

УДК 693.546

Реалізація оптимального динамічного режиму руху роlikової формувальної установки

Вячеслав Ловейкін¹, Костянтин Почка², Микола Пристайло³, Ольга Почка⁴

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

^{2,3,4}Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, 03037

¹lovvs@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4259-3900>,

²pochka.ki@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0355-002X>,

³prystailo.mo@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>,

⁴pochka.ob@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5701-978X>

Received: 11.05.2022; Accepted: 27.05.2022

<https://doi.org/10.32347/gbdmm.2022.99.0303>

Анотація. З метою підвищення надійності та довговічності роlikової формувальної установки розраховано оптимальний динамічний режим зворотно-поступального руху формувального візка. При розрахунку оптимального динамічного режиму руху в якості критерію режиму руху використана критеріальна дія, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає «енергію» прискорень. Розраховано функції зміни кінематичних характеристик формувального візка при його русі від одного крайнього положення до іншого. При такому режимі руху переміщення та швидкість формувального візка змінюються плавно, не створюючи значних динамічних навантажень в установці. Із врахуванням функцій зміни швидкості формувального візка розраховано закон зміни кутової швидкості обертання його укочувальних роликів. Запропоновано конструкцію роlikової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка і забезпечує оптимальний динамічний режим зворотно-поступального руху формувального візка. При застосуванні в установці вказаного приводу 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.

Ключові слова: установка, формувальний візок, режим руху, привод, переміщення, швидкість, прискорення, кроковий двигун.

ВСТУП

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 [1-5], до цих пір не було досліджено динаміку руху формувального візка та її вплив на процес формування. Мало приділялось уваги зусиллям, що виникають в елементах приводного механізму та формувального візка.

В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роlikового формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність [1-5]. 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 [6-9]. Тому актуальною є

задача удосконалення приводного механізму роликової формуальної установки з метою забезпечення такого режиму руху формуального візка, при якому зменшувалися б динамічні навантаження в елементах установки та підвищувалася її довговічність.

МЕТА РОБОТИ

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

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Критеріями режиму руху механізмів і машин можуть бути коефіцієнти нерівномірності руху та динамічності [10]. В даній роботі в якості критерію режиму руху використана критеріальна дія, яка являє собою інтеграл за часом з підінтегральною функцією, що виражає міру руху або дію системи. Для оптимального динамічного режиму руху критерій оптимальності руху матимемо у вигляді:

$$I_V = \int_0^{t_1} V dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де

t – час;

t_1 – тривалість руху візка від одного крайнього положення до іншого;

V – «енергія» прискорення:

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

де

m – маса формуального візка;

\ddot{x} – прискорення.

Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Пуассона:

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

де

x, \dot{x} – координата переміщення та швидкість відповідно.

З виразу (3) можна записати:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial x} &= \frac{\partial V}{\partial \dot{x}} = 0; \\ \frac{\partial V}{\partial \ddot{x}} &= m \cdot \ddot{x}; \\ \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial V}{\partial \ddot{x}} &= m \cdot \ddot{x} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} \overset{IV}{x} &= 0; \quad \ddot{x} = C_1; \quad \dot{x} = C_1 \cdot t + C_2; \\ \dot{x} &= \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t^2 + C_2 \cdot t + C_3; \\ x &= \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t + C_4, \end{aligned} \quad (5)$$

де

C_1, C_2, C_3, C_4 – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов.

Крайові умови руху візка від одного крайнього положення до іншого наступні: початкові – $t = 0, x = x_0, \dot{x} = 0$; кінцеві – $t = t_1, x = x_1, \dot{x} = 0$. Тут x_0 та x_1 – координати крайніх положень центра мас візка. Підставивши крайові умови в рівняння (5), отримаємо:

$$t = 0: \quad C_4 = x_0; \quad C_3 = 0; \quad (6)$$

$$t = t_1: \quad \begin{cases} \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot t_1^2 + x_0 = x_1; \\ \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot t_1^2 + C_2 \cdot t_1 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} C_1 &= -12 \cdot \frac{(x_1 - x_0)}{t_1^3}; \\ C_2 &= 6 \cdot \frac{(x_1 - x_0)}{t_1^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Підставивши визначені постійні інтегрування (6) та (8) в рівняння (5), отримаємо вирази для визначення кінематичних характеристик формувального візка при його переміщенні від одного крайнього положення до іншого при оптимальному динамічному режимі зворотно-поступального руху:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + (x_1 - x_0) \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{t}{t_1}\right) \cdot \frac{t^2}{t_1^2}; \\ \dot{x} &= 6 \cdot (x_1 - x_0) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \cdot \frac{t}{t_1^2}; \\ \ddot{x} &= 6 \cdot (x_1 - x_0) \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{t}{t_1}\right) \cdot \frac{1}{t_1^2}; \\ \dddot{x} &= -12 \cdot (x_1 - x_0) \cdot \frac{1}{t_1^3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Задавшись амплітудою переміщення формувального візка $\Delta x = x_1 - x_0 = 0,4 \text{ м}$ та загальним часом його руху від одного крайнього положення в інше $t_1 = 3 \text{ с}$, було розраховано кінематичні характеристики оптимального динамічного режиму руху формувального візка. За результатами розрахунків побудовано графіки зміни переміщення (рис. 1, а), швидкості (рис. 1, б), прискорення (рис. 1, в) та ривка (прискорення другого порядку) (рис. 1, г) при русі формувального візка з одного крайнього положення в інше при оптимальному динамічному режимі руху.

Закон руху візка, описаний рівняннями (9), 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 рівнянням:

$$\dot{\varphi} = 6 \cdot \frac{\Delta x}{R} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \cdot \frac{t}{t_1^2}, \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad (10)$$

де

R – радіус укочувальних роликів.

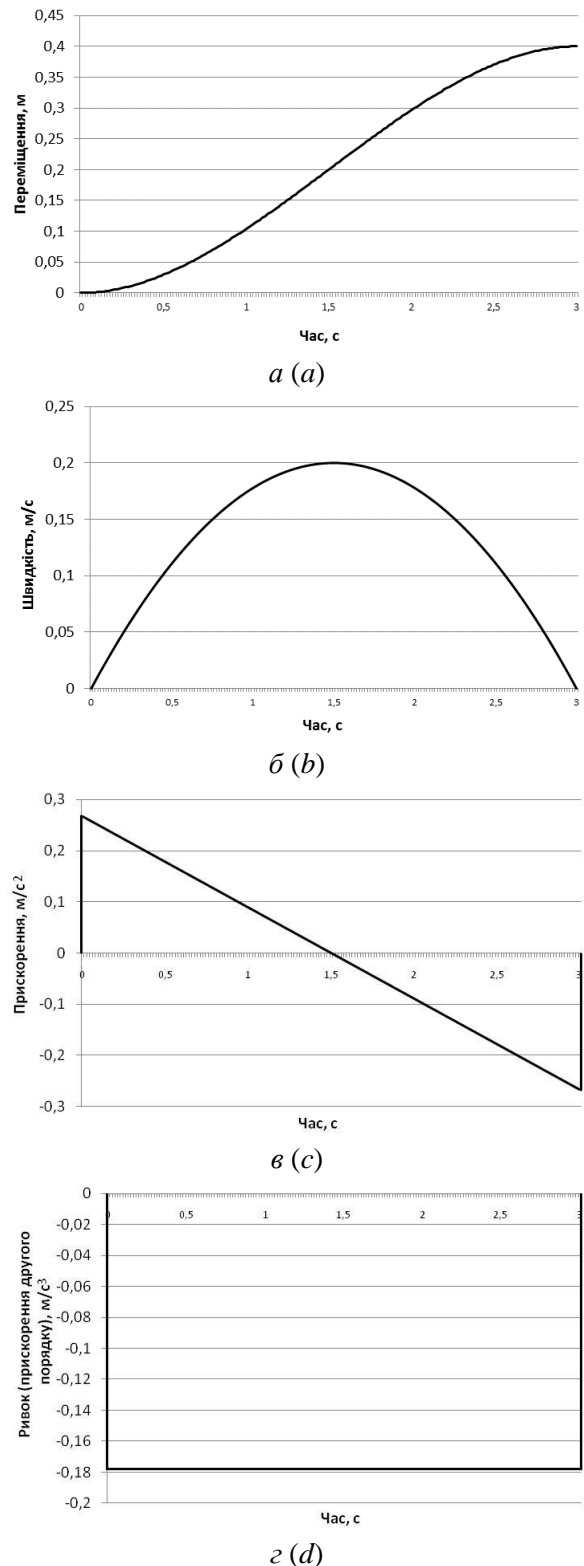


Рис. 1. Графіки зміни переміщення (а), швидкості (б), прискорення (в) та ривка (прискорення другого порядку) (г) при оптимальному динамічному режимі руху візка

Fig. 1. Graphs of changes in displacement (а), speed (б), acceleration (в) and jerk (acceleration of the second order) (г) at the optimal dynamic mode of the cart movement

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

$$\dot{\varphi} = -6 \cdot \frac{\Delta x}{R} \cdot \left[1 - \frac{(t-t_1)}{t_1} \right] \cdot \frac{(t-t_1)}{t_1^2}, \quad (11)$$

$$t_1 \leq t \leq 2t_1.$$

З метою зменшення динамічних навантажень в елементах установки та для підвищення її надійності запропоновано конструкцію установки з приводним механізмом для забезпечення оптимального динамічного режиму зворотно-поступального руху формувального візка (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.

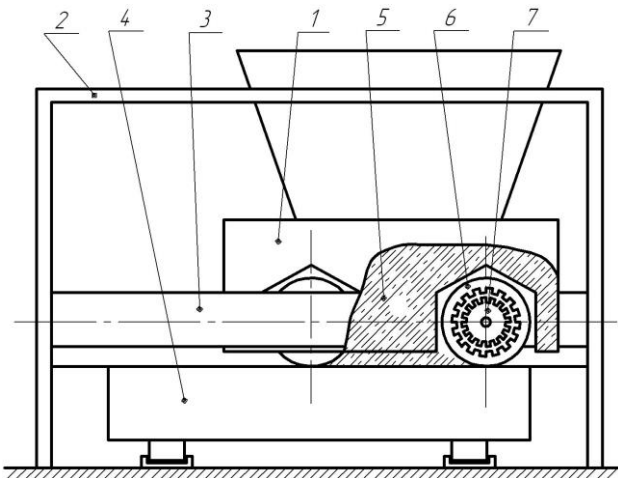


Рис. 2. Роликова формувальна установка з приводом від крокового двигуна

Fig. 2. Roller forming installation driven by a stepper motor

Візок приводиться в зворотно-поступальний рух за допомогою високомоментного крокового двигуна, який вмонтовано в ролики, причому вісь ролика виконує роль статора, а сам ролик – ротора [11].

При застосуванні в установці приводу від високомоментного крокового двигуна,

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

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень з метою підвищення надійності та довговічності роликової формувальної установки розраховано оптимальний динамічний режим зворотно-поступального руху формувального візка. Розраховано кінематичні характеристики формувального візка при оптимальному динамічному режимі зворотно-поступального руху.

Запропоновано конструкцію роликової формувальної установки з приводом від високомоментного крокового двигуна, що вмонтований в укочувальні ролики формувального візка установки для забезпечення оптимального динамічного режиму зворотно-поступального руху формувального візка.

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

ЛІТЕРАТУРА

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

2. **Гарнець В. М.** Теорія і практика створення бетоноформувань агрегатів (БФА) / В. М. Гарнець, Ю. В. Човнюк, С. В. Зайченко, В. О. Шаленко, Я. С. Приходько // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2014. – Вип. 83. – С. 49-54.
3. **Гарнець В. М.** Розробка науково-практичних рекомендацій по створенню бетоноформувань агрегатів (БФА) / В. М. Гарнець, С. В. Зайченко, Я. С. Приходько, В. О. Шаленко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2012. – Вип. 79. – С. 46-52.
4. **Зайченко С. В.** Енергетичний аналіз процесу роликового ущільнення / С. В. Зайченко, С. П. Шевчук, В. М. Гарнець // Енергетика: Економіка, технологія, екологія. – 2012. – № 1 (30). – С. 77-83.
5. **Зайченко С. В.** Тривимірне моделювання процесу роликового ущільнення стовбурного кріплення / С. В. Зайченко, С. П. Шевчук, В. М. Гарнець // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2012. – Вип. 79. – С. 40-45.
6. **Ловейкін В. С.** Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. І-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507-514.
7. **Ловейкін В. С.** Аналіз динамічного урівноваження приводів машин роликового формування / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Lublin-Rzeszow, 2016. – Vol. 18, No 3. – P. 41-52.
8. **Ловейкін В. С.** Силовий аналіз роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Техніка будівництва. – 2003. – № 14. – С. 27-37.
9. **Loveikin V. S.** Impact of cranks displacement angle on the motion non-uniformity of roller forming unit with energybalanced drive / V. S. Loveikin, K. I. Pochka, M. O. Prystailo, M. M. Balaka, O. V. Pochka // Опір матеріалів і теорія споруд. – К.: КНУБА, 2021. – Вип. 106. – С. 141-155. – DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.141-155.
10. **Ловейкін В. С.** Динамічна оптимізація кулачкового приводу машин роликового формування. Монографія / В. С. Ловейкін, К. І. Почка. – К.: ЦП «Компринт», 2016. – 177 с. – ISBN 978-966-929-197-4.
11. **Патент** України на винахід № 105744, МПК В28В 13/00 (2014.01). Установка для формирования виробів з бетонних сумішей / В.С. Ловейкін, К.І. Почка, Ю.В. Човнюк, М.Г. Діктерук (Україна); заявник і патенто-власник Національний університет біоресурсів і природокористування України, № а 2013 09305; заявл. 25.07.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

REFERENCES

1. **Harnets V. M., Zaichenko S. V., Chovniuk Yu. V., Shalenko V. O., Prykhodko Ya. S.** (2015). Betonofornuvalni ahrehaty. Konstruktyvno-funktsionalni skhemy, pryntsyp dii, osnovy teorii. Monohrafiia [Concrete-forming units. Structural and functional schemes, operation principle, theory basics. Monograph]. Kyiv: Interservis Publ., 238. – (in Ukrainian).
2. **Garnec V. M., Chovnjuk Ju. V., Zajchenko S. V., Shalenko V. O., Prihod'ko Ja. S.** (2014). Teorija i praktika stvorennja betonofornuval'nih agregativ (BFA) [Theory and practice of creation of units of formation of concrete]. Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioretion machines], No 83, 49-54. – (in Ukrainian).
3. **Garnec V. M., Zajchenko S. V., Prihod'ko Ja. S., Shalenko V. O.** (2012). Rozrobka naukovopraktichnih rekomendacij po stvorennju betonofornujuchih agregativ (BFA) [Development of scientific and practical recommendations about creation of units of formation of concrete]. Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioretion machines], No 79, 46-52. – (in Ukrainian).
4. **Zajchenko S. V., Shevchuk S. P., Garnec V. M.** (2012). Energetichnij analiz procesu rolikovogo ushhil'nennja [Power analysis of process of roller consolidation] Energetika: Ekonomika, tehnologija, ekologija [Power engineering: economics, technique, ecology], No.1 (30), 77-83. – (in Ukrainian).
5. **Zajchenko S. V., Shevchuk S. P., Garnec V. M.** (2012). Trivimirne modeljuvannja procesu rolikovogo ushhil'nennja stovburnogo kriplennja [Three-dimensional modeling of process of roller consolidation of column fastening]. Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioretion machines], No. 79, 40-45. – (in Ukrainian).
6. **Loveikin V. S., Pochka K. I.** (2004). Dynamichniy analiz rolykovoї formovochnoi ustanov-

ky z rekuperatsiynym pryvodom [Dynamic analysis of roller forming unit with recuperative drive]. *Dynamika, mitsnist i nadiinist silskohospodarskykh mashyn: materialy pershoi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (DSR AM-I)*. [Dynamics, Strength and Reliability of Agricultural Machinery: Proceedings of the 1st International Scientific and Technical Conference (DSR AM-I)]. Ternopil, 507-514. – (in Ukrainian).

7. **Loveikin V. S., Pochka K. I.** (2016). Analiz dinamicheskogo uravnoveshvaniya privodov mashin rolikovogo formovaniya [Analysis of dynamic equilibration by the drive of cars of roller formation]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – Vol. 18, No 3, 41-52.
8. **Loveikin V. S., Pochka K. I.** (2003). Silovij analiz rolikovoyi formovochnoyi ustanovki z rekuperacijnim pryvodom [Power analysis of a roller forming plant with a recuperative drive] *Tehnika budivnictva [Construction technique]*. Kyiv, Vyp. 14, 27-37. – (in Ukrainian).
9. **Loveikin V. S., Pochka K. I., Prystailo M. O., Balaka M. M., Pochka O. B.** (2021). Impact of cranks displacement angle on the motion non-uniformity of roller forming unit with energy-balanced drive. *Opir materialiv i teoriya sporud [Strength of Materials and Theory of Structures]*, Issue 106, 141-155. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.141-155.
10. **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. – (in Ukrainian).
11. **Loveikin V. S., Pochka K. I., Chovnyuk Yu. V., Dikteruk M. H.** (2014). Installation for formation of products from concrete mixes. Patent of Ukraine for an invention 105744, IPC B28B 13/00, Ukraine. Applicant and patentee National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, № a 2013 09305, stated 25.07.2013, published 10.06.2014, Bulletin № 11.

Implementation of the optimal dynamic mode movements of the roller forming installation

*Vyacheslav Loveykin¹, Kostiantyn Pochka²
Mykola Prystailo³, Olha Pochka⁴*

¹*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*
^{2,3,4}*Kyiv National University of Construction and Architecture*

Abstract. In order to increase the reliability and durability of the roller forming installation, the optimal dynamic mode of the reciprocating movement of the forming carriage was calculated.

When calculating the optimal dynamic mode of motion, the criterion action is used as a criterion for the motion mode, which is an integral over time with an integral function expressing the "energy" of accelerations. The functions of changing the kinematic characteristics of the forming trolley during its movement from one extreme position to another, which correspond to the optimal dynamic mode of reciprocating movement, were calculated. With this mode of movement, the movement and speed of the forming carriage change smoothly, without creating significant dynamic loads in the installation, which in turn has a positive effect on its durability.

Taking into account the functions of changing the speed of the forming carriage, the law of changing the angular speed of rotation of its rolling rollers was calculated. The design of a roller forming unit with a drive from a high-torque stepper motor, which is mounted in the rolling rollers of a forming carriage and provides an optimal dynamic mode of reciprocating movement of the forming carriage, is proposed.

When using the specified drive in the installation, the quality of the surface of the processed concrete mixture increases, dynamic loads in the elements of the drive mechanism are reduced, unnecessary destructive loads on the frame structure disappear and, accordingly, the reliability and durability of the installation as a whole increases.

The results of the work may be useful in the future for clarifying and improving the existing engineering methods for calculating the drive mechanisms of roll forming machines both at the design/construction stages and in real operation modes. Also, the results of the work can be useful in the design or improvement of mechanisms with reciprocating movement of executive elements.

Keywords: installation, forming carriage, movement mode, drive, movement, speed, acceleration, stepper motor.