

## Синтез кулачкового приводного механизма роликовой формовочной установки с комбинированным режимом движения по ускорению третьего порядка

Докт. техн. наук, проф. В. С. Ловейкин<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. К. И. Почка<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины (Киев, Украина),

<sup>2)</sup>Киевский национальный университет строительства и архитектуры (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** С целью повышения надежности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитаны комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки и ее кинематические характеристики при этом режиме по ускорению третьего порядка. При определении оптимального комбинированного режима движения по ускорению третьего порядка в качестве критерия режима движения использовано критериальное действие, представляющее собой интеграл по времени с подынтегральной функцией, выражающей энергию ускорений третьего порядка установки. Рассчитаны функции изменения кинематических характеристик формовочной тележки при ее движении из одного крайнего положения в другое, которые соответствуют оптимальному комбинированному режиму движения по ускорениям третьего порядка. С учетом функций перемещения формовочной тележки выведен закон изменения радиуса кулачка приводного механизма установки. Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма, построен профиль кулачка для обеспечения комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки. Использование в установке указанного приводного механизма повышает качество поверхности обрабатываемой бетонной смеси, уменьшает динамические нагрузки в элементах приводного механизма, способствует исчезновению лишних разрушительных нагрузок на рамную конструкцию и соответственно повышению надежности и долговечности установки в целом. Результаты работы могут быть полезны для уточнения и усовершенствования существующих инженерных методов расчета приводных механизмов машин роликового формования как на стадиях проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации, а также использоваться при проектировании или усовершенствовании механизмов с возвратно-поступательным движением исполнительных элементов.

**Ключевые слова:** установка, формовочная тележка, режим движения, привод, ускорение, кулачок

**Для цитирования:** Ловейкин, В. С. (2017) Синтез кулачкового приводного механизма роликовой формовочной установки с комбинированным режимом движения по ускорению третьего порядка / В. С. Ловейкин, К. И. Почка // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 206–214. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214 (in Russian)

## Synthesis of Camshaft Driving Mechanism in Roller Molding Installation with Combined Motion Mode according to Acceleration of Third Order

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

<sup>1)</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),

<sup>2)</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

**Abstract.** Combined reciprocating motion mode of a mold carriage and its kinematic characteristics while applying this mode and according to acceleration of the third order have been calculated in order to improve reliability and durability of roller molding installation. When calculating optimum combined motion mode according to acceleration of the third order a criteria action has been used as a criterion of the motion mode and it represents a time integral with a sub-integral function that

### Адрес для переписки

Почка Константин Иванович  
Киевский национальный университет  
строительства и архитектуры  
просп. Воздухофлотский, 31,  
03680, г. Киев, Украина  
Тел.: +380 44 248-69-25  
Shanovniy@ukr.net

### Address for correspondence

Pochka Konstantin I.  
Kyiv National University  
of Construction and Architecture  
31 Povitroflotsky Ave.  
03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: +380 44 248-69-25  
Shanovniy@ukr.net

expresses energy of accelerations of the third order for the installation. Functions for change of kinematic characteristics of the forming cart when it is moving from one extreme position to another one have been calculated in the paper. The characteristics correspond to the optimum combined motion mode according to the acceleration of the third order. Taking into account functions for movement of the forming cart a law for cam radius change in a driving mechanism of the installation has been created in the paper. Design of the installation drive in the form of camshaft mechanism has been developed and a cam profile has been constructed in order to ensure a combined reciprocating motion mode for a mold carriage. Usage of the mentioned driving mechanism in installation makes it possible to improve quality of the processed concrete mix surface, to decrease dynamic loads in the elements of a driving mechanism, to contribute to disappearance of excessive destructive loads on a framed structure and, respectively, to increase reliability and durability of the installation in general. Results of the investigations can be used for clarification and improvement of the existing engineering calculation methods for driving mechanisms in roller molding machines at a designing stage and in the modes of their actual operation. Working results can be useful in the future in order to specify and improve existing engineering methods for calculation of driving mechanisms in roller molding installations at the design/engineering stage and in the mode of actual operation. Results of the work can be useful while designing or improving mechanisms with reciprocating motion of actuating elements.

**Keywords:** installation, forming cart, motion mode, drive, acceleration, cam

**For citation:** Loveykin 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 and Technique*. 16 (3), 206–214. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214 (in Russian)

## Введение

В существующих установках поверхностного уплотнения железобетонных изделий используется кривошипно-ползунный или гидравлический привод возвратно-поступательного движения формовочной тележки с уплотняющими роликами [1–7]. Во время постоянных пуско-тормозных режимов движения возникают значительные динамические нагрузки в элементах приводного механизма и в элементах формовочной тележки, которые могут привести к преждевременному выходу установки из рабочего состояния.

В существующих теоретических и экспериментальных исследованиях машин роликового формования железобетонных изделий обоснованы их конструктивные параметры и продуктивность [1–3, 8–10]. Вместе с тем недостаточно внимания уделено исследованию действующих динамических нагрузок и режимов движения [4, 8–10], что в значительной мере влияет на работу установки и качество готовой продукции.

Цель исследований – усовершенствование конструкции приводного механизма роликовой формовочной установки для повышения ее надежности и долговечности.

## Основная часть

Для роликовой формовочной установки при уплотнении бетонной смеси желательно иметь постоянную скорость возвратно-поступательного движения формовочной тележки на всем участке, что позитивно влияло бы на качество готового изделия. Однако на практике такой

режим движения осуществить невозможно, поскольку в нем отсутствуют участки разбега и торможения, без которых не может быть циклического движения. Поэтому предлагается реализовать данный режим движения формовочной тележки при ее перемещении от одного крайнего положения к другому, в котором были бы участки разгона и торможения с минимальными динамическими нагрузками и участок движения с постоянной скоростью.

Для плавного процесса разгона и торможения формовочной тележки предложено осуществлять их по оптимальному режиму по ускорению третьего порядка. При этом скорость, ускорение и рывок формовочной тележки изменяются плавно, не создавая значительных динамических нагрузок в установке, что в свою очередь позитивно влияет на ее долговечность.

Критериями режима движения механизмов и машин могут быть коэффициенты неравномерности движения и динамичности [11]. В качестве критерия режима движения авторы статьи использовали критериальное действие, являющее собой интеграл по времени с подынтегральной функцией, которая выражает меру движения либо действие системы. Для оптимального режима разгона и торможения по ускорению третьего порядка критерий оптимальности движения запишем в виде

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

где  $t_{p,t}$  – продолжительность процесса разгона либо торможения формовочной тележки;  $Z$  – энергия ускорений третьего порядка

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

$m$  – масса формовочной тележки;  $x^{\text{IV}}$  – ускорение третьего порядка.

Условием минимума критерия (1) есть уравнение Пуассона

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

где  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ ,  $\overset{\text{IV}}{\partial x}$  – координата перемещения, скорость, ускорение и рывок тележки.

Из выражения (3) можно записать:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \overset{\text{IV}}{\partial x}} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial x} = m \cdot x^{\text{IV}}$$

$$\frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Z}{\partial x} = m \cdot x^{\text{VIII}} = 0. \quad (4)$$

Из (4) получаем дифференциальное уравнение и его решения:

$$x^{\text{VIII}} = 0; \quad x^{\text{VII}} = C_1; \quad x^{\text{VI}} = C_1 t + C_2;$$

$$x^{\text{V}} = \frac{1}{2} C_1 t^2 + C_2 t + C_3;$$

$$x^{\text{IV}} = \frac{1}{6} C_1 t^3 + \frac{1}{2} C_2 t^2 + C_3 t + C_4;$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{24} C_1 t^4 + \frac{1}{6} C_2 t^3 + \frac{1}{2} C_3 t^2 + C_4 t + C_5;$$

$$\dot{x} = \frac{1}{120} C_1 t^5 + \frac{1}{24} C_2 t^4 + \frac{1}{6} C_3 t^3 + \quad (5)$$

$$+ \frac{1}{2} C_4 t^2 + C_5 t + C_6;$$

$$\dot{x} = \frac{1}{720} C_1 t^6 + \frac{1}{120} C_2 t^5 + \frac{1}{24} C_3 t^4 + \frac{1}{6} C_4 t^3 +$$

$$+ \frac{1}{2} C_5 t^2 + C_6 t + C_7;$$

$$x = \frac{1}{5040} C_1 t^7 + \frac{1}{720} C_2 t^6 + \frac{1}{120} C_3 t^5 +$$

$$+ \frac{1}{24} C_4 t^4 + \frac{1}{6} C_5 t^3 + \frac{1}{2} C_6 t^2 + C_7 t + C_8,$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$  – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий;  $t$  – время.

Для участка разгона граничные условия принимают следующие значения:

$$t = 0: \quad x = 0; \quad \dot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0; \quad \overset{\text{IV}}{\partial x} = 0;$$

$$t = t_p: \quad \dot{x} = \dot{x}_y; \quad \ddot{x} = 0; \quad \overset{\text{IV}}{\partial x} = 0,$$

где  $t_p$  – продолжительность разгона формовочной тележки с состояния покоя до выхода на установившийся режим движения;  $\dot{x}_y$  – скорость тележки на установившемся режиме.

Подставив вышеуказанные граничные условия в (5), получим:

$$t = 0: \quad C_8 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_5 = 0; \quad (6)$$

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

Решив систему уравнений (7), найдем постоянные интегрирования  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$ :

$$C_1 = -7200 \frac{\dot{x}_y}{t_p^6}; \quad C_2 = 4320 \frac{\dot{x}_y}{t_p^5};$$

$$C_3 = -1080 \frac{\dot{x}_y}{t_p^4}; \quad C_4 = 120 \frac{\dot{x}_y}{t_p^3}. \quad (8)$$

Подставив определенные постоянные интегрирования (6) и (8) в (5), получаем функции изменения перемещения, скорости, ускорения и рывка формовочной тележки в процессе разгона с состояния покоя до выхода на установившийся режим движения:

$$x_p = x_{0p} + \dot{x}_y \left( -\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_p^6} + 6 \frac{t^6}{t_p^5} - 9 \frac{t^5}{t_p^4} + 5 \frac{t^4}{t_p^3} \right);$$

$$\dot{x}_p = \dot{x}_y \left( -10 \frac{t^6}{t_p^6} + 36 \frac{t^5}{t_p^5} - 45 \frac{t^4}{t_p^4} + 20 \frac{t^3}{t_p^3} \right); \quad (9)$$

$$\ddot{x}_p = 60 \dot{x}_y \left( -\frac{t^5}{t_p^6} + 3 \frac{t^4}{t_p^5} - 3 \frac{t^3}{t_p^4} + \frac{t^2}{t_p^3} \right);$$

$$\ddot{x}_p = 60\dot{x}_y \left( -5 \frac{t^4}{t_p^6} + 12 \frac{t^3}{t_p^5} - 9 \frac{t^2}{t_p^4} + 2 \frac{t}{t_p^3} \right),$$

где  $x_{0p}$  – координата начального положения центра масс тележки при разгоне.

На установившемся режиме движения формовочной тележки координаты перемещения и скорости ее центра масс описываются уравнениями [11]:

$$x_y = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y})t}{t_y}; \quad \dot{x}_y = \frac{x_{1y} - x_{0y}}{t_y} = \text{const};$$

$$\ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{y}_y = 0, \quad (10)$$

где  $x_{0y}, x_{1y}$  – координаты начального и конечного положений центра масс тележки при установившемся движении;  $t_y$  – продолжительность установившегося движения.

Для участка торможения граничные условия принимают следующие значения:

$$t = 0: \quad \dot{x} = \dot{x}_y; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{y} = 0; \quad x = 0;$$

$$t = t_T: \quad x = x_{1T}; \quad \dot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{y} = 0,$$

где  $t_T$  – продолжительность торможения с момента установившегося движения до полной остановки;  $x_{1T}$  – конечная координата процесса торможения.

Подставив вышеуказанные граничные условия в (5), получим:

$$t = 0: \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_6 = 0; \quad C_5 = 0; \quad C_4 = 0; \quad (11)$$

$$t = t_T: \quad \begin{cases} \frac{1}{5040}C_1t_T^7 + \frac{1}{720}C_2t_T^6 + \frac{1}{120}C_3t_T^5 + \dot{x}_y t_T + C_8 = x_{1T}; \\ \frac{1}{720}C_1t_T^6 + \frac{1}{120}C_2t_T^5 + \frac{1}{24}C_3t_T^4 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120}C_1t_T^5 + \frac{1}{24}C_2t_T^4 + \frac{1}{6}C_3t_T^3 = 0; \\ \frac{1}{24}C_1t_T^4 + \frac{1}{6}C_2t_T^3 + \frac{1}{2}C_3t_T^2 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Решив систему уравнений (12), найдем постоянные интегрирования  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_8$ :

$$C_1 = -7200 \frac{\dot{x}_y}{t_T^6}; \quad C_2 = 2880 \frac{\dot{x}_y}{t_T^5};$$

$$C_3 = -360 \frac{\dot{x}_y}{t_T^4}; \quad C_8 = x_{1T} - \frac{4}{7} \dot{x}_y t_T. \quad (13)$$

Подставив определенные постоянные интегрирования (11) и (13) в (5), получим функции

изменения перемещения, скорости, ускорения и рывка формовочной тележки в процессе торможения с момента установившегося движения до полной остановки:

$$x_T = x_{1T} - \dot{x}_y \left( \frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_T^6} - 4 \frac{t^6}{t_T^5} + 3 \frac{t^5}{t_T^4} - t + \frac{4}{7} t_T \right);$$

$$\dot{x}_T = \dot{x}_y \left( -10 \frac{t^6}{t_T^6} + 24 \frac{t^5}{t_T^5} - 15 \frac{t^4}{t_T^4} + 1 \right); \quad (14)$$

$$\ddot{x}_T = 60\dot{x}_y \left( -\frac{t^5}{t_T^6} + 2 \frac{t^4}{t_T^5} - \frac{t^3}{t_T^4} \right);$$

$$\ddot{y}_T = 60\dot{x}_y \left( -5 \frac{t^4}{t_T^6} + 8 \frac{t^3}{t_T^5} - 3 \frac{t^2}{t_T^4} \right).$$

В выражениях (9), (10) и (14) координата начального положения центра масс тележки при разгоне  $x_{0p}$  и конечная координата процесса торможения  $x_{1T}$  отвечают ее крайним положениям, однако неизвестны скорость движения  $\dot{x}_y$  формовочной тележки на установившемся режиме, координаты начального  $x_{0y}$  и конечного  $x_{1y}$  положений центра масс тележки при установившемся движении.

Разделим перемещение  $S$  формовочной тележки от одного крайнего положения до другого на три участка: 1 – участок разгона, ему отвечает перемещение  $S_p$ ; 2 – участок установившегося движения, ему отвечает  $S_y$ ; 3 – участок торможения, ему отвечает  $S_T$ . Учитывая зависимости (9), (10) и (14), выражения перемещения на каждом участке можно представить в виде:

$$S_p = \int_0^{t_p} \dot{x}_p dt = \dot{x}_y \int_0^{t_p} \left( -10 \frac{t^6}{t_p^6} + 36 \frac{t^5}{t_p^5} - 45 \frac{t^4}{t_p^4} + 20 \frac{t^3}{t_p^3} \right) dt =$$

$$= \dot{x}_y \left( -\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_p^6} + 6 \frac{t^6}{t_p^5} - 9 \frac{t^5}{t_p^4} + 5 \frac{t^4}{t_p^3} \right) \Big|_0^{t_p} = \frac{4}{7} \dot{x}_y t_p; \quad (15)$$

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

$$S_T = \int_0^{t_T} \dot{x}_T dt = \dot{x}_y \int_0^{t_T} \left( -10 \frac{t^6}{t_T^6} + 24 \frac{t^5}{t_T^5} - 15 \frac{t^4}{t_T^4} + 1 \right) dt =$$

$$= \dot{x}_y \left( -\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_T^6} + 4 \frac{t^6}{t_T^5} - 3 \frac{t^5}{t_T^4} + t \right) \Big|_0^{t_T} = \frac{4}{7} \dot{x}_y t_T. \quad (17)$$

Тогда выражение общего перемещения формовочной тележки запишется следующим образом:

$$S = S_p + S_y + S_\tau = \frac{4}{7} \dot{x}_y t_p + \dot{x}_y t_y + \frac{4}{7} \dot{x}_y t_\tau = \dot{x}_y \left( \frac{4}{7} t_p + t_y + \frac{4}{7} t_\tau \right). \quad (18)$$

Для обеспечения уплотнения бетонной смеси формовочной тележкой с постоянной скоростью движения на большей части ее рабочего хода примем время установившегося движения, например,  $t_y = \frac{2}{3} t_0$ , где  $t_0$  – общее время движения формовочной тележки от одного крайнего положения до другого. Тогда, задавшись условием равенства времени разгона и торможения, их можно определить по соответственным выражениям:  $t_p = \frac{1}{6} t_0$  и  $t_\tau = \frac{1}{6} t_0$ .

Подставив в (18)  $t_p = \frac{1}{6} t_0$ ;  $t_y = \frac{2}{3} t_0$ ;  $t_\tau = \frac{1}{6} t_0$  и амплитуду перемещения тележки от одного крайнего положения до другого  $\Delta x = S$ , получим

$$\Delta x = \dot{x}_y \left( \frac{4}{7} \cdot \frac{1}{6} t_0 + \frac{2}{3} t_0 + \frac{4}{7} \cdot \frac{1}{6} t_0 \right) = \frac{6}{7} \dot{x}_y t_0 \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{7 \Delta x}{6 t_0}. \quad (19)$$

Координату положения формовочной тележки  $x_{0y}$ , которая определяет окончание участка разгона и начало участка установившегося движения, можно найти из (15) и (19)

$$x_{0y} = \frac{4}{7} \dot{x}_y t_p = \frac{4}{7} \cdot \frac{7 \Delta x}{6 t_0} \cdot \frac{1}{6} t_0 = \frac{1}{9} \Delta x, \quad (20)$$

а координату  $x_{1y}$ , определяющую окончание участка установившегося движения и начало участка торможения, вычислим из (16), (19) и (20)

$$x_{1y} = x_{0y} + \dot{x}_y t_y = \frac{1}{9} \Delta x + \frac{7 \Delta x}{6 t_0} \cdot \frac{2}{3} t_0 = \frac{8}{9} \Delta x. \quad (21)$$

Подставив выражения (19)–(21) в (9), (10) и (14) и приняв  $t_p = \frac{1}{6} t_0$ ;  $t_y = \frac{2}{3} t_0$ ;  $t_\tau = \frac{1}{6} t_0$ , кинематические характеристики формовочной

тележки на участках разгона, установившегося движения и торможения можно представить в виде:

$$\begin{aligned} x_p &= 252 \Delta x \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} + 216 \frac{t^6}{t_0^6} - 54 \frac{t^5}{t_0^5} + 5 \frac{t^4}{t_0^4} \right); \\ \dot{x}_p &= 252 \Delta x \left( -2160 \frac{t^6}{t_0^7} + 1296 \frac{t^5}{t_0^6} - 270 \frac{t^4}{t_0^5} + 20 \frac{t^3}{t_0^4} \right); \\ \ddot{x}_p &= 15120 \Delta x \left( -216 \frac{t^5}{t_0^7} + 108 \frac{t^4}{t_0^6} - 18 \frac{t^3}{t_0^5} + \frac{t^2}{t_0^4} \right); \\ \ddot{\ddot{x}}_p &= 30240 \Delta x \left( -540 \frac{t^4}{t_0^7} + 216 \frac{t^3}{t_0^6} - 27 \frac{t^2}{t_0^5} + \frac{t}{t_0^4} \right); \\ x_y &= \frac{1}{9} \Delta x \left( 1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_0} \right); \quad \dot{x}_y = \frac{7 \Delta x}{6 t_0} = \text{const}; \\ \ddot{x}_y &= 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_y = 0; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} x_\tau &= \Delta x - \frac{7}{6} \Delta x \left( \frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} - 31104 \frac{t^6}{t_0^6} + 3888 \frac{t^5}{t_0^5} - \frac{t}{t_0} + \frac{2}{21} \right); \\ \dot{x}_\tau &= \frac{7}{6} \Delta x \left( -466560 \frac{t^6}{t_0^7} + 186624 \frac{t^5}{t_0^6} - 19440 \frac{t^4}{t_0^5} + \frac{1}{t_0} \right); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_\tau &= 90720 \Delta x \left( -36 \frac{t^5}{t_0^7} + 12 \frac{t^4}{t_0^6} - \frac{t^3}{t_0^5} \right); \\ \ddot{\ddot{x}}_\tau &= 272160 \Delta x \left( -60 \frac{t^4}{t_0^7} + 16 \frac{t^3}{t_0^6} - \frac{t^2}{t_0^5} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Приняв амплитуду перемещения формовочной тележки  $\Delta x = 0,4$  м и продолжительность ее движения от одного крайнего положения до другого  $t_0 = 3$  с, по уравнениям (22)–(24) рассчитаем кинематические характеристики комбинированного режима движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка. По результатам вычислений построены графики изменения перемещения (рис. 1а), скорости (рис. 1б), ускорения (рис. 1с) и рывка (рис. 1д) при комбинированном режиме движения формовочной тележки от одного крайнего положения до другого.

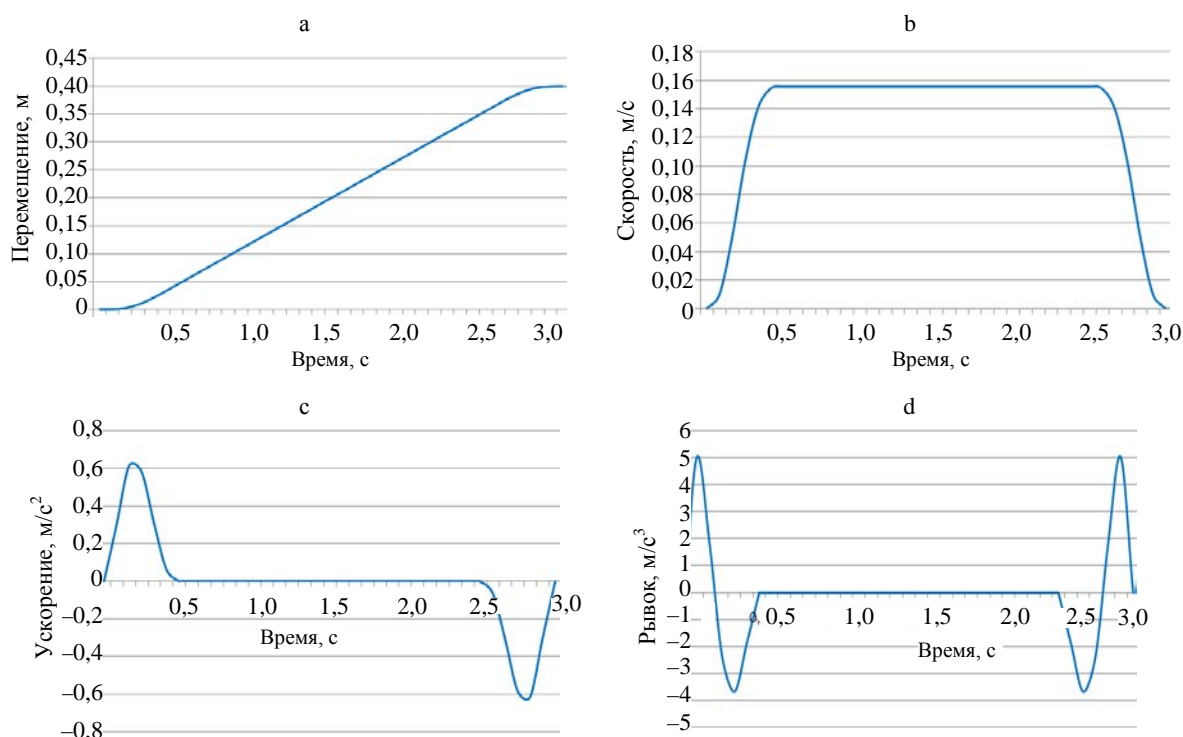


Рис. 1. Изменения перемещения (а), скорости (б), ускорения (с) и рывка (д) при комбинированном режиме движения тележки по ускорению третьего порядка

Fig. 1. Changes in motion (a), speed (b), acceleration (c) and hitch (d) while using combined mode of carriage motion according to acceleration of 3<sup>rd</sup> order

Преобразовав первые уравнения выражений (22)–(24) для случая, когда начало координат отсчитывается от среднего положения перемещения формовочной тележки, получим:

– на участке разгона

$$x_p = 252\Delta x \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^3}{t_0^3} + 216 \frac{t^2}{t_0^2} - 54 \frac{t}{t_0} + 5 \right) \times \left( \frac{t^4}{t_0^4} - \frac{\Delta x}{2} \right); \quad (25)$$

– на участке установившегося движения

$$x_y = \frac{1}{9} \Delta x \left( 1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_0} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (26)$$

– на участке торможения

$$x_t = \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6} \Delta x \left( \frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} - 31104 \frac{t^6}{t_0^6} + 3888 \frac{t^5}{t_0^5} - \frac{t}{t_0} + \frac{2}{21} \right). \quad (27)$$

Закон движения тележки, описанный уравнениями (25)–(27), может быть осуществлен приво-

дом с кулачковым механизмом (рис. 2) возвратно-поступательного движения тележки. При этом движение тележки в одном направлении осуществляется за счет поворота кулачка на половину оборота (т. е.  $\varphi = \pi$ ) и в возвратном направлении еще на половину оборота; полный цикл движения тележки – за один оборот кулачка.

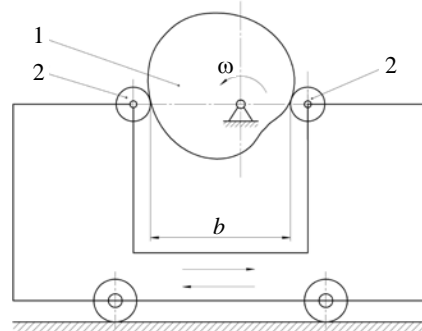


Рис. 2. Схема механизма с кулачковым приводом возвратно-поступательного движения тележки: 1 – кулачок; 2 – толкатель;  $b$  – расстояние между толкателями;  $\omega$  – угловая скорость кулачка

Fig. 2. Scheme of mechanism with cam drive for reciprocating movement of carriage: 1 – cam; 2 – pusher mechanism;  $b$  – distance between pusher mechanisms;  $\omega$  – rate of cam angular motion

Для осуществления описанного закона движения тележки необходимо, чтобы приращение радиуса кулачка соответствовало приращению перемещения тележки. Согласно этому переменный радиус кулачка определяется зависимостями:

– на участке разгона

$$\rho = \frac{b}{2} + 252\Delta x \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^3}{t_0^3} + 216 \frac{t^2}{t_0^2} - 54 \frac{t}{t_0} + 5 \right) \times \frac{t^4}{t_0^4} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (28)$$

– на участке установившегося движения

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{9}\Delta x \left( 1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_0} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (29)$$

– на участке торможения

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6}\Delta x \left( \frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} - 31104 \frac{t^6}{t_0^6} + 3888 \frac{t^5}{t_0^5} - \frac{t}{t_0} + \frac{2}{21} \right); \quad (30)$$

где  $b$  – расстояние между толкателями (рис. 2).

Время  $t$  можно исключить из (28)–(30), так как  $t = \varphi/\omega$ , а  $t_1 = \pi/\omega$  (где  $\varphi$  – угловая координата поворота кулачка;

$\omega$  – угловая скорость кулачка). Поскольку время разгона формовочной тележки определяется зависимостью

$t_p = \frac{1}{6}t_0$ , то процесс разгона будет осуществляться поворотом кулачка на угол в пределах от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \pi/6$ ;

время установившегося движения  $t_y = \frac{2}{3}t_0$ . Тогда установившееся движение тележки обеспечится поворотом кулачка на угол в пределах от  $\varphi = \pi/6$  до  $\varphi = 5\pi/6$ ;

время торможения  $t_t = \frac{1}{6}t_0$ . Итак, процесс торможения будет осуществляться поворотом кулачка на угол в пределах от  $\varphi = 5\pi/6$  до  $\varphi = \pi$ .

После соответствующих преобразований радиус кулачка, который описывает его профиль, связывается с угловой координатой следующими выражениями:

$$\rho = \frac{b}{2} + 252\Delta x \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} + 216 \frac{\varphi^2}{\pi^2} - 54 \frac{\varphi}{\pi} + 5 \right) \times \frac{\varphi^4}{\pi^4} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (31)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{9}\Delta x \left[ 1 + \frac{21}{2} \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} \right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (32)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6}\Delta x \left[ \frac{466560}{7} \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^7 \frac{1}{\pi^7} - 31104 \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \frac{1}{\pi^6} + 3888 \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \frac{1}{\pi^5} - \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} + \frac{2}{21} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (33)$$

Аналогично определяется профиль кулачка на участке его поворота от  $\pi$  до  $2\pi$ , который описывается радиусом, изменяющимся по зависимостям:

$$\rho = \frac{b}{2} - 252\Delta x \left( -\frac{2160}{7} \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} + 216 \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - 54 \frac{(\varphi - \pi)}{\pi} + 5 \right) \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (34)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{1}{9}\Delta x \left[ 1 + \frac{21}{2} \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (35)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{7}{6} \Delta x \left[ \frac{466560 \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7 \frac{1}{\pi^7} - 31104 \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \frac{1}{\pi^6} + 3888 \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \frac{1}{\pi^5} - \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} + \frac{2}{21} \right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (36)$$

Для предотвращения ударов кулачка о толкатели при изменении направления движения тележки описанный уравнениями (31)–(36) профиль кулачка (рис. 3) имеет такой вид, что в любом положении его диаметр  $d$  – величина постоянная и равна расстоянию между толкателями  $b$  ( $d = b$ ).

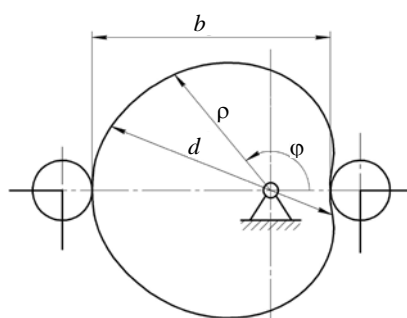


Рис. 3. Профиль кулачка, реализующий комбинированный режим движения по ускорению третьего порядка:

$b$  – расстояние между толкателями;  $d$ ,  $\rho$  – диаметр и радиус кулачка;  $\varphi$  – угловая координата поворота кулачка

Fig. 3. Cam profile realizing combined motion mode according to acceleration of 3<sup>rd</sup> order:

$b$  – distance between pusher mechanisms;  $d$ ,  $\rho$  – diameter and radius of cam;  $\varphi$  – angular coordinate of cam turning

С целью уменьшения динамических нагрузок в элементах установки, повышения ее надежности и обеспечения комбинированного режима движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка предложена конструкция роликовой формовочной установки с кулачковым приводным механизмом (рис. 4). Приводной механизм исполнен в виде шарнирно установленных на портале кулачковых механизмов, которые контактируют с толкателями, жестко прикрепленными к формовочной тележке.

Установка состоит из смонтированной на неподвижном портале 1 формовочной тележки 2, вмещающей в себя подавальный бункер 3 и укатывающие ролики 4 и осуществляющей возвратно-поступательные движения в направляющих 5 над пустотой формы 6. Тележка приводится в движение с помощью двух приводов 7, прикрепленных к portalу в виде кулачковых механизмов, вращающихся с постоянной угло-

вой скоростью ( $\omega = \text{const}$ ), но разной по направлению, и контактирующих с двумя толкателями 8, жестко соединенными с рамой тележки. Сами же кулачки 7 приводятся во вращательное движение от двигателей 9.

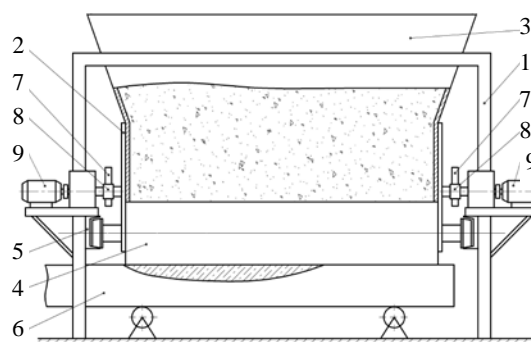


Рис. 4. Роликовая формовочная установка с кулачковым приводным механизмом

Fig. 4. Roller forming installation with cam driving mechanism

Наличие двух толкателей с каждой стороны формовочной тележки позволяет создавать жесткую силовую цепь при ее прямом и возвратном движении. При использовании в установке кулачкового приводного механизма с каждой стороны формовочной тележки предотвращается возможность ее осевого перекашивания, что повышает качество обрабатываемой бетонной смеси, уменьшает динамические нагрузки в элементах привода и лишние разрушительные нагрузки на рамную конструкцию и соответственно увеличивает долговечность установки в целом.

## ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований с целью повышения надежности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка.

2. Разработана конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения комбинированного режима возвратно-поступательно-



го движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка.

3. Результаты работы могут быть использованы для уточнения и усовершенствования существующих инженерных методов расчета приводных механизмов машин роликового формования как на стадиях проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

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 / В. Н. Кузин. М., 1981. 20 с.
3. Рюшин, В. Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей / В. Т. Рюшин. Киев, 1986. 219 с.
4. Ловейкін, В. С. Аналіз нерівномірності руху роликової формовочної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Підйомно-транспортна техніка. 2005. Вип. 4. С. 19–33.
5. 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: український міжвідомчий науково-технічний збірник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2007. Вип. 41. С. 127–134.
6. Ловейкін, В. С. Оптимізація конструктивних параметрів приводного механізму роликової формувальної установки з енергетично зрівноваженим приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // MOTROL. Motorization and Power Industry in Agriculture, Lublin. 2010. Vol. 12B. P. 9–18.
7. Гарнец, В. Н. Оценка эффективности конструкций машин роликового формования / В. Н. Гарнец, В. С. Ловейкін // Горные, строительные и дорожные машины: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Киев: Техніка, 1988. Вип. 41. С. 51–55.
8. Ловейкін, В. С. Динамічний аналіз роликової формовочної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: пр. І-ї Міжнар. наук.-техніч. конф. (DSR AM-I). Тернопіль, 2004. С. 507–514.
9. Ловейкін, В. С. Силовий аналіз роликової формовочної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Техніка будівництва. 2003. № 14. С. 27–37.
10. Ловейкін, В. С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Вісник Харківського націон. ун-ту сільс. господ. імя П. Василенка. 2007. Т. 1, № 59. С. 465–474.
11. Ловейкин, В. С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В. С. Ловейкин. Киев: УМК ВО, 1990. 168 с.

Поступила 14.09.2016  
 Подписана в печать 22.11.2016  
 Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Garnets V. N. (1991) *Advanced Concrete-Molding Assembly Unit and Complexes*. Kiev, Budivel'nik Publ. 144 (in Ukrainian).
2. Kuzin V. N. (1981) *Technology for Rolling Molding of Flat Products Made of Fine Grained Concrete*. Moscow. 20 (in Russian).
3. Riushin V. T. (1986) *Investigation of Operating Process and Development of Calculation Methodology for Concrete Mix Rolling Moulding Machines*. Kiev, 1986. 219 (in Russian).
4. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2005) Analysis of Non-uniform Motion of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Pidiomno-Transportna Tekhnika* [Hoisting and Transportation Equipment], (4), 19–33 (in Ukrainian).
5. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2007) Determination of Optimum Offset Angle Value for Cranks of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Avtomatizatsiya Virobnichikh Protsesiv u Mashinobuduvanni ta Priladobuduvanni: Ukrain'skii Mizhvidomchii Naukovo-Tekhnichnii Zbirnik* [Automation of Industrial Processes in Mechanical and Instrument Engineering. Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection]. Lviv, Publishing House Lviv Polytechnic National University, (41), 127–134 (in Ukrainian).
6. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2010) Optimization of Constructive Parameters for Driving Mechanism in Rolling Molding Assembly Unit with Energetically-Balanced Drive. *MOTROL. Motorization and Power Industry in Agriculture*. Lublin, 12B, 9–18 (in Ukrainian).
7. Garnets V. N., Loveykin V. S. (1988) Evaluation of Design Efficiency for Rolling Molding Machines. *Gornye, Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny: Resp. Mezhev. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Mining, Construction and Road-Building Machinery: Republican Inter-Ministerial Scientific and Technical Collected Volume], (41), 51–55 (in Ukrainian).
8. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2004) Dynamic Analysis of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Dinamika, Mitsnist' i Nadiinist' Sil'skogospodars'kikh Mashin: Pr. I-i Mizhnar. Nauk.-Tekhnich. Konf. (DSR AM-I)* [Dynamics, Capacity and Reliability of Agricultural Machines: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Scientific and Technical Conference (DSR AM-I)]. Ternopil, 507–514 (in Ukrainian).
9. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2003) Force Analysis of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Tekhnika Budivnitsva* [Construction Equipment], (14), 27–37 (in Ukrainian).
10. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2007) Results of Experimental Investigations on Motion Modes of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Visnik Kharkivskogo Natsionalnogo Universitetu Silskogo Gospodarstva imia P. Vasilenka* [Bulletin of Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture], 1 (59), 465–474 (in Ukrainian).
11. Loveykin V. S. (1990) *Calculation for Optimum Modes of Mechanism Motion in Building Machines*. Kiev: Publishing House "UMK VO". 168 (in Russian).

Received: 14.09.2016  
 Accepted: 22.11.2016  
 Published online: 30.05.2017