin V., Pochka K. Realization of optimum mode of movement of roller forming installation on acceleration of fourth order. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9, No. 2. P. 19-26. doi.org/10.31548/me2018.02.019.
9. Ловейкін В. С., Почка К. І. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликів формувальної установки з рекупераційним приводом. *Автоматизація вироб. процесів у машинобуд. та приладобуд.* НУ «Львівська політехніка». 2007. № 41. С. 127-134.
10. Ловейкін В. С., Почка К. І. Визначення навантажень в елементах роликів формувальних установок. *Зб. наук. пр. Укр. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2008. Вип. 88. С. 15-20.
11. Ловейкін В. С., Почка К.І. Визначення навантажень в елементах роликів формувальної установки. *Теорія і практика буд-ва*. 2007. № 3. С. 19-23.
12. Ловейкін В. С., Почка К. І. Дослідження динамічних навантажень в елементах роликів формувальних установок. *Vzrik moderni vedecke – 2012. Materialy VIII mezinarodni vedecko-prakticka conference– Dil. 18. Technicke vedy. Moderni informacni technologie: Praha. Publishing House “Education and Science” s.r.o.* P. 20-25.
13. Ловейкін В. С., Почка К. І. Дослідження навантажень в елементах роликів формувальної установки з врівноваженим приводом. *Автоматизація виробн. процесів у машинобуд. та приладобуд.* НУ «Львівська політехніка», 2015. Вип. 49. С. 73-79.
14. Loveikin V., Pochka K., Prystailo M., Balaka M., Pochka O. Dynamic balancing of roller forming unit drive. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2021. 107. P. 140-158. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.107.140-158.
15. Патент України на винахід № 105744 кл. B28B13/00: Установка для формування виробів з бетонних сумішей. / Ловейкін В.С., Почка К.І., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г. – Бюл. № 11 від 10.06.2014 р.
16. Ловейкін В. С., Почка К. І. Обґрунтування параметрів енергетично врівноваженого приводу роликів формувальної установки. *Техніка будівництва*. 2014. № 32. С. 25-32.
17. Ловейкін В. С., Почка К. І. Аналіз нерівномірності руху роликів формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 4 (60). С. 20-29.
18. Ловейкін В. С., Ковбаса В. П., Почка К. І. Динамічний аналіз роликів формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2010. Вип. 144, ч. 5. С. 338-344.
19. Ловейкін В.С., Почка К.І. Динамічна оптимізація машин роликів формувальної установки. Монографія. Київ: ЦП «Компринт», 2016. 240 с. ISBN 978-966-929-251-3.
20. Ловейкін В.С., Почка К.І. Силовий аналіз роликів формувальної установки з рекупераційним приводом. *Техніка будівництва*. 2003. № 14. С. 27-37.
21. Loveikin V., Pochka K., Prystailo M., Balaka M., Pochka O. Impact of cranks displacement angle on the motion non-uniformity of roller forming unit with energy-balanced drive. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2021. 106. P. 141-155. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.141-155.
22. Loveikin V.S., Romasevich Yu.O., Spodoba O.O., Loveykin A.V., Pochka K.I. Mathematical model of the dynamics change departure of the jib system manipulator with the simultaneous movement of its links. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2020. 104. 175-190. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.104.175-190.
23. Loveikin V. S., Pochka K. I., Romasevych Yu. O. Modeling Roller Forming Unit Dynamic Analysis with Energy Balanced Drive Dissipative Properties Taken into Account. *Проблеми машинобудування*. 2018. Т. 21, № 2. С. 32-44.
24. Ловейкін В. С., Почка К. І., Ромасевич Ю. О., Ловейкін Ю. В. Динамічний аналіз роликів формувальної установки з урахуванням дисипативних властивостей врівноваженого приводного

механізму. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9, No. 3. P. 45-58. doi.org/10.31548/me2018.03.045.

25. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Динамічна оптимізація кулачкового приводу машин роликowego формування. Монографія. Київ: ЦП «Компринт», 2016. 177 с. ISBN 978-966-929-197-4.

26. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Дослідження навантажень в елементах роликовой формувальної установки з врівноваженим приводом. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2015. Вип. 49. С. 73-79.

27. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Аналіз нерівномірності руху приводних механізмів машин роликowego формування. *Техніка будівництва*. № 30, 2013. С. 23-32.

28. *Ловейкін В.С., Почка К.І.* Аналіз руху роликовой формувальної установки з врівноваженим приводом. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. № 27. 2004. С. 95-101.

REFERENCES

1. *Pochka K., Zaichenko S., Shalenko V., Masliuk A., Baryliuk M., Baryliuk S.* (2024). Review of designs of machines for surface compaction of products from construction mixtures. // *Ways to Improve Construction Efficiency*. Issue 54. Part 1. P. 91-104. DOI: 10.32347/2707-501x.2024.54(1).91-104.

2. *Garnec, V. M., Zajchenko, S. V., Chovnjuk, Ju. V., Shalenko, V. O. & Prihodko Ja. S.* (2015). Concrete the forming units. Constructive and functional to the scheme, principle of action, theory basis. Kyiv: Interservis.

3. *Garnec, V. M., Chovnjuk, Ju. V., Zajchenko, S. V., Shalenko, V. O., Prihod'ko, Ja. S.* (2014). Teorija i praktika stvorenja betonofornuval'nih agregativ (BFA) [Theory and practice of creation of units of formation of concrete]. *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction, road and melioration machines], No 83, P. 49-54.

4. *Pochka, K.I.* (2008). Rozrobka ta analiz rolykovoyi formuvalnoyi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.05.02 «Mashyny dlya vyrobnytstva budivelnnykh materialiv i konstruktsiy» [Development and analysis of a roller forming unit with a recuperation drive: abstract of the dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences: specialty 05.05.02 "Machines for the production of building materials and structures"]. Kyiv. 24p.

5. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2004). The dynamic analysis of roller forming installation with the rekuperativ drive. Dynamics, durability and reliability of farm vehicles. Works of the first International scientific and technical conference (DSR AM-I), 507-514. Ternopil.

6. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2007). Results of pilot studies of the modes of the movement of roller form-ing installation with the rekuperativ drive. The bulletin of the Kharkov national university of agriculture of P. Va-silenko, vol. 1, No. 59, 465-474.

7. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2017). Synthesis of camshaft driving mechanism in roller molding installation with combined motion mode according to acceleration of third order. *Science & Technique*. No. 16 (3), 206-214. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214.

8. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2018). Realization of optimum mode of movement of roller forming installation on acceleration of fourth order. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. Vol. 9. No. 2, 19-26. doi.org/10.31548/me2018.02.019.

9. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2007). Determination of optimum value of a corner of shift of cranks of roller forming installation with the recuperative drive. *Automation of productions in mechanical engineering and instrument making, National University "Lviv Poly-equipment"*, No. 41, 127-134.

10. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2008). Definition of loadings in elements of roller forming installations. *Collection of scientific works of Ukrainian state academy of railway transport*, No 88, 15-20.

11. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2007). Definition of loadings in elements of roller forming installation. *Theory and practice of construction*, No. 3, 19-23.

12. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2012). Research of dynamic loadings in elements of roller forming installations. *Formation of Modern Science – 2012: Materials VIII of the intern. sci. and pract. conf. Section 18. Technical science. Formation of information technologies, Praha*, 20-25.

13. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2015). Research of loadings in elements of roller forming installation with the balanced drive. *Automation of productions in mechanical engineering and instrument making, National University "Lviv Poly-equipment"*, No 49, 73-79.

14. *Loveikin V., Pochka K., Prystailo M., Balaka M., Pochka O.* (2021). Dynamic balancing of roller forming unit drive. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 107. P. 140-158. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.107.140-158.

15. Pat. 105744, IPC B28B 13/00, Installation for formation of products from concrete mixes, *Lovejkin, V. S., Pochka, K. I., Chovnyuk Yu.V., Dikteruk M.H.*, Publ. 10.06.2014.
16. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2014). Justification by the parameter of energetically balanced drive of roller forming installation. *Tekhnika budivnytstva [Construction machinery]*, No. 32, 25-32.
17. *Loveikin, V. S. & Pochka, K. I.* (2010). The analysis of unevenness of the movement of roller forming installation with energetically balanced drive. *Vibrations in the equipment and technologies*, No. 4 (60), 20-29.
18. *Loveikin, V. S., Kovbasa, V. P. & Pochka, K. I.* (2010). The dynamic analysis of roller forming installation with energetically balanced drive. *Scientific bulletin of the National university of bioresources and environmental management of Ukraine. Series of the technician and power engineering specialist of agro-industrial complex*, Iss. 144, Pt. 5, 338–344.
19. *Loveikin V.S. & Pochka K.I.* (2016). *Dynamichna optymizatsiya mashyn rolykovoho formuvannya. Monohrafiya [Dynamic optimization of roller forming machines. Monograph]*. Kyiv: CP "Komprint". 240 p. ISBN 978-966-929-251-3.
20. *Loveikin V. S. & Pochka K. I.* (2003). *Sylovyi analiz rolykovoi formovochnoi ustanovky z reku-peratsiynym pryvodom [Power analysis of roller forming unit with recuperative drive]*. *Tekhnika budivnytstva [Construction machinery]*. Issue 14, 27-37.
21. *Loveikin V., Pochka K., Prystailo M., Balaka M. & Pochka O.* (2021). Impact of cranks displacement angle on the motion non-uniformity of roller forming unit with energy-balanced drive. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 106. P. 141-155. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.141-155.
22. *Loveikin V.S., Romasevich Yu.O., Spodoba O.O., Loveykin A.V. & Pochka K.I.* (2020). Mathematical model of the dynamics change departure of the jib system manipulator with the simultaneous movement of its links. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 104. 175-190. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.104.175-190.
23. *Loveikin, V. S., Pochka, K. I. & Romasevych, Yu. O.* (2018). Roller forming unit dynamic analysis with energy balanced drive dissipative properties taken into account. *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 21. № 2, 32-44.
24. *Loveikin, V. S., Pochka, K. I., Romasevych, Yu. O. & Loveikin, Yu. V.* (2018). Dynamic analysis of roller molding installation taking into account dissipative properties balanced drive mechanism. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. Vol. 9, No. 3, 45-58. doi.org/10.31548/me2018.03.045.
25. *Loveikin V.S. & Pochka K.I.* (2016). *Dynamichna optymizatsiya kulachkovoho pryvodu mashyn rolykovoho formuvannya. Monohrafiya. [Dynamic optimization of the cam drive of roll forming machines. Monograph]*. Kyiv, CP Komprint Publ., 177. ISBN 978-966-929-197-4.
26. *Loveikin V.S. & Pochka K.I.* (2015). *Doslidzhennya navantazhen' v elementakh rolykovoyi formoval'noyi ustanovky z vrvnovazhenym pryvodom [Research of loads in elements of a roller forming plant with a balanced drive]*. *Avtomatyzatsiya vyrobnychkykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prylobo-buduvanni [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument making]*. Vol. 49. 73-79.
27. *Loveikin V.S. & Pochka K.I.* (2013). *Analiz nerivnomirnosti rukhu pryvodnykh mekhanizmiv mashyn rolykovoho formuvannya [Analysis of the unevenness of the movement of drive mechanisms of roller forming machines]*. *Tekhnika budivnytstva [Construction machinery]*. № 30. 23-32.
28. *Loveikin V.S. & Pochka K.I.* (2004). *Analiz rukhu rolykovoyi formovochnoyi ustanovky z vrvnovazhenym pryvodom [Analysis of the motion of a roller forming unit with a balanced drive]*. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu [Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University]*. № 27. 95-101.

Pochka K.I. Formation and implementation of a combined motion mode for a roller forming machine according to the fourth-order acceleration law.

In order to increase the reliability and durability of the roller forming unit, a combined mode of reciprocating motion of the forming carriage with fourth-order acceleration has been calculated. The kinematic characteristics of the forming carriage in the combined mode of reciprocating motion with fourth-order acceleration have been calculated. A design of a roller forming machine with a drive from a high-torque stepper motor mounted in the rollers of the forming carriage of the machine and providing a combined mode of reciprocating motion of the forming carriage with fourth-order acceleration has been proposed.

Key words: roller forming machine, drive mechanism, force, motion mode, law, acceleration, jerk.