

УДК 693.546

**РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РЕВЕРСУВАННЯ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПРИСКОРЕННЯМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ****Ловейкін В. С.<sup>1</sup>, Почка К. І.<sup>2</sup>, Ловейкін А. В.<sup>3</sup>***Національний університет біоресурсів і природокористування України<sup>1</sup>**Київський національний університет будівництва і архітектури<sup>2</sup>**Київський національний університет імені Тараса Шевченка<sup>3</sup>***Інформація про авторів:**

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

**Почка Костянтин Іванович:** ORCID: 0000-0002-0355-002X; shanovniy@ukr.net; кандидат технічних наук; в.о. завідувача кафедри основ професійного навчання; Київський національний університет будівництва і архітектури; проспект Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03680, Україна.

**Ловейкін Андрій Вячеславович:** ORCID: 0000-0002-7988-8350; anlov74@gmail.com; кандидат фізико-математичних наук; доцент кафедри математичної фізики; Київський національний університет імені Тараса Шевченка; корпус механіко-математичного факультету, проспект академіка Глушкова, 4е, м. Київ, 03022, Україна.

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

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

Отримано функції зміни кінематичних характеристик формувального візка при його русі від одного крайнього положення в інше, що відповідають оптимальному режиму реверсування за прискоренням третього порядку. При цьому із врахуванням функцій швидкості формувального візка розраховано закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна установки.

Запропоновано конструкцію роликкової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки і реалізує оптимальний режим реверсування за прискоренням третього порядку, що в свою чергу приводить до підвищення якості поверхні оброблюваної бетонної суміші та підвищення довговічності установки в цілому.

**Ключові слова:** установка, режим руху, привод, кроковий двигун.

**Ловейкин В. С., Почка К. И., Ловейкин А. В.** «Реализация оптимального режима реверсирования роликковой формовочной установки за ускорением третьего порядка».

Проведена оптимизация режима реверсирования роликковой формовочной установки для уплотнения изделий из бетонных смесей за ускорением третьего порядка.

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

Получены функции изменения кинематических характеристик формовочной тележки при её движении от одного крайнего положения в другое, которые соответствуют

## **Динаміка та міцність машин**

---

оптимальному режиму реверсування за ускоренням третього порядку. При цьому з урахуванням функцій швидкості формувальної тележки розраховано закон зміни кутової швидкості приводного шагового двигача установки.

Предложено конструкція роликів формувальної установки з приводом від високомоментного шагового двигача, який вмонтований в укатуючі ролики формувальної тележки установки і реалізує оптимальний режим реверсування за ускоренням третього порядку, що в свою чергу приводить до підвищенню якості поверхні оброблюваної бетонної суміші і підвищенню довговічності установки в цілому.

**Ключевые слова:** установка, режим движения, привод, шаговый двигатель.

*Loveikin V., Pochka K., Loveikin A.* "Realization of the optimum mode of a reversal of roller forming installation behind acceleration of the third order".

Optimization of the mode of a reversal of roller forming installation for consolidation of products from concrete mixes behind acceleration of the third order is performed.

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

Functions of change of kinematic characteristics of the forming cart at its movement are received from one extreme situation in another which correspond to the optimum mode of a reversal behind acceleration of the third order. Thus taking into account functions of speed of the forming cart the law of change of angular speed of the driving step engine of installation is calculated.

The design of roller forming installation with the drive from the high-moment step engine which is built in the rolling rollers of the forming cart of installation is offered and realizes the optimum mode of a reversal behind acceleration of the third order that in turn leads to improvement of quality of a surface to the processed concrete mix and increase of durability of installation in general.

**Keywords:** installation, movement mode, drive, step engine.

### **1. Постановка проблеми**

В установках роликів 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 роликів методом [1–3], до цих пір не було досліджено динаміку руху формувального візка та її вплив на процес формування. Мало приділялось уваги режимам руху формувального візка та зусиллям, що виникають в елементах приводного механізму.

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

В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликів 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 роликів формувальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формувального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

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

#### 4. Виклад основного матеріалу дослідження

Для роликів 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 третього порядку [7]. При цьому швидкість, прискорення та ривок 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 оптимального режиму реверсування за прискоренням третього порядку критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

$$I_Z = \int_0^{t_p} Z dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $t$  – час;  $t_p$  – тривалість реверсування;  $Z$  – енергія прискорень третього порядку:

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

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

Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Пуассона:

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

де  $x, \dot{x}, \ddot{x}, \overset{IV}{x}$  – координата переміщення, швидкість, прискорення та ривок візка.

З виразу (3) можна записати:

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

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

**Динаміка та міцність машин**

$$\begin{aligned}
& x = 0; \quad \overset{VII}{x} = C_1; \quad \overset{VI}{x} = C_1 \cdot t + C_2; \quad \overset{V}{x} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \\
& \overset{IV}{x} = \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4; \quad \ddot{x} = \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t^2 + C_4 \cdot t + C_5; \\
& \ddot{x} = \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t^2 + C_5 \cdot t + C_6; \\
& \dot{x} = \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t^2 + C_6 \cdot t + C_7; \\
& x = \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot t^2 + C_7 \cdot t + C_8,
\end{aligned} \tag{5}$$

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$  – постійні інтегрування, які визначаються з граничних умов.

Розділимо процес реверсування на два етапи: гальмування та пуск.

При гальмуванні початковими умовами є:  $t = 0: x = -x_1; \dot{x} = \dot{x}_y; \ddot{x} = 0; \ddot{\ddot{x}} = 0$ . Кінцеві умови при гальмуванні:  $t = t_2: x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = 0; \ddot{\ddot{x}} = 0$ . Тут  $x_1$  – координата початку процесу гальмування;  $\dot{x}_y$  – швидкість руху візка на усталеному режимі до початку гальмування.

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

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

$$\begin{aligned}
& t = 0: \quad C_8 = -x_1; \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_6 = 0; \quad C_5 = 0; \\
& t = t_2: \quad \begin{cases} \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_2^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_2^4 + \dot{x}_y \cdot t_2 - x_1 = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_2^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_2^3 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_2^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_2^2 = 0; \\ \frac{1}{24} \cdot C_1 \cdot t_2^4 + \frac{1}{6} \cdot C_2 \cdot t_2^3 + \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot t_2^2 + C_4 \cdot t_2 = 0. \end{cases}
\end{aligned} \tag{7}$$

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

$$\begin{aligned}
& C_1 = 50400 \cdot \left( \frac{\dot{x}_y}{t_2^6} - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2^7} \right); \quad C_2 = 1440 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2^6} - 18 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^5} \right); \\
& C_3 = 360 \cdot \left( 15 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^4} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2^5} \right); \quad C_4 = 120 \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2^4} - 4 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_2^3} \right).
\end{aligned} \tag{8}$$

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

$$\begin{aligned}
& \overset{IV}{x} = 8400 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^6} + 720 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^5} + \\
& + 360 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2^4} + 120 \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{1}{t_2^3}
\end{aligned} \tag{9}$$

або

$$IV_x = \frac{120}{t_2^3} \cdot \left[ 70 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 6 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right. \\ \left. + 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \right]. \quad (10)$$

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

$$I_{Z_2} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_2} x^2 dt = \frac{7200 \cdot m}{t_2^6} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 70 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + 6 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right. \\ \left. + 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t}{t_2} + \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \right]^2 dt = \\ = \frac{7200 \cdot m}{t_2^6} \cdot \int_0^{t_2} \left[ 4900 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_2^6} + 840 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^5}{t_2^5} + \right. \\ \left. + 36 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + 420 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^4}{t_2^4} + \right. \\ \left. + \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 36 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \right. \\ \left. + 9 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + 140 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_2^3} + \right. \\ \left. + 12 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^2}{t_2^2} + \right. \\ \left. + 6 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_2} \right] dt = \\ = \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[ 700 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \frac{36}{5} \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + 140 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) + \right. \\ \left. + 84 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + 9 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) + \right. \\ \left. + 35 \cdot \left( \dot{x}_y - 2 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) + 4 \cdot \left( 35 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 18 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) + \right. \\ \left. + 3 \cdot \left( 15 \cdot \dot{x}_y - 28 \cdot \frac{x_1}{t_2} \right) \cdot \left( 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} - 4 \cdot \dot{x}_y \right) \right] = \\ = \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \quad (11)$$

**Динаміка та міцність машин**

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

$$t = 0: \quad C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad (12)$$

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

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

$$\begin{aligned} C_1 &= 50400 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} - \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} \right); & C_2 &= 1440 \cdot \left( 17 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\ C_3 &= 360 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} - 13 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} \right); & C_4 &= 120 \cdot \left( 3 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n^4} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} x^{IV} &= 8400 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^6} + 720 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^5} + \\ &+ 360 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n^4} + 120 \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{1}{t_n^3} \end{aligned} \quad (15)$$

або

$$x^{IV} = \frac{120}{t_n^3} \cdot \left[ 70 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 6 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \right. \\ \left. + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \right]. \quad (16)$$

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

$$I_{Zn} = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{t_n} x^{IV} dt = \frac{7200 \cdot m}{t_n^6} \cdot \int_0^{t_n} \left[ 70 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + 6 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \right. \\ \left. + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \right]^2 dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{7200 \cdot m}{t_n^6} \cdot \int_0^{t_n} \left[ \begin{aligned} &4900 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^6}{t_n^6} + 36 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 9 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right)^2 \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + \\ &+ 840 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^5}{t_n^5} + 6 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \\ &+ 420 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 140 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ &+ 36 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \\ &+ 12 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} \end{aligned} \right] dt = \\
&= \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[ \begin{aligned} &700 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right)^2 + \frac{36}{5} \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right)^2 + \\ &+ 140 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + 3 \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + \\ &+ 84 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) + 35 \cdot \left( 2 \cdot \frac{x_1}{t_n} - \dot{x}_y \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) + \\ &+ 9 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 28 \cdot \frac{x_1}{t_n} - 13 \cdot \dot{x}_y \right) + \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right)^2 + \\ &+ 4 \cdot \left( 17 \cdot \dot{x}_y - 35 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \cdot \left( 3 \cdot \dot{x}_y - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \right) \end{aligned} \right] = \\
&= \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right].
\end{aligned} \tag{17}$$

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

$$I_Z = I_{Z_2} + I_{Z_n} = \frac{7200 \cdot m}{t_2^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_2^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_2} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right] + \frac{7200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[ 7 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^2} - 7 \cdot \frac{x_1}{t_n} \cdot \dot{x}_y + \frac{9}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \tag{18}$$

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

$$I_Z = \frac{7200 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ 14 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^2} - 14 \cdot \frac{x_1}{t_1} \cdot \dot{x}_y + \frac{18}{5} \cdot \dot{x}_y^2 \right]. \tag{19}$$

Для забезпечення виконання нерівності (1) необхідно виконати умову:

$$\frac{\partial I_Z}{\partial x_1} = \frac{7200 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ 28 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \right] = \frac{7200 \cdot m}{t_1^6} \cdot \left[ 28 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 14 \cdot \dot{x}_y \right] = 0. \tag{20}$$

Із виразу (20) можна отримати:

$$28 \cdot \frac{x_1}{t_1} - 14 \cdot \dot{x}_y = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \tag{21}$$

**Динаміка та міцність машин**

Підставивши другий вираз (21) у рівності (6) та (8) отримано постійні інтегрування в процесі гальмування формульованого візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3};$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_8 = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \quad (22)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (22) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формульованого візка в процесі гальмування:

$$x = -\frac{1}{2} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_1^3} - 2 \cdot t + t_1 \right); \quad \dot{x} = -\dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 1 \right);$$

$$\ddot{x} = -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right). \quad (23)$$

Підставивши другий вираз (21) у рівності (12) та (14) отримано постійні інтегрування в процесі пуску формульованого візка:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -720 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_3 = 360 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \quad C_4 = -60 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3};$$

$$C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0. \quad (24)$$

Після цього з урахуванням постійних інтегрування (24) отримано функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка формульованого візка в процесі пуску:

$$x = -\dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + \frac{5}{2} \cdot \frac{t^4}{t_1^3} \right); \quad \dot{x} = -\dot{x}_y \cdot \left( 6 \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - 15 \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} \right);$$

$$\ddot{x} = -30 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^4}{t_1^5} - 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^4} + \frac{t^2}{t_1^3} \right); \quad \ddot{\ddot{x}} = -60 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 2 \cdot \frac{t^3}{t_1^5} - 3 \cdot \frac{t^2}{t_1^4} + \frac{t}{t_1^3} \right). \quad (25)$$

На усталеному режимі руху формульованого візка координата переміщення, швидкості, прискорення та ривка його центра мас описуються рівняннями [7]:

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

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

У виразах (26) координату початкового положення центра мас візка при усталеному русі  $x_{0y}$  приймаємо рівною  $x_1$ . Тоді, прийнявши амплітуду переміщення візка від одного крайнього положення в інше  $\Delta x$ , кінцеву координату положення центра мас візка при усталеному русі можна визначити  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

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



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

Прийнявши загальний час руху формувального візка з одного крайнього положення в інше  $t_3$ , його можна розділити на три частини: час пуску –  $t_n$ ; час усталеного руху –  $t_y$ ; час гальмування –  $t_2$ . Для забезпечення ущільнення бетонної суміші формувальним візком з постійною швидкістю руху на більшості його робочого ходу приймемо час усталеного руху, наприклад,  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_3$ , тоді, задаючись умовою рівності часу розгону та гальмування, їх можна визначити відповідними виразами:  $t_n = t_2 = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_3$ .

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

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

Розглядаючи рух формувального візка від одного крайнього положення в інше та підставивши вирази (28) у рівності (23), (25) та (26), отримуємо функції зміни переміщення, швидкості, прискорення та ривка візка

– на ділянці пуску:

$$\begin{aligned} x &= \frac{648 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 36 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} \right); & \dot{x} &= \frac{2592 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \\ \ddot{x} &= 7776 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); & \ddot{x} &= 15552 \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right); \end{aligned} \quad (29)$$

– на ділянці усталеного руху:

$$x = \frac{\Delta x}{10} \cdot \left( 1 + 12 \cdot \frac{t}{t_3} \right); \quad \dot{x} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0; \quad (30)$$

– на ділянці гальмування:

$$\begin{aligned} x &= \Delta x - \frac{3 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 15552 \cdot \frac{t^6}{t_3^6} - 7776 \cdot \frac{t^5}{t_3^5} + 1080 \cdot \frac{t^4}{t_3^4} - 2 \cdot \frac{t}{t_3} + \frac{1}{6} \right); \\ \dot{x} &= -\frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 46656 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} - \frac{1}{t_3} \right); \\ \ddot{x} &= -7776 \cdot \Delta x \cdot \left( 36 \cdot \frac{t^4}{t_3^6} - 12 \cdot \frac{t^3}{t_3^5} + \frac{t^2}{t_3^4} \right); & \ddot{x} &= -15552 \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_3^6} - 18 \cdot \frac{t^2}{t_3^5} + \frac{t}{t_3^4} \right). \end{aligned} \quad (31)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше  $t_3 = 3 \text{ с}$ , за виразами (29)–(31) було розраховано кінематичні характеристики та побудовано графіки зміни переміщення (рис. 1, а), швидкості (рис. 1, б), прискорення (рис. 1, в) та ривка (рис. 1, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше та у зворотному напрямку з оптимальним режимом реверсування за прискоренням третього порядку.

Закон руху візка, описаний рівняннями (29)–(31), може бути здійснений приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в уочувальні ролики формувального візка установки. При цьому закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна описується рівняннями:

## Динаміка та міцність машин

– на ділянці розгону:

$$\dot{\varphi}_p = \frac{1}{R} \cdot \frac{2592 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right); \quad (32)$$

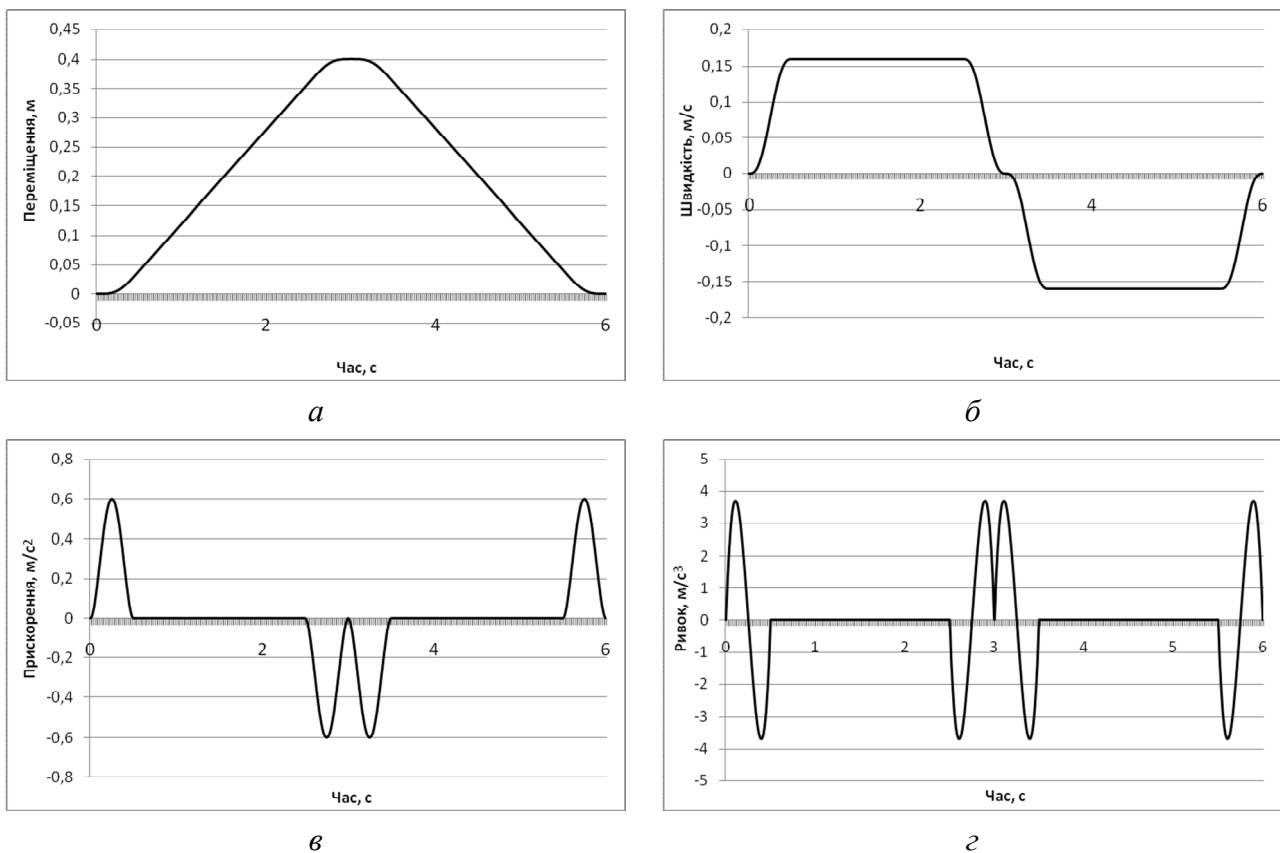
– на ділянці усталеного руху:

$$\dot{\varphi}_y = \frac{1}{R} \cdot \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3}; \quad (33)$$

– на ділянці гальмування:

$$\dot{\varphi}_z = \frac{1}{R} \cdot \frac{6 \cdot \Delta x}{5} \cdot \left( 19440 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} - 46656 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 2160 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} + \frac{1}{t_3} \right), \quad (34)$$

де  $R$  – радіус укочувальних роликів.



**Рис. 1** – Графіки зміни переміщення – а, швидкості – б, прискорення – в та ривка – г при русі формувального візка з оптимальним режимом реверсування а прискоренням третього порядку

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:

$$\dot{\varphi} = \frac{2592 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 108 \cdot \frac{t^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{t^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{t^3}{t_3^4} \right), \quad 0 \leq t \leq \frac{1}{6} \cdot t_3; \quad (35)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3 \cdot R}, \quad \frac{1}{6} \cdot t_3 < t < \frac{5}{6} \cdot t_3; \quad (36)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 19440 \cdot \frac{\left(t - \frac{5}{6} \cdot t_3\right)^4}{t_3^5} - 46656 \cdot \frac{\left(t - \frac{5}{6} \cdot t_3\right)^5}{t_3^6} - 2160 \cdot \frac{\left(t - \frac{5}{6} \cdot t_3\right)^3}{t_3^4} + \frac{1}{t_3} \right), \quad \frac{5}{6} \cdot t_3 < t \leq t_3. \quad (37)$$

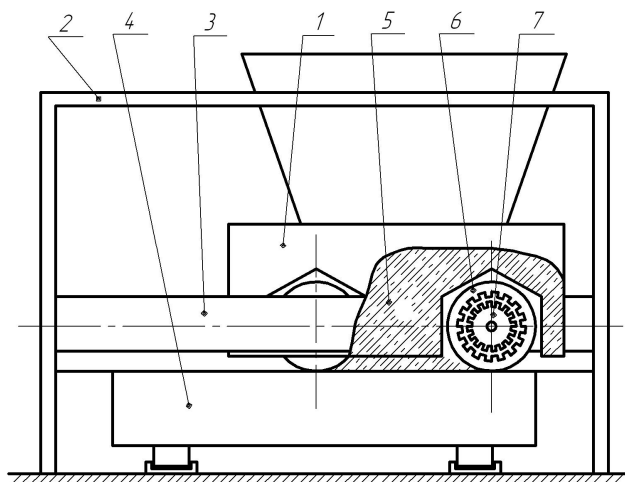
Аналогічно визначається закон зміни кутової швидкості приводного крокового двигуна при русі формувального візка у зворотному напрямку:

$$\dot{\varphi} = -\frac{2592 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 108 \cdot \frac{(t - t_3)^5}{t_3^6} - 45 \cdot \frac{(t - t_3)^4}{t_3^5} + 5 \cdot \frac{(t - t_3)^3}{t_3^4} \right), \quad t_3 \leq t \leq \frac{7}{6} \cdot t_3; \quad (38)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot t_3 \cdot R}, \quad \frac{7}{6} \cdot t_3 < t < \frac{11}{6} \cdot t_3; \quad (39)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{6 \cdot \Delta x}{5 \cdot R} \cdot \left( 19440 \cdot \frac{\left(t - \frac{11}{6} \cdot t_3\right)^4}{t_3^5} - 46656 \cdot \frac{\left(t - \frac{11}{6} \cdot t_3\right)^5}{t_3^6} - 2160 \cdot \frac{\left(t - \frac{11}{6} \cdot t_3\right)^3}{t_3^4} + \frac{1}{t_3} \right), \quad \frac{11}{6} \cdot t_3 < t \leq 2 \cdot t_3. \quad (40)$$

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 третього 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.



**Рис. 2** – 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 [8].

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-поступального руху формувального візка з оптимальним реверсуванням за прискоренням третього порядку.

**Динаміка та міцність машин**

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

3. Застосування в установці приводу від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики і реалізує оптимальний режим реверсування за прискоренням третього порядку 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.

4. Результати роботи можуть в подальшому бути корисними для уточнення та удосконалення існуючих інженерних методів розрахунку приводних механізмів машин роликів формувальних як на стадіях проектування/конструювання, так і в режимах реальної експлуатації.

**Список використаних джерел:**

1. Гарнець В. М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В. М. Гарнець. – Київ: Будівельник, 1991. – 144 с.
2. Кузин В. Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Кузин / Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона. – М., 1981. – 20 с.
3. Рюшин В. Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей : дис. .... канд. техн. наук / В. Т. Рюшин ; Киев. нац. ун-т стр-ва и архитектуры. – Киев, 1986. – 212 с.
4. Ловейкін В. С. Динамічний аналіз роликів 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 роликів формувальної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2007. – № 59, т. 1. – С. 465–474.
6. Ловейкін В. С. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликів формувальної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: укр. міжвід. наук.-техн. зб. / Нац. ун-т «Львів. Політехніка» – Львів, 2007. – № 41. – С. 127–134.
7. Ловейкин В. С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин: учеб. пособие / В. С. Ловейкин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168 с.
8. Пат. 105744 А. Україна, МПК В 28 В 13/00. Установка для формирования виробів з бетонних сумішей / В. С. Ловейкін, К. І. Почка, Ю. В. Човнюк, М. Г. Діктерук : Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – № а 2013 09305 ; заявл. 25.07.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

**References**

1. Harnets, V 1991, *Prohresyvni betonoformuiuchi ahrehaty i komplekisy*, Kyiv, Budivelnik.
2. Kuzin, V 1981, 'Tekhnologiya rolikovogo formovaniya ploskikh izdeliy iz melkozernistykh betonov', Kand. tekh. n. abstract, Nauchno-issledovatel'skiy institut betona i zhelezobetona, Moskva.
3. Ryushin, V 1986, 'Issledovanie rabocheho protsessa i razrobotka metodiki rascheta mashin rolikovogo formovaniya betonnykh smesey', Kand. tekh. n. thesis, Kyivskiy natsionalniy universytet budivnyctva i arkhitektury, Kyiv.
4. Loveikin, V & Pochka, K 2004, 'Dynamichniy analiz rolykovoї formovachnoi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom', *Dynamika, mitsnist i nadiinist silskohospodarskykh mashyn, Pr. I-i Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (DSR AM-I)*, Ternopil, pp. 507-514.
5. Loveikin, V & Pochka, K 2007, 'Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen rezhymiv rukhu rolykovoї formovalnoi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom', *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu silskoho gospodarstva im. P. Vasylenka*, no 59, vol. 1, pp. 465-474.
6. Loveikin V & Pochka, K 2007, 'Vyznachennia optymalnoho znachennia kuta zmishchennia kryvoshypiv rolykovoї formovalnoi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom', *Avtomatyzatsiia vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prylyadobuduvanni*, no. 41, pp. 127-134.
7. Loveikyn, V 1990, *Raschety optimalnykh rezhimov dvizheniya mekhanizmov stroitelnykh mashin*, UMK VO, Kyiv.
8. Loveikin, V, Pochka, K, Chovniuk, Iu & Dikteruk, M 2014, *Ustanovka dlia formuvannia vyrobiv z betonnykh sumishei*, UA Patent 105744.

Стаття надійшла до редакції 15 жовтня 2015 р.