

## РЕАЛІЗАЦІЯ КОМБІНОВАНОГО РЕЖИМУ РУХУ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

Ловейкін В. С., Почка К. І.

С целью повышения надёжности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки по ускорению четвёртого порядка. Рассчитаны кинематические характеристики формовочной тележки при комбинированном режиме возвратно-поступательного движения по ускорению четвёртого порядка. Предложена конструкция роликовой формовочной установки с приводом от высокомоментного шагового двигателя, который вмонтирован в укатывающие ролики формовочной тележки и обеспечивает комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки по ускорению четвёртого порядка.

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

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

Ловейкін В. С.

Почка К. І.

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

НУБіП України – Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ;

КНУБА – Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ.

УДК 693.546

Ловейкін В. С., Почка К. І.

### РЕАЛІЗАЦІЯ КОМБІНОВАНОГО РЕЖИМУ РУХУ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКУ

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

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

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

Для роликової формувальної установки при ущільненні бетонної суміші бажано мати постійну швидкість зворотно-поступального руху формувального візка на всій ділянці, що позитивно вплинуло б на якість готового виробу. Однак на практиці такий режим руху здійснити неможливо, оскільки в ньому відсутні ділянки розгону та гальмування, без яких не може бути циклічного руху. Тому пропонується реалізувати такий режим руху формувального візка при його переміщенні 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 формувального візка запропоновано здійснювати їх за оптимальним режимом руху за прискоренням четвертого порядку [7]. При цьому швидкість, прискорення, прискорення другого порядку (ривок) та прискорення третього порядку (відчуття) формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці, що, в свою чергу, позитивно впливає на її довговічність.

Критеріями режиму руху механізмів і машин можуть бути коефіцієнти нерівномірності руху та динамічності [7]. В даній роботі в якості критерію режиму руху використана критеріальна дія, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає міру руху або дію системи. Для оптимальних режимів розгону та гальмування за прискоренням четвертого порядку критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

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

де  $t$  – час;

$t_{p, z}$  – 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;

$V$

$x$  – прискорення четвертого порядку.

Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Пуассона:

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

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:

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

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

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

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

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:

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

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 [7]:

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

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:  $t=0$ :  $\dot{x} = \dot{x}_y$ ,  $\ddot{x} = 0$ ,  $\ddot{\ddot{x}} = 0$ ,  $x = 0$ ,  $x = 0$  та  $t=t_2$ :  $x = x_{12}$ ,  $\dot{x} = 0$ ,  $\ddot{x} = 0$ ,  $\ddot{\ddot{x}} = 0$ ,  $x = 0$ . 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:

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

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

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:

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

$$\begin{aligned}
 x_2^{IV} &= 1680 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 7 \cdot \frac{t^3}{t_2^3} - 15 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 10 \cdot \frac{t}{t_2} - 2 \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^5}; \\
 x_2^V &= 1680 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 35 \cdot \frac{t^3}{t_2^3} - 60 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 30 \cdot \frac{t}{t_2} - 4 \right) \cdot \frac{t}{t_2^5}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

У виразах (9), (10) та (14) координата початкового положення центра мас візка при розгоні  $x_{0p}$  та кінцева координата процесу гальмування  $x_{12}$  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:

$$\begin{aligned}
 S_p &= \int_0^{t_p} \dot{x}_p dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_p} \left( 35 \cdot \frac{t^8}{t_p^8} - 160 \cdot \frac{t^7}{t_p^7} + 280 \cdot \frac{t^6}{t_p^6} - 224 \cdot \frac{t^5}{t_p^5} + 70 \cdot \frac{t^4}{t_p^4} \right) dt = \\
 &= \dot{x}_y \cdot \left( \frac{35}{9} \cdot \frac{t^9}{t_p^8} - 20 \cdot \frac{t^8}{t_p^7} + 40 \cdot \frac{t^7}{t_p^6} - \frac{112}{3} \cdot \frac{t^6}{t_p^5} + 14 \cdot \frac{t^5}{t_p^4} \right) \Big|_0^{t_p} = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p;
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

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

$$\begin{aligned}
 S_z &= \int_0^{t_2} \dot{x}_z dt = \dot{x}_y \cdot \int_0^{t_2} \left( 35 \cdot \frac{t^8}{t_2^8} - 120 \cdot \frac{t^7}{t_2^7} + 140 \cdot \frac{t^6}{t_2^6} - 56 \cdot \frac{t^5}{t_2^5} + 1 \right) dt = \\
 &= \dot{x}_y \cdot \left( \frac{35}{9} \cdot \frac{t^9}{t_2^8} - 15 \cdot \frac{t^8}{t_2^7} + 20 \cdot \frac{t^7}{t_2^6} - \frac{28}{3} \cdot \frac{t^6}{t_2^5} + t \right) \Big|_0^{t_2} = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_2.
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Тоді вираз загального переміщення формувального візка можна подати у вигляді:

$$S = S_p + S_y + S_z = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p + \dot{x}_y \cdot t_y + \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_2 = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{5}{9} \cdot t_p + t_y + \frac{5}{9} \cdot t_2 \right).
 \tag{18}$$

Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу прийемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , де  $t_3$  – загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше. Тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$  та  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

Підставивши у вираз (18)  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ ,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ ,  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$  та амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x = S$ , отримуємо:

$$\Delta x = \dot{x}_y \cdot \left( \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 + \frac{2}{3} \cdot t_3 + \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 \right) = \frac{23}{27} \cdot \dot{x}_y \cdot t_3 \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_y = \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot t_3}. \quad (19)$$

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

$$x_{0y} = \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot t_p = \frac{5}{9} \cdot \frac{27 \cdot \Delta x}{23 \cdot t_3} \cdot \frac{1}{6} \cdot t_3 = \frac{5}{46} \cdot \Delta x, \quad (20)$$

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  $t_p = \frac{1}{6} \cdot t_3$ ,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ ,  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , кінематичні характеристики формувального візка на ділянках розгону, усталеного руху та гальмування можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{69984}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{17640}{7} \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 720 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 112 \cdot \frac{t}{t_3} + 7 \right) \cdot \frac{t^5}{t_3^5}; \\ \dot{x}_p &= \frac{69984}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 22680 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 17280 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 5040 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 672 \cdot \frac{t}{t_3} + 35 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^5}; \\ \ddot{x}_p &= \frac{9797760}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 1296 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 864 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 216 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 24 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{t^3}{t_3^5}; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\ddot{\ddot{x}}_p = \frac{29393280}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 3024 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 1728 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 360 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 32 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^5};$$

$${}^{IV}x_p = \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 9072 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 4320 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 720 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 48 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{t}{t_3^5};$$

$${}^Vx_p = \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 45360 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 17280 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} + 2160 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} - 96 \cdot \frac{t}{t_3} + 1 \right) \cdot \frac{1}{t_3^5};$$

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

$$\begin{aligned}
 x_2 &= \Delta x + \frac{27}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 6531840 \cdot \frac{t^9}{t_3^9} - 4199040 \cdot \frac{t^8}{t_3^8} + 933120 \cdot \frac{t^7}{t_3^7} - 72576 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} + \frac{t}{t_3} - \frac{5}{54} \right); \\
 \dot{x}_2 &= \frac{27}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 58786560 \cdot \frac{t^8}{t_3^9} - 33592320 \cdot \frac{t^7}{t_3^8} + 6531840 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} - 435456 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} + \frac{1}{t_3} \right); \\
 \ddot{x}_2 &= \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 216 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 108 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 18 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t^4}{t_3^6}; \\
 \ddot{\ddot{x}}_2 &= \frac{58786560}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 1512 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 648 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 90 \cdot \frac{t}{t_3} - 4 \right) \cdot \frac{t^3}{t_3^6}; \\
 x_2^{IV} &= \frac{705438720}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 756 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 270 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 30 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t^2}{t_3^6}; \\
 x_2^V &= \frac{1410877440}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 1890 \cdot \frac{t^3}{t_3^3} - 540 \cdot \frac{t^2}{t_3^2} + 45 \cdot \frac{t}{t_3} - 1 \right) \cdot \frac{t}{t_3^6}.
 \end{aligned} \tag{24}$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4$  м та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3$  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 прискорення четвертого порядку (рис. 1, е) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше.

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:

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

на ділянці усталеного руху:

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

на ділянці гальмування:

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{1}{R} \cdot \frac{27}{23} \cdot \Delta x \cdot \left( 58786560 \cdot \frac{t^8}{t_3^9} - 33592320 \cdot \frac{t^7}{t_3^8} + 6531840 \cdot \frac{t^6}{t_3^7} - 435456 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} + \frac{1}{t_3} \right). \tag{27}$$

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 –  $t_2 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ , отримуємо закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна при русі формувального візка від одного крайнього положення до іншого:



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

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

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

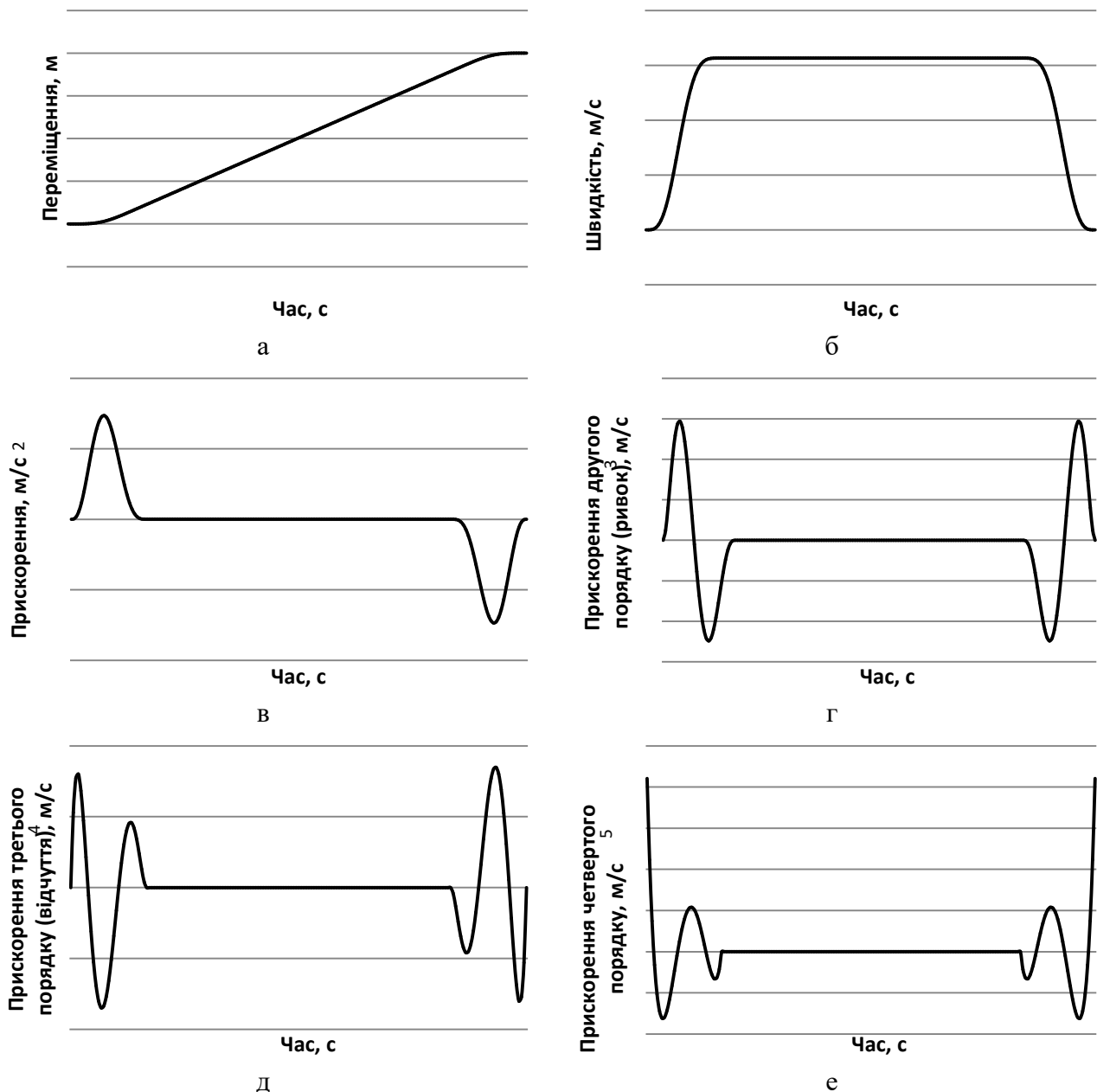


Рис. 1. Графіки зміни при комбінованому режимі руху візка за прискоренням четвертого порядку:

а – переміщення, б – швидкості, в – прискорення, г – прискорення другого порядку (ривок), д – прискорення третього порядку (відчуття), е – прискорення четвертого порядку

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

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

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

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

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 уключувальні ролики 6 на осі 7.

Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою високомоментного крокового двигуна, який вмонтовано в ролики, причому вісь ролика виконує роль статора, а сам ролик – ротора [8].

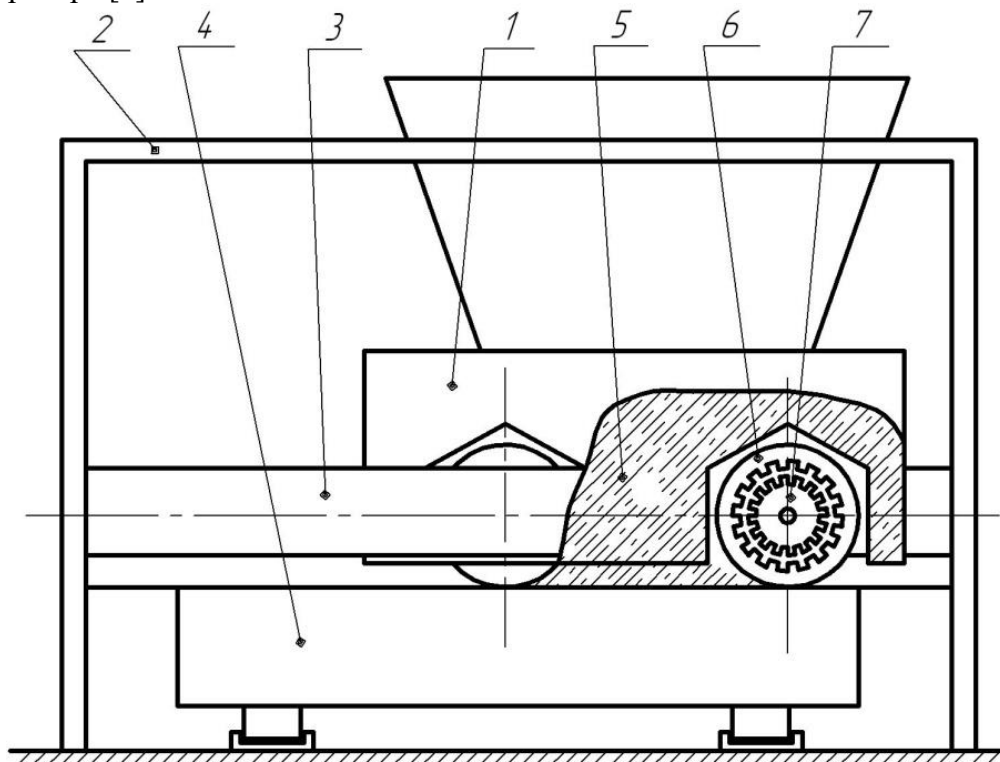


Рис. 2. Роликова формувальна установка з приводом від крокового двигуна

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

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.

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

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.

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

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гарнець В.М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В.М. Гарнець – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
2. Кузин В.Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов / В.Н. Кузин. – Автореф. дис... канд. наук. – М. – 1981. – 20 с.
3. Рюшин В.Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей / В.Т. Рюшин. – Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К. – 1986.
4. Ловейкін В.С. Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. I-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507–514.
5. Ловейкін В.С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П.Василенка. – Харків, 2007. – № 59. – Том I. – С. 465–474.
6. Ловейкін В.С. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекуперативним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – НУ «Львівська політехніка», 2007. – № 41. – С. 127–134.
7. Ловейкін В.С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Учебное пособие / В.С. Ловейкин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.
8. Пат. № 105744, В28В13/00. Установка для формирования виробів з бетонних сумішей. / Ловейкін В.С., Почка К.І., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г. – Бюл. № 11 від 10.06.2014 р.