

УДК 693.546

В. С. ЛОВЕЙКИН¹, К. И. ПОЧКА²

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

²Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РЕВЕРСИРОВАНИЯ РОЛИКОВОЙ ФОРМОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ ПО УСКОРЕНИЮ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

С целью повышения надёжности и долговечности роликовой формовочной установки выполнен расчет комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвёртого порядка. Определены кинематические характеристики формовочной тележки при реверсировании с оптимальными значениями граничных условий. Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения реверсирования формовочной тележки по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных условий. Также предложена конструкция роликовой формовочной установки с приводом от высокомоментного шагового двигателя, который вмонтирован в укатывающие ролики формовочной тележки.

Ключевые слова: роликовая формовочная установка, пуско-тормозные режимы движения, ускорение четвертого порядка, оптимизация движения.

Постановка проблемы. В существующих установках поверхностного уплотнения железобетонных изделий используется кривошипно-ползунный или гидравлический привод возвратно-поступательного движения формовочной тележки с уплотняющими роликами [1–3]. При пуско-тормозных режимах движения в элементах приводного механизма и корпуса тележки возникают значительные динамические нагрузки, 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]. Вместе с тем недостаточно внимания уделено действующим динамическим нагрузкам и режимам движения [4–6], которые в значительной мере влияют на работу установки и на качество готовой продукции. При пуско-тормозных режимах движения реализуются значительные динамические нагрузки в элементах приводного механизма и формующей тележки, что может привести к преждевременному выходу машины из строя [1–6]. В работе [7] осуществлена оптимизация динамического режима реверсирования роликовой формовочной установки, однако при рассмотренном режиме в крайних положениях тележки ее уско-

рение и ускорение второго порядка (рывок) имеют большие значения. При оптимизации рывкового режима реверсирования установки [8] ускорение тележки в крайних положениях изменяется плавно, однако рывок изменяется резко и имеет достаточно большое значение. Оптимизация по ускорению третьего порядка [9] приводит к тому, что в крайних положениях тележки ускорение и рывок изменяются плавно, однако ускорение третьего порядка при этом имеет достаточно большое значение и изменяется резко от нуля до своего максимального значения. Поэтому задача усовершенствования приводного механизма роликовой формовочной установки с целью обеспечения такого режима движения формовочной тележки, при котором уменьшались бы динамические нагрузки в элементах установки и повышалась её долговечность, является актуальной.

Цель работы состоит в усовершенствовании конструкции приводного механизма роликовой формовочной установки для повышения её надёжности и долговечности.

Результаты исследований. При уплотнении бетонной смеси для роликовой формовочной установки желательно обеспечить постоянную скорость движения формовочной тележки на всём участке, что позитивно влияло бы на качество готового изделия. Однако на практике такое движение осуществить невозможно, поскольку в нём отсутствуют участки пуска и торможения, без которых не может быть циклического движения. Поэтому предлагается реализовать такой режим движения формовочной тележки при её перемещении от одного крайнего положения к другому, при котором были бы участки движения с постоянной скоростью и реверсирования с минимальными динамическими нагрузками.

Для плавного процесса реверсирования формовочной тележки предложено осуществлять оптимизацию ее движения по ускорению четвёртого порядка [10]. При этом скорость, ускорение, рывок и ускорение третьего порядка изменяются плавно, не создавая значительных динамических нагрузок в установке, что, в свою очередь, позитивно влияет на её долговечность.

Критериями оптимизации режима движения механизмов и машин могут быть коэффициенты неравномерности движения и динамичности [10]. В данной работе в качестве такого критерия использовано критериальное действие, представляющее собой интеграл по времени от функции, которая выражает меру движения либо действие системы. Для оптимального режима реверсирования по ускорению четвёртого порядка критерий оптимальности движения будет иметь вид:

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

где t – время; t_p – продолжительность реверсирования; Q – энергия ускорений четвёртого порядка:

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

m – масса формовочной тележки; x^{\vee} – ускорение четвёртого порядка.

Условие выполнения критерия (1) определяется уравнением Пуассона:

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

где x , \dot{x} , \ddot{x} , $\ddot{\ddot{x}}$, x^{IV} – координата, скорость, ускорение, ускорение второго и третьего порядков тележки соответственно.

Из выражений (2) и (3) следует:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \ddot{\ddot{x}}} = \frac{\partial Q}{\partial x^{\text{IV}}} = 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial x^{\vee}} = mx^{\vee}; \quad \frac{d^5}{dt^5} \frac{\partial Q}{\partial x^{\vee}} = mx^{\text{X}} = 0. \quad (4)$$

Интегрируя последнее уравнение (4), получаем общее решение:

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

где $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}$ – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий.

Разделим процесс реверсирования на два этапа: торможение и пуск.

Началу торможения соответствуют условия: $t = 0$, $x = -x_1$; $\dot{x} = \dot{x}_y$; $\ddot{x} = 0$; $\ddot{\ddot{x}} = 0$; $x^{\text{IV}} = 0$. В конце торможения имеем: $t = t_r$, $x = 0$; $\dot{x} = 0$; $\ddot{x} = 0$; $\ddot{\ddot{x}} = 0$; $x^{\text{IV}} = c$. Здесь x_1 – координата начала процесса торможения; \dot{x}_y – скорость движения тележки при установившемся режиме; c – ускорение третьего порядка в конце этапа торможения.

В начале пуска $t=0$, $x=0$; $\dot{x}=0$; $\ddot{x}=0$; $\ddot{\ddot{x}}=0$; $x^{IV}=c$. В момент его окончания: $t=t_n$, $x=-x_1$; $\dot{x}=-\dot{x}_y$; $\ddot{x}=0$; $\ddot{\ddot{x}}=0$; $x^{IV}=0$.

Рассмотрим процесс торможения. Подставив в уравнения (5) значения времени и координат граничных условий торможения, получаем:

$$C_{10} = -x_1; \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_8 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_6 = 0; \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{C_1 t_T^9}{362880} + \frac{C_2 t_T^8}{40320} + \frac{C_3 t_T^7}{5040} + \frac{C_4 t_T^6}{720} + \frac{C_5 t_T^5}{120} + \dot{x}_y t_T - x_1 = 0; \\ \frac{C_1 t_T^8}{40320} + \frac{C_2 t_T^7}{5040} + \frac{C_3 t_T^6}{720} + \frac{C_4 t_T^5}{120} + \frac{C_5 t_T^4}{24} + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{C_1 t_T^7}{5040} + \frac{C_2 t_T^6}{720} + \frac{C_3 t_T^5}{120} + \frac{C_4 t_T^4}{24} + \frac{C_5 t_T^3}{6} = 0; \\ \frac{C_1 t_T^6}{720} + \frac{C_2 t_T^5}{120} + \frac{C_3 t_T^4}{24} + \frac{C_4 t_T^3}{6} + \frac{C_5 t_T^2}{2} = 0; \\ \frac{C_1 t_T^5}{120} + \frac{C_2 t_T^4}{24} + \frac{C_3 t_T^3}{6} + \frac{C_4 t_T^2}{2} + C_5 t_T = c. \end{array} \right. \quad (7)$$

Решив систему уравнений (7), находим постоянные интегрирования C_1 , C_2 , C_3 , C_4 и C_5 :

$$\begin{aligned} C_1 &= 15120 \left(\frac{c}{t_T^5} - 840 \frac{\dot{x}_y}{t_T^8} + 1680 \frac{x_1}{t_T^9} \right); \quad C_2 = 6720 \left(-\frac{c}{t_T^4} + 960 \frac{\dot{x}_y}{t_T^7} - 1890 \frac{x_1}{t_T^8} \right); \\ C_3 &= 1260 \left(\frac{c}{t_T^3} - 1120 \frac{\dot{x}_y}{t_T^6} + 2160 \frac{x_1}{t_T^7} \right); \quad C_4 = 120 \left(-\frac{c}{t_T^2} + 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_T^5} - 2520 \frac{x_1}{t_T^6} \right); \\ C_5 &= 5 \left(\frac{c}{t_T} - 1680 \frac{\dot{x}_y}{t_T^4} + 3024 \frac{x_1}{t_T^5} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя выражения (6) и (8) в систему уравнений (5), получаем функцию изменения ускорения четвертого порядка формовочной тележки в процессе торможения от установившейся скорости \dot{x}_y до полной остановки:

$$\begin{aligned} x^V &= 630 \left(c - 840 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 1680 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^4}{t_T^5} + 1120 \left(-c + 960 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} - 1890 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^3}{t_T^4} + \\ &+ 630 \left(c - 1120 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 2160 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^2}{t_T^3} + 120 \left(-c + 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} - 2520 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t}{t_T^2} + \\ &+ 5 \left(c - 1680 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 3024 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{1}{t_T} \end{aligned} \quad (9)$$

или

$$\begin{aligned}
 x^v = \frac{5}{t_T} \left[126 \left(c - 840 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 1680 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^4}{t_T^4} + 224 \left(-c + 960 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} - 1890 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^3}{t_T^3} + \right. \\
 \left. + 126 \left(c - 1120 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 2160 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^2}{t_T^2} + 24 \left(-c + 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} - 2520 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t}{t_T} + \right. \\
 \left. + \left(c - 1680 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 3024 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \right]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Следовательно, подстановка (10) в выражение критерия оптимальности движения (2) для этапа торможения дает:

$$\begin{aligned}
 I_{Q_T} = \frac{m}{2} \int_0^{t_T} (x^v)^2 dt = \frac{25m}{2t_T^2} \int_0^{t_T} \left[126 \left(c - 840 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 1680 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^4}{t_T^4} + \right. \\
 \left. + 224 \left(-c + 960 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} - 1890 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^3}{t_T^3} + 126 \left(c - 1120 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 2160 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t^2}{t_T^2} + \right. \\
 \left. + 24 \left(-c + 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} - 2520 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \frac{t}{t_T} + \left(c - 1680 \frac{\dot{x}_y}{t_T^3} + 3024 \frac{x_1}{t_T^4} \right) \right]^2 dt = \\
 = \frac{25m}{2t_T} \left(c^2 - \frac{2688}{5} \frac{c\dot{x}_y}{t_T^3} + \frac{6048}{5} \frac{cx_1}{t_T^4} + 258048 \frac{\dot{x}_y^2}{t_T^6} - 1016064 \frac{x_1\dot{x}_y}{t_T^7} + 1016064 \frac{x_1^2}{t_T^8} \right). \quad (11)
 \end{aligned}$$

Аналогично рассмотрим процесс пуска. Подставляя граничные условия в уравнения (5), получаем:

$$\begin{aligned}
 C_6 = c; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad C_9 = 0; \quad C_{10} = 0; \quad (12) \\
 \left\{ \begin{aligned}
 \frac{C_1 t_n^9}{362880} + \frac{C_2 t_n^8}{40320} + \frac{C_3 t_n^7}{5040} + \frac{C_4 t_n^6}{720} + \frac{C_5 t_n^5}{120} + \frac{c t_n^4}{24} &= -x_1; \\
 \frac{C_1 t_n^8}{40320} + \frac{C_2 t_n^7}{5040} + \frac{C_3 t_n^6}{720} + \frac{C_4 t_n^5}{120} + \frac{C_5 t_n^4}{24} + \frac{c t_n^3}{6} &= -\dot{x}_y; \\
 \frac{C_1 t_n^7}{5040} + \frac{C_2 t_n^6}{720} + \frac{C_3 t_n^5}{120} + \frac{C_4 t_n^4}{24} + \frac{C_5 t_n^3}{6} + \frac{c t_n^2}{2} &= 0; \\
 \frac{C_1 t_n^6}{720} + \frac{C_2 t_n^5}{120} + \frac{C_3 t_n^4}{24} + \frac{C_4 t_n^3}{6} + \frac{C_5 t_n^2}{2} + c t_n &= 0; \\
 \frac{C_1 t_n^5}{120} + \frac{C_2 t_n^4}{24} + \frac{C_3 t_n^3}{6} + \frac{C_4 t_n^2}{2} + C_5 t_n + c &= 0.
 \end{aligned} \right. \quad (13)
 \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (13), имеем:

$$C_1 = 15120 \left(-\frac{c}{t_n^5} + 840 \frac{\dot{x}_y}{t_n^8} - 1680 \frac{x_1}{t_n^9} \right); \quad C_2 = 8400 \left(\frac{c}{t_n^4} - 744 \frac{\dot{x}_y}{t_n^7} + 1512 \frac{x_1}{t_n^8} \right);$$

$$C_3 = 2100 \left(-\frac{c}{t_n^3} + 624 \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} - 1296 \frac{x_1}{t_n^7} \right); \quad C_4 = 60 \left(5 \frac{c}{t_n^2} - 2352 \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} + 5040 \frac{x_1}{t_n^6} \right); \quad (14)$$

$$C_5 = 5 \left(-5 \frac{c}{t_n} + 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} - 3024 \frac{x_1}{t_n^5} \right).$$

Подставляя выражения (12) и (14) в (5), получаем функцию изменения ускорения четвёртого порядка формовочной тележки в процессе пуска от состояния покоя до выхода на установившийся режим движения:

$$x^v = 630 \left(-c + 840 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 1680 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t^4}{t_n^5} + 1400 \left(c - 744 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 1512 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t^3}{t_n^4} +$$

$$+ 1050 \left(-c + 624 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 1296 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t^2}{t_n^3} + 60 \left(5c - 2352 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 5040 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t}{t_n^2} + \quad (15)$$

$$+ 5 \left(-5c + 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 3024 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{1}{t_n}.$$

или

$$x^v = \frac{5}{t_n} \left[126 \left(-c + 840 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 1680 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t^4}{t_n^4} + 280 \left(c - 744 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 1512 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t^3}{t_n^3} + \right.$$

$$+ 210 \left(-c + 624 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 1296 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t^2}{t_n^2} + 12 \left(5c - 2352 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} + 5040 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \frac{t}{t_n} + \quad (16)$$

$$\left. + \left(-5c + 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_n^3} - 3024 \frac{x_1}{t_n^4} \right) \right].$$

После этого подставляем (16) в выражение критерия оптимальности (2) и для процесса пуска находим

$$I_{Q_n} = \frac{m}{2} \int_0^{t_n} (x^2)^v dt = \frac{25m}{2t_n} \left(c^2 - \frac{2688}{5} \frac{c\dot{x}_y}{t_n^3} + \frac{6048}{5} \frac{cx_1}{t_n^4} + \right.$$

$$\left. + 258048 \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^6} - 1016064 \frac{x_1\dot{x}_y}{t_n^7} + 1016064 \frac{x_1^2}{t_n^8} \right). \quad (17)$$

Таким образом, критерий оптимальности движения в процессе реверсирования с учётом выражений (11) и (17) будет иметь вид

$$\begin{aligned}
I_Q = I_{Q_T} + I_{Q_n} = & \frac{25m}{2t_T} \left(c^2 - \frac{2688}{5} \frac{c\dot{x}_y}{t_T^3} + \frac{6048}{5} \frac{cx_1}{t_T^4} + 258048 \frac{\dot{x}_y^2}{t_T^6} - \right. \\
& \left. - 1016064 \frac{x_1\dot{x}_y}{t_T^7} + 1016064 \frac{x_1^2}{t_T^8} \right) + \frac{25m}{2t_n} \left(c^2 - \frac{2688}{5} \frac{c\dot{x}_y}{t_n^3} + \right. \\
& \left. + \frac{6048}{5} \frac{cx_1}{t_n^4} + 258048 \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^6} - 1016064 \frac{x_1\dot{x}_y}{t_n^7} + 1016064 \frac{x_1^2}{t_n^8} \right) \rightarrow \min. \quad (18)
\end{aligned}$$

Принимая одинаковыми продолжительности торможения тележки и её пуска $t_T = t_n = t_1$, получаем

$$I_Q = \frac{25m}{t_1} \left(c^2 - \frac{2688}{5} \frac{c\dot{x}_y}{t_1^3} + \frac{6048}{5} \frac{cx_1}{t_1^4} + 258048 \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^6} - 1016064 \frac{x_1\dot{x}_y}{t_1^7} + 1016064 \frac{x_1^2}{t_1^8} \right). \quad (19)$$

Условие (18) выполняется, если равны нулю частные производные

$$\begin{cases} \frac{\partial I_Q}{\partial x_1} = \frac{30240m}{t_1^5} \left(c - 840 \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 1680 \frac{x_1}{t_1^4} \right) = 0; \\ \frac{\partial I_Q}{\partial c} = \frac{10m}{t_1} \left(5c - 1344 \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 3024 \frac{x_1}{t_1^4} \right) = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Решая систему линейных уравнений (20), получаем

$$x_1 = \frac{17}{32} \dot{x}_y t_1; \quad c = -\frac{105}{2} \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}. \quad (21)$$

Подставляя (21) в формулы (6) и (8), определяем постоянные интегрирования, соответствующие торможению формовочной тележки:

$$\begin{aligned}
C_1 = 0; \quad C_2 = 56700 \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = -31500 \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 6930 \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = -630 \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \\
C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_{10} = -\frac{17}{32} \dot{x}_y t_1. \quad (22)
\end{aligned}$$

Таким образом, закон изменения перемещения формовочной тележки в процессе торможения принимает вид:

$$x = \frac{\dot{x}_y}{32} \left(\frac{45t^8}{t_1^7} - \frac{200t^7}{t_1^6} + \frac{308t^6}{t_1^5} - \frac{168t^5}{t_1^4} + 32t - 17t_1 \right). \quad (23)$$

Подставив (21) в формулы (12) и (14), найдем постоянные интегрирования для процесса пуска формовочной тележки:

$$C_1 = 0; C_2 = 56700 \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; C_3 = -25200 \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; C_4 = 3780 \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; C_5 = 0;$$

$$C_6 = -\frac{105}{2} \frac{\dot{x}_y}{t_1^3}; C_7 = 0; C_8 = 0; C_9 = 0; C_{10} = 0. \quad (24)$$

Тогда функция, характеризующая изменение перемещения формовочной тележки в процессе пуска,

$$x = \frac{\dot{x}_y}{32} \left(\frac{45t^8}{t_1^7} - \frac{160t^7}{t_1^6} + \frac{168t^6}{t_1^5} - \frac{70t^4}{t_1^3} \right). \quad (25)$$

При установившемся режиме движения координата, скорость, ускорения первого, второго, третьего и четвертого порядков центра масс формовочной тележки имеют вид [10]:

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

$$\ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_y = 0; \quad x_y^{\text{IV}} = 0; \quad x_y^{\text{V}} = 0,$$

$$(26)$$

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

В выражениях (26) координату начального положения центра масс тележки при установившемся движении x_{0y} принимаем равной x_1 . Тогда, принимая, что перемещение тележки из одного крайнего положения в другое составляет величину Δx , конечная координата той же точки $x_{1y} = \Delta x - x_1$.

Подставляя выражения x_{0y} и x_{1y} в (26), с учетом (21) получаем скорость установившегося движения тележки:

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \frac{17}{16} \dot{x}_y t_1}{t_y} \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + \frac{17}{16} t_1}. \quad (27)$$

Общее время движения формовочной тележки от одного крайнего положения в другое t_0 включает три части: время пуска – t_n , установившегося движения – t_y и торможения – t_r . Чтобы обеспечить уплотнение бетонной смеси с постоянной скоростью движения на большей части рабочего хода, примем время установившегося движения, например, $t_y = 2t_0/3$. Тогда, полагая одинаковыми время пуска и торможения, получаем $t_n = t_r = t_1 = t_0/6$. В таком случае скорость установившегося движения и координата x_1

$$\dot{x}_y = \frac{32\Delta x}{27t_0}; \quad x_1 = \frac{17}{162} \Delta x. \quad (28)$$

Таким образом, подстановка выражений (28) в (23), (25) и (26), приводит к следующим зависимостям координаты центра масс формовочной тележки от времени:

– на участке пуска

$$x = -16\Delta x \left(29160 \frac{t^4}{t_0^4} - 17280 \frac{t^3}{t_0^3} + 3024 \frac{t^2}{t_0^2} - 35 \right) \frac{t^4}{t_0^4}; \quad (29)$$

– при установившемся движении

$$x = \frac{1}{162} \Delta x \left(17 + 192 \frac{t}{t_0} \right); \quad (30)$$

– на участке торможения

$$x = \Delta x + \frac{\Delta x}{27} \left(\frac{12597120t^8}{t_0^8} - \frac{9331200t^7}{t_0^7} + \frac{2395008t^6}{t_0^6} - \frac{217728t^5}{t_0^5} + \frac{32t}{t_0} - \frac{17}{6} \right). \quad (31)$$

Графики изменения перемещения, скорости, ускорений разных порядков, рассчитанные для случая амплитуды перемещения формовочной тележки $\Delta x = 0,4$ м и продолжительности ее движения из одного крайнего положения в другое $t_0 = 3$ с в соответствии с уравнениями (29)–(31), представлены на рисунке 1.

Для случая, при котором начало координат отсчитывается от среднего положения перемещения формовочной тележки, выражения (29)–(31) преобразуются к виду:

– на участке пуска

$$x = -16\Delta x \left(\frac{29160t^4}{t_0^4} - \frac{17280t^3}{t_0^3} + \frac{3024t^2}{t_0^2} - 35 \right) \frac{t^4}{t_0^4} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (32)$$

– на участке установившегося движения

$$x = \frac{32}{81} \Delta x \left(3 \frac{t}{t_0} - 1 \right); \quad (33)$$

– на участке торможения

$$x = \frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta x}{27} \left(\frac{12597120t^8}{t_0^8} - \frac{9331200t^7}{t_0^7} + \frac{2395008t^6}{t_0^6} - \frac{217728t^5}{t_0^5} + \frac{32t}{t_0} - \frac{17}{6} \right). \quad (34)$$

Закон движения тележки, описанный уравнениями (32)–(34), может быть осуществлён приводом с кулачковым механизмом (рисунок 2) возвратно-поступательного движения тележки. При этом движение тележки в одном направлении осуществляется за счёт поворота кулачка l на половину оборота (то есть $\varphi = \pi$) и ещё на половину оборота – в обратном направлении; полный цикл движения тележки – за один оборот кулачка.

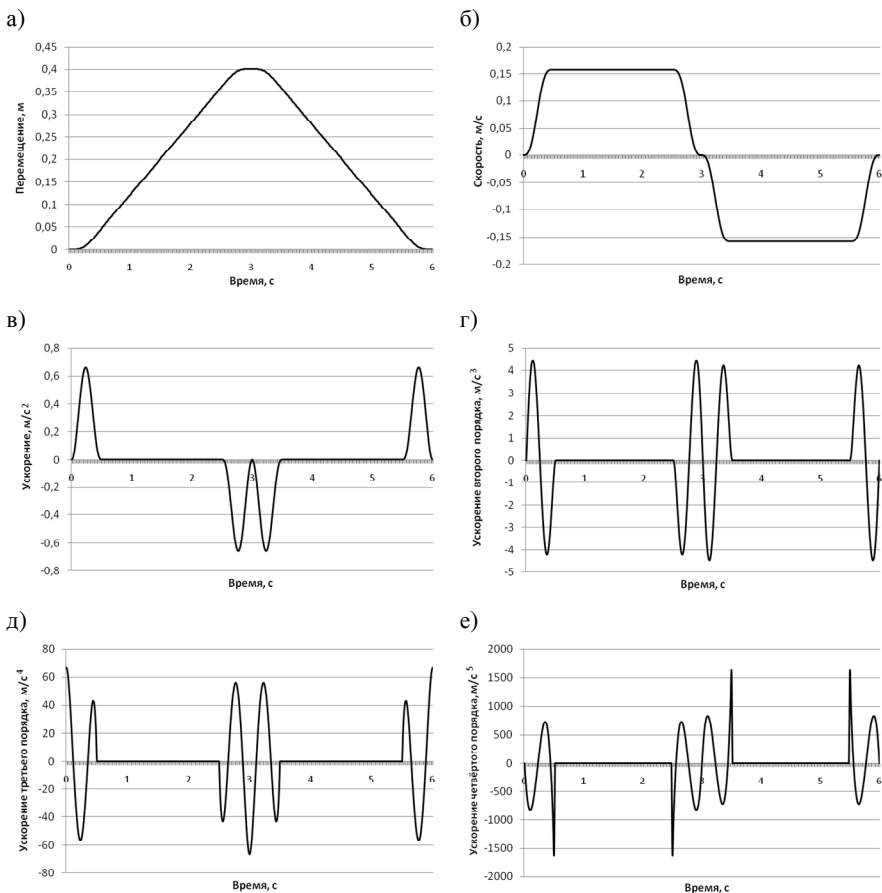


Рисунок 1 – Графики изменения: перемещения (а), скорости (б), ускорения (в), ускорения второго порядка (г), ускорения третьего порядка (д) и ускорения четвертого порядка (е) при движении формовочной тележки с режимом реверсирования по ускорению четвертого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений третьего порядка

Для осуществления полученного закона движения необходимо, чтобы приращение радиуса кулачка соответствовало перемещению тележки. В таком случае переменный радиус кулачка определяется зависимостями:

– на участке пуска

$$\rho = \frac{b}{2} - 16\Delta x \left(\frac{29160t^4}{t_0^4} - \frac{17280t^3}{t_0^3} + \frac{3024t^2}{t_0^2} - 35 \right) \frac{t^4}{t_0^4} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (35)$$

– на участке установившегося движения

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{32}{81} \Delta x \left(3 \frac{t}{t_0} - 1 \right); \quad (36)$$

– на участке торможения

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} + \frac{1}{27} \Delta x \left(\frac{12597120 t^8}{t_0^8} - \frac{9331200 t^7}{t_0^7} + \frac{2395008 t^6}{t_0^6} - \frac{217728 t^5}{t_0^5} + \frac{32 t}{t_0} - \frac{17}{6} \right); \quad (37)$$

где b – расстояние между толкателями 2 (рисунок 2).

Время t можно исключить из зависимостей (35)–(37), так как $t = \varphi/\omega$, а $t_1 = \pi/\omega$. Здесь φ – угловая координата поворота кулачка; ω – угловая скорость кулачка. Поскольку время пуска формовочной тележки определяется зависимостью $t_{\text{п}} = t_0/6$, то процесс пуска будет осуществляться поворотом кулачка на угол в пределах от $\varphi = 0$ до $\varphi = \pi/6$; время установившегося движения – $t_y = 2t_0/3$, оно будет обеспечиваться поворотом кулачка на угол в пределах от $\varphi = \pi/6$ до $\varphi = 5\pi/6$; время торможения – $t_t = t_0/6$ будет осуществляться поворотом кулачка на угол в пределах от $\varphi = 5\pi/6$ до $\varphi = \pi$. Соответственно радиус кулачка, который описывает его профиль, связывается с угловой координатой следующими выражениями:

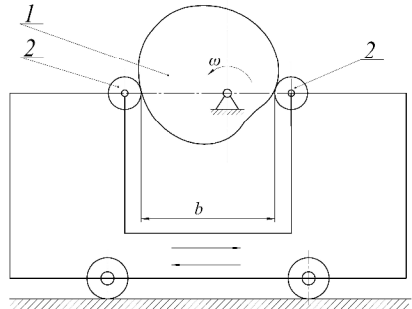


Рисунок 2 – Схема механизма с кулачковым приводом возвратно-поступательного движения тележки

$$\rho = \frac{b}{2} - 16 \Delta x \left(29160 \frac{\varphi^4}{\pi^4} - 17280 \frac{\varphi^3}{\pi^3} + 3024 \frac{\varphi^2}{\pi^2} - 35 \right) \frac{\varphi^4}{\pi^4} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (38)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{32}{81} \Delta x \left[3 \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} - 1 \right], \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (39)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta x}{27} \left(\frac{12597120}{\pi^8} \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^8 - \frac{9331200}{\pi^7} \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^7 + \frac{2395008}{\pi^6} \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 - \frac{217728}{\pi^5} \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 + \frac{32}{\pi} \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right) - \frac{17}{6} \right), \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (40)$$

Аналогично определяется профиль кулачка на участке его поворота от π до 2π , который описывается радиусом, изменяющимся следующим образом:

$$\rho = \frac{b}{2} + 16\Delta x \left(29160 \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} - 17280 \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} + 3024 \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - 35 \right) \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (41)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{32}{81} \Delta x \left(3 \left(\varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} - 1 \right), \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (42)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} - \frac{1}{27} \Delta x \left(\frac{12597120}{\pi^8} \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^8 - \frac{9331200}{\pi^7} \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7 + \frac{2395008}{\pi^6} \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 - \frac{217728}{\pi^5} \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 + \frac{32}{\pi} \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right) - \frac{17}{6} \right), \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (43)$$

Для предотвращения ударов кулачка о толкатели при изменении направления движения тележки профиль кулачка (рисунок 3) должен иметь такой вид, чтобы в любом положении его диаметр d был величиной постоянной и равной расстоянию между толкателями ($d = b$).

С целью уменьшения динамических нагрузок и для повышения надёжности предложена конструкция машины с приводным механизмом, предназначенным для обеспечения возвратно-поступательного движения формовочной тележки и обеспечивающим режим реверсирования по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных условий (рисунок 4). Ее параметры подбирались на основе представленных выше теоретических расчетов.

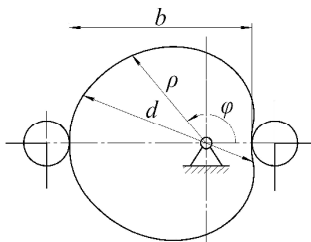


Рисунок 3 – Профиль кулачка, реализующий режим реверсирования по ускорению четвёртого порядка

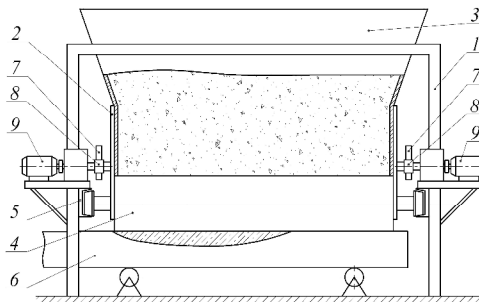


Рисунок 4 – Роликовая формовочная установка с кулачковым приводным механизмом

Разработанная установка включает смонтированную на неподвижном портале 1 формовочную тележку 2, которая содержит в себе подающий бункер 3 и укатывающие ролики 4 и осуществляет возвратно-поступательные движение в направляющих 5 над пустотой формы 6. Тележка приводится в движение с помощью двух приводов 7, прикреплённых к portalу 1 в виде кулачковых механизмов, вращающихся с постоянной угловой скоростью ($\omega = \text{const}$), но разной по направлению, и контактирующих с двумя толкателями 8, жёстко соединёнными с рамой тележки 2. Наличие двух толкателей 8 с каждой стороны формовочной тележки 2 позволяет создавать жёсткую силовую цепь при её прямом и обратном движении.

При использовании в установке кулачкового приводного механизма с каждой стороны формовочной тележки предотвращается возможность её осевого перекашивания, повышается качество обрабатываемой бетонной смеси. Также уменьшаются динамические нагрузки в элементах привода, что ведет к снижению нагрузок на рамную конструкцию и, соответственно, повышению долговечности установки в целом.

Наряду с кулачковым механизмом закон движения тележки, описанный приведенными выше уравнениями, также может быть реализован приводом от высокомоментного шагового двигателя, который вмонтирован в укатывающие ролики формовочной тележки. При этом закон изменения угловой скорости приводного шагового двигателя, исходя из выражений (29)–(31), описывается уравнениями:

– на участке пуска

$$\dot{\varphi}_n = -\frac{64\Delta x}{R} \left(58320 \frac{t^4}{t_0^4} - 30240 \frac{t^3}{t_0^3} + 4536 \frac{t^2}{t_0^2} - 35 \right) \frac{t^3}{t_0^4}; \quad (44)$$

– на участке установившегося движения

$$\dot{\varphi}_y = \frac{32\Delta x}{27t_0 R}; \quad (45)$$

– на участке торможения

$$\dot{\varphi}_T = \frac{32\Delta x}{27R} \left(3149280 \frac{t^7}{t_0^8} - 2041200 \frac{t^6}{t_0^7} + 449064 \frac{t^5}{t_0^6} - 34020 \frac{t^4}{t_0^5} + \frac{1}{t_0} \right), \quad (46)$$

где R – радиус укатывающих роликов.

Приняв время пуска формовочной тележки $t_n = t_0/6$, время установившегося движения – $t_y = 2t_0/3$ и время торможения – $t_T = t_0/6$, получаем закон изменения угловой скорости приводного шагового двигателя при движении формовочной тележки от одного крайнего положения к другому:

$$\dot{\varphi} = -\frac{64\Delta x}{R} \left(58320 \frac{t^4}{t_0^4} - 30240 \frac{t^3}{t_0^3} + 4536 \frac{t^2}{t_0^2} - 35 \right) \frac{t^3}{t_0^4}, \quad 0 \leq t \leq \frac{t_0}{6}; \quad (47)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{32\Delta x}{27t_0R}, \quad \frac{t_0}{6} < t < \frac{5t_0}{6}; \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{32\Delta x}{27R} \left(3149280 \left(t - \frac{5t_0}{6} \right)^7 \frac{1}{t_0^8} - 2041200 \left(t - \frac{5t_0}{6} \right)^6 \frac{1}{t_0^7} + \right. \\ & \left. + 449064 \left(t - \frac{5t_0}{6} \right)^5 \frac{1}{t_0^6} - 34020 \left(t - \frac{5t_0}{6} \right)^4 \frac{1}{t_0^5} + \frac{1}{t_0} \right), \quad \frac{5t_0}{6} < t \leq t_0. \end{aligned} \quad (49)$$

Аналогично определяется закон изменения угловой скорости приводного шагового двигателя при движении формовочной тележки в обратном направлении:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} = & \frac{64\Delta x}{R} \left(58320 \frac{(t-t_0)^4}{t_0^4} - 30240 \frac{(t-t_0)^3}{t_0^3} + \right. \\ & \left. + 4536 \frac{(t-t_0)^2}{t_0^2} - 35 \right) \frac{(t-t_0)^3}{t_0^4}, \quad t_0 \leq t \leq \frac{7t_0}{6}; \end{aligned} \quad (50)$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{32\Delta x}{27t_0R}, \quad \frac{7t_0}{6} < t < \frac{11t_0}{6}; \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \varphi = & -\frac{32\Delta x}{27R} \left(3149280 \left(t - \frac{11t_0}{6} \right)^7 \frac{1}{t_0^8} - 2041200 \left(t - \frac{11t_0}{6} \right)^6 \frac{1}{t_0^7} + \right. \\ & \left. + 449064 \left(t - \frac{11t_0}{6} \right)^5 \frac{1}{t_0^6} - 34020 \left(t - \frac{11t_0}{6} \right)^4 \frac{1}{t_0^5} + \frac{1}{t_0} \right), \quad \frac{11t_0}{6} < t \leq 2t_0. \end{aligned} \quad (52)$$

Также предложена конструкция роликовой формовочной установки с приводом от высокомоментного шагового двигателя для обеспечения возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвертого порядка с оптимальными значениями граничных условий (рисунок 5). Установка состоит с формовочной тележки 1, которая смонтирована на портале 2 и осуществляет возвратно-поступательное движение в направляющих 3 над пустотой формы 4. Формовочная тележка вмещает подающий бункер 5 и укатывающие ролики 6 на оси 7.

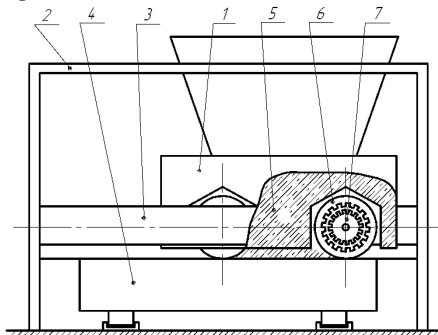


Рисунок 5 – Роликовая формовочная установка с приводом от шагового двигателя

Тележка приводится в возвратно-поступательное движение с помощью высокомоментного шагового двигателя, вмонтированного в ролики, причём ось ролика исполняет роль статора, а сам ролик – ротора [11].

Использование привода от высокомоментного шагового двигателя, закон изменения угловой скорости которого описан в представленной работе, как и в случае применения кулачкового приводного механизма, позволяет повысить качество обрабатываемой бетонной смеси, снизить динамические нагрузки на элементы привода и, соответственно, обеспечить длительную эксплуатацию машины.

Выводы. В результате проведенных исследований с целью повышения надёжности и долговечности роликовой формовочной установки разработан алгоритм расчета параметров комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием, построенный на оптимизации по ускорению четвёртого порядка. Определено оптимальное значение ускорения третьего порядка в конце этапа торможения. Рассчитаны кинематические характеристики формовочной тележки при режиме реверсирования по ускорению четвёртого порядка с учетом оптимальных значений граничных ускорений третьего порядка. Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения рассмотренного комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки. Предложена конструкция роликовой формовочной установки с приводом от высокомоментного шагового двигателя, вмонтированного в укатывающие ролики формовочной тележки.

Результаты работы могут в дальнейшем быть полезными для уточнения и усовершенствования существующих инженерных методов расчёта приводных механизмов машин роликового формования как на стадиях проектирования/конструирования, так и при режимах реальной эксплуатации. Также результаты работы могут быть полезными при проектировании или усовершенствовании иных механизмов с возвратно-поступательным движением исполнительных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. – 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, 1986. – 212 с.
- 4 **Ловейкін, В. С.** Динамічний аналіз роликової формовочної установки з рекупераційним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Динаміка, міцність і надійність

сільськогосподарських машин : пр. I 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. – 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. – 2007. – № 41. – С. 127–134.

7 **Ловейкін, В. С.** Динамічна оптимізація режиму реверсування роликів формувальної установки / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Машинобудування. – 2015. – № 15. – С. 76–86.

8 **Ловейкін, В. С.** Оптимізація ривкового режиму реверсування роликів формувальної установки / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С. 186–197.

9 **Ловейкін, В. С.** Оптимізація режиму реверсування роликів формувальної установки за прискоренням третього порядку / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2015. – № 3 (36). – С. 16–26.

10 **Ловейкін, В. С.** Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин : учеб. пособие / В. С. Ловейкін. – Киев : УМК ВО, 1990. – 168 с.

11 Установка для формирования виробів з бетонних сумішей : пат. 105744 України, В28В13/00 / В. С. Ловейкін, К. І. Почка, Ю. В. Човнюк, М. Г. Діктерук. – Бюл. № 11 від 10.06.2014 р.

V. S. LOVEIKIN¹, K. I. POCHKA²

¹National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine

²Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

DEFINITION OF BOUNDARY CONDITIONS OF OPTIMAL MODE FOR THE ROLLER FORMING FACILITY REVERSING FOR ACCELERATION OF THE FOURTH ORDER

In order to increase the reliability and durability of the roller molding machine, it was performed a calculation of the combined mode of reciprocating motion of the forming car with a fourth-order acceleration reversal. The kinematic characteristics of the forming car were determined for the case of reversal with optimal values of the boundary conditions. It was proposed the construction of the facility drive in the form of a cam mechanism, and a cam profile was constructed to ensure the reversal of the forming car by the acceleration of the fourth order with the optimal values of the boundary conditions. A design of a roller molding machine with a drive from a high torque stepper motor mounted in forming car rollers was also proposed.

Получено 24.03.2017