

УДК 693.546

## ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСКОРЕНИЙ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РЕВЕРСИРОВАНИЯ РОЛИКОВОЙ ФОРМОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ ПО УСКОРЕНИЮ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

<sup>1</sup> В. С. Ловейкин[lovvs@ukr.net](mailto:lovvs@ukr.net),

ORCID: 0000-0003-4259-3900

<sup>2</sup> К. И. Почка[shanovniy@ukr.net](mailto:shanovniy@ukr.net),

ORCID: 0000-0002-0355-002X

<sup>2</sup> Н. А. Пристайло[pristaylo\\_na@ukr.net](mailto:pristaylo_na@ukr.net),

ORCID: 0000-0003-3151-4680

<sup>2</sup> О. Б. Почка[zasedkoolga@ukr.net](mailto:zasedkoolga@ukr.net),

ORCID: 0000-0001-5701-978X

<sup>1</sup> Национальный университетбиоресурсов и природопользования  
Украины

03041, Украина, г. Киев, ул. Героев обороны, 15

<sup>2</sup> Киевский национальный университет

строительства и архитектуры

03037, Украина, г. Киев, пр. Воздухофлотский, 31

С целью повышения надежности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвертого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений. При определении комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвертого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений в качестве критерия режима движения использовано критериальное действие, которое представляет собой интеграл по времени с подынтегральной функцией, выражающей «энергию» ускорений четвертого порядка установки. Получены функции изменения кинематических характеристик формовочной тележки при ее движении от одного крайнего положения к другому, которые соответствуют комбинированному режиму возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвертого порядка при оптимальных значениях граничных ускорений. Предложено использовать в конструкции установки привод в виде кулачкового механизма. Построен профиль кулачка для обеспечения комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвертого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений. Рассмотрено применение в конструкции роликовой формовочной установки привода от высокомоментного шагового двигателя, вмонтированного в укатывающие ролики формовочной тележки. Использование в установке указанного приводного механизма приводит к уменьшению динамических нагрузок в его элементах и, соответственно, к повышению надежности и долговечности установки в целом. Результаты работы могут в дальнейшем быть полезными 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, шаговый двигатель.

### 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 пускотормозных режимов движения возникают значительные динамические нагрузки в элементах приводного механизма и формовочной тележки, которые могут привести к преждевременному выходу установки из рабочего состояния.

### Анализ последних исследований и публикаций

В существующих теоретических и экспериментальных исследованиях машин роликового формования железобетонных изделий обосновано их конструктивные параметры и продуктивность [1–4, 7–13]. Вместе с тем недостаточно внимания уделено исследованию действующих динамических нагрузок и режимов движения [5, 6, 14], что в значительной мере влияет на работу установки и качество готовой продукции.

В работе [15] осуществлено оптимизацию динамического режима реверсирования роликовой формовочной установки. Однако в таком режиме ускорение и ускорение второго порядка (рывок) тележки имеют большое значение в крайних его положениях. При оптимизации рывкового режима реверсирования установки [16] ускорение тележки в крайних положениях происходит плавно, однако рывок изменяется резко и имеет достаточно большое значение. Оптимизация режима реверсирования роликовой формовочной установки по ускорению третьего порядка [17, 18] приводит к тому, что в крайних положениях тележки ускорение и рывок происходят плавно, однако ускорение третьего порядка при этом имеет достаточно большое значение и изменяется резко от нуля до своего максимального значения. Поэтому актуальна задача усовершенствования приводного механизма роликовой формовочной установки для обеспечения такого режима движения формовочной тележки, при котором уменьшались бы динамические нагрузки в элементах установки и повышалась её долговечность.

### Цель работы

Цель данной работы – усовершенствование конструкции приводного механизма роликовой формовочной установки для повышения её надёжности и долговечности.

### Постановка задачи исследования

Для роликовой формовочной установки при уплотнении бетонной смеси желательнее иметь постоянную скорость возвратно-поступательного движения формовочной тележки на всём участке, что позитивно влияло бы на качество готового изделия. Однако на практике такой режим движения 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, в котором были бы участки реверсирования с минимальными динамическими нагрузками и участки движения с постоянной скоростью.

Для плавного процесса реверсирования формовочной тележки предложено осуществлять его по оптимальному режиму движения по ускорению четвёртого порядка.

Критериями режима движения механизмов и машин могут быть коэффициенты неравномерности движения и динамичности [19–21]. В данной работе в качестве критерия режима движения использовано критериальное действие, являющее собой интеграл по времени с подынтегральной функцией, которая выражает меру движения либо действие системы. Для оптимального режима реверсирования по ускорению четвёртого порядка критерий оптимальности движения таков:

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

где  $t$  – время;  $t_p$  – продолжительность реверсирования;  $Q$  – «энергия» ускорений четвёртого порядка

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

где  $m$  – масса формовочной тележки;  $x$  – ускорение четвёртого порядка.

В данной работе обозначение «энергии» ускорений четвёртого порядка принято как  $Q$ . Разные обозначения энергий применены, чтобы определить комплексный критерий оптимальности режима движения формовочной тележки. В ряде работ авторов «энергия» имеет обозначение:  $V$  – «энергия» ускорений [15],  $W$  – «энергия» рывков (ускорений второго порядка) [16],  $Z$  – «энергия» ускорений третьего порядка [17, 18],  $Q$  – «энергия» ускорений четвёртого порядка [19].

Условием минимума критерия (1) есть уравнение Пуассона

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

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

Из выражения (3), с учётом зависимости (2), можно записать

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

Первые пять слагаемых в уравнениях (4) принимаются равными нулю  $\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Q}{\partial \overset{IV}{x}} = 0$  на основании зависимости (2). Поскольку в выражении (2)  $\overset{V}{x}$  – ускорение четвёртого порядка, то координата перемещения  $x$ , скорость  $\dot{x}$ , ускорение  $\ddot{x}$ , ускорение второго  $\overset{IV}{x}$  и третьего порядков  $\overset{V}{x}$  тележки влияния на уравнение (2) не имеют. Поэтому частичные производные от «энергии» ускорений четвёртого порядка по указанным параметрам равны нулю. После интегрирования последнего соотношения уравнений (4) эти условия также выполняются.

Из последнего уравнения (4) получаем дифференциальное уравнение и его решения

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

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 начальных и конечных условий на каждом из этапов движения формовочной тележки.

Разделим процесс реверсирования на два этапа: торможение и пуск.

При торможении начальные условия  $t=0$ :  $x = -x_1$ ;  $\dot{x} = \dot{x}_y$ ;  $\ddot{x} = 0$ ;  $\overset{IV}{\ddot{x}} = 0$ ;  $\overset{IV}{x} = 0$ . Конечные условия при торможении  $t=t_t$ :  $x=0$ ;  $\dot{x}=0$ ;  $\ddot{x}=a$ ;  $\overset{IV}{\ddot{x}}=0$ ;  $\overset{IV}{x}=0$ . Здесь  $x_1$  – координата начала процесса торможения;  $\dot{x}_y$  – скорость движения тележки на установившемся режиме до начала торможения;  $a$  – ускорение тележки в конце этапа торможения.

При пуске начальные условия  $t=0$ :  $x=0$ ;  $\dot{x}=0$ ;  $\ddot{x}=a$ ;  $\overset{IV}{\ddot{x}}=0$ ;  $\overset{IV}{x}=0$ . Конечные условия при пуске  $t=t_n$ :  $x=-x_1$ ;  $\dot{x}=-\dot{x}_y$ ;  $\ddot{x}=0$ ;  $\overset{IV}{\ddot{x}}=0$ ;  $\overset{IV}{x}=0$ .

Рассмотрим процесс торможения. Подставив начальные и конечные условия торможения в уравнения (5), получаем

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

$$t = t_T \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{362880} \cdot C_1 \cdot t_T^9 + \frac{1}{40320} \cdot C_2 \cdot t_T^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_3 \cdot t_T^7 + \frac{1}{720} \cdot C_4 \cdot t_T^6 + \frac{1}{120} \cdot C_5 \cdot t_T^5 + \\ + \dot{x}_y \cdot t_T - x_1 = 0; \\ \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t_T^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t_T^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t_T^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t_T^5 + \frac{1}{24} \cdot C_5 \cdot t_T^4 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_T^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_T^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_T^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_T^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t_T^3 = a; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_T^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_T^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_T^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_T^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t_T^2 = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_T^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_T^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_T^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_T^2 + C_5 \cdot t_T = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решив систему уравнений (7), имеем постоянные интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  и  $C_5$

$$\begin{aligned} C_1 &= 907200 \cdot \left( 3 \cdot \frac{a}{t_T^7} - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T^8} + 28 \cdot \frac{x_1}{t_T^9} \right); & C_2 &= 100800 \cdot \left( -13 \cdot \frac{a}{t_T^6} + 64 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T^7} - 126 \cdot \frac{x_1}{t_T^8} \right); \\ C_3 &= 5040 \cdot \left( 53 \cdot \frac{a}{t_T^5} - 280 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T^6} + 540 \cdot \frac{x_1}{t_T^7} \right); & C_4 &= 2520 \cdot \left( -11 \cdot \frac{a}{t_T^4} + 64 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T^5} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_T^6} \right); \\ C_5 &= 420 \cdot \left( 3 \cdot \frac{a}{t_T^3} - 20 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T^4} + 36 \cdot \frac{x_1}{t_T^5} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

После подстановки определённых постоянных интегрирования (6) и (8) в систему уравнений (5) получаем функцию изменения ускорения четвёртого порядка формовочной тележки в процессе торможения от установившейся скорости  $\dot{x}_y$  до полной остановки

$$x = \frac{420}{t_T^3} \cdot \left[ \begin{aligned} &90 \cdot \left( 3 \cdot a - 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T} + 28 \cdot \frac{x_1}{t_T^2} \right) \cdot \frac{t^4}{t_T^4} + 40 \cdot \left( -13 \cdot a + 64 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T} - 126 \cdot \frac{x_1}{t_T^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_T^3} + \\ &+ 6 \cdot \left( 53 \cdot a - 280 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T} + 540 \cdot \frac{x_1}{t_T^2} \right) \cdot \frac{t^2}{t_T^2} + 6 \cdot \left( -11 \cdot a + 64 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T} - 120 \cdot \frac{x_1}{t_T^2} \right) \cdot \frac{t}{t_T} + \\ &+ \left( 3 \cdot a - 20 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T} + 36 \cdot \frac{x_1}{t_T^2} \right) \end{aligned} \right]. \quad (9)$$

После этого критерий оптимальности движения в процессе торможения с учётом выражений (2) и (9) будет иметь вид

$$I_{Q_T} = \frac{m}{2} \int_0^{t_T} x^2 dt = \frac{88200 \cdot m}{t_T^5} \cdot \left[ \frac{9}{5} \cdot a^2 - \frac{104}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_T} \cdot a + \frac{216}{7} \cdot \frac{x_1}{t_T^2} \cdot a + \frac{256}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_T^2} - 144 \cdot \frac{x_1}{t_T^3} \cdot \dot{x}_y + 144 \cdot \frac{x_1^2}{t_T^4} \right]. \quad (10)$$

Рассмотрим процесс пуска. Подставив начальные и конечные условия пуска в уравнения (5), получаем

$$t = 0 \Rightarrow C_6 = 0; C_7 = 0; C_8 = a; C_9 = 0; C_{10} = 0; \quad (11)$$

$$t = t_n \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{362880} \cdot C_1 \cdot t_n^9 + \frac{1}{40320} \cdot C_2 \cdot t_n^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_3 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_4 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_5 \cdot t_n^5 + \\ + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_n^2 = -x_1; \\ \frac{1}{40320} \cdot C_1 \cdot t_n^8 + \frac{1}{5040} \cdot C_2 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_3 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_4 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_5 \cdot t_n^4 + a \cdot t_n = -\dot{x}_y; \\ \frac{1}{5040} \cdot C_1 \cdot t_n^7 + \frac{1}{720} \cdot C_2 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_3 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_4 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot t_n^3 + a = 0; \\ \frac{1}{720} \cdot C_1 \cdot t_n^6 + \frac{1}{120} \cdot C_2 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_3 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_4 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot t_n^2 = 0; \\ \frac{1}{120} \cdot C_1 \cdot t_n^5 + \frac{1}{24} \cdot C_2 \cdot t_n^4 + \frac{1}{6} \cdot C_3 \cdot t_n^3 + \frac{1}{2} \cdot C_4 \cdot t_n^2 + C_5 \cdot t_n = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Решив систему уравнений (12), имеем постоянные интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  и  $C_5$

$$\begin{aligned} C_1 &= 907200 \cdot \left( -3 \cdot \frac{a}{t_n^7} + 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^8} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_n^9} \right); & C_2 &= 201600 \cdot \left( 7 \cdot \frac{a}{t_n^6} - 31 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^7} + 63 \cdot \frac{x_1}{t_n^8} \right); \\ C_3 &= 5040 \cdot \left( -63 \cdot \frac{a}{t_n^5} + 260 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^6} - 540 \cdot \frac{x_1}{t_n^7} \right); & C_4 &= 2520 \cdot \left( 15 \cdot \frac{a}{t_n^4} - 56 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^5} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^6} \right); \\ & & C_5 &= 420 \cdot \left( -5 \cdot \frac{a}{t_n^3} + 16 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n^4} - 36 \cdot \frac{x_1}{t_n^5} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

После подстановки определённых постоянных интегрирования (11) и (13) в систему уравнений (5) получаем функцию изменения ускорения четвёртого порядка формовочной тележки в процессе пуска с состояния покоя до выхода на установившийся режим движения

$$x = \frac{420}{t_n^3} \cdot \left[ \begin{aligned} & 90 \cdot \left( -3 \cdot a + 14 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 28 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t^4}{t_n^4} + 80 \cdot \left( 7 \cdot a - 31 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 63 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t^3}{t_n^3} + \\ & + 6 \cdot \left( -63 \cdot a + 260 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 540 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t^2}{t_n^2} + 6 \cdot \left( 15 \cdot a - 56 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} + 120 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \cdot \frac{t}{t_n} + \\ & + \left( -5 \cdot a + 16 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} - 36 \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \right) \end{aligned} \right]. \quad (14)$$

После этого критерий оптимальности движения в процессе пуска с учётом выражений (2) и (14) будет иметь вид

$$I_{Qn} = \frac{m}{2} \int_0^{t_n} x^2 dt = \frac{88200 \cdot m}{t_n^5} \cdot \left[ \frac{9}{5} \cdot a^2 - \frac{104}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_n} \cdot a + \frac{216}{7} \cdot \frac{x_1}{t_n^2} \cdot a + \frac{256}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_n^2} - 144 \cdot \frac{x_1}{t_n^3} \cdot \dot{x}_y + 144 \cdot \frac{x_1^2}{t_n^4} \right]. \quad (15)$$

Приняв равенство продолжительности процессов торможения тележки и её пуска  $t_r = t_n = t_1$ , общий критерий оптимальности движения в процессе реверсирования с учётом выражений (10) и (15) будет определяться так:

$$I_Q = \frac{176400 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ \frac{9}{5} \cdot a^2 - \frac{104}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} \cdot a + \frac{216}{7} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \cdot a + \frac{256}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y^2}{t_1^2} - 144 \cdot \frac{x_1}{t_1^3} \cdot \dot{x}_y + 144 \cdot \frac{x_1^2}{t_1^4} \right]. \quad (16)$$

Для обеспечения выполнения неравенства (1) необходимо исходя из выражения (16) выполнить условия

$$\begin{cases} \frac{\partial I_Q}{\partial x_1} = \frac{176400 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ \frac{216}{7} \cdot \frac{a}{t_1^2} - 144 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^3} + 288 \cdot \frac{x_1}{t_1^4} \right] = \frac{12700800 \cdot m}{t_1^7} \cdot \left[ \frac{3}{7} \cdot a - 2 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 4 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0; \\ \frac{\partial I_Q}{\partial a} = \frac{176400 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ \frac{18}{5} \cdot a - \frac{104}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{216}{7} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = \frac{352800 \cdot m}{t_1^5} \cdot \left[ \frac{9}{5} \cdot a - \frac{52}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{108}{7} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Из выражений (17) можно получить

$$\begin{cases} \left[ \frac{3}{7} \cdot a - 2 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + 4 \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0 \\ \left[ \frac{9}{5} \cdot a - \frac{52}{7} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1} + \frac{108}{7} \cdot \frac{x_1}{t_1^2} \right] = 0 \end{cases} \Rightarrow x_1 = \frac{17}{24} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1; \quad a = -\frac{35}{18} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}. \quad (18)$$

Подставив два последних выражения (18) в равенства (6) и (8), имеем постоянные интегрирования в процессе торможения формовочной тележки

$$\begin{aligned} C_1 = 0; \quad C_2 = 2800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = -2800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^6}; \quad C_4 = 980 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = -140 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \\ C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = 0; \quad C_9 = \dot{x}_y; \quad C_{10} = -\frac{17}{24} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1. \end{aligned} \quad (19)$$

После этого с учётом постоянных интегрирования (19) получены функции изменения перемещения, скорости, ускорения, ускорений второго, третьего и четвёртого порядков формовочной тележки в процессе торможения

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{5}{24} \cdot \frac{t^8}{t_1^7} - \frac{5}{3} \cdot \frac{t^7}{t_1^6} + \frac{49}{12} \cdot \frac{t^6}{t_1^5} - \frac{7}{2} \cdot \frac{t^5}{t_1^4} + 3 \cdot t - \frac{17}{8} \cdot t_1 \right); \\ \dot{x} &= \frac{1}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{5}{3} \cdot \frac{t^7}{t_1^7} - \frac{35}{3} \cdot \frac{t^6}{t_1^6} + \frac{49}{2} \cdot \frac{t^5}{t_1^5} - \frac{35}{2} \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 3 \right); \\ \ddot{x} &= \frac{35}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 2 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} + \frac{7}{2} \cdot \frac{t}{t_1} - 2 \right) \cdot \frac{t^3}{t_1^4}; \quad \ddot{\ddot{x}} = \frac{70}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^3} - 5 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} + 7 \cdot \frac{t}{t_1} - 3 \right) \cdot \frac{t^2}{t_1^4}; \\ {}^{IV}x &= 70 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{5}{3} \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - \frac{20}{3} \cdot \frac{t^2}{t_1^2} + 7 \cdot \frac{t}{t_1} - 2 \right) \cdot \frac{t}{t_1^4}; \quad {}^Vx = 140 \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{10}{3} \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 10 \cdot \frac{t^2}{t_1^2} + 7 \cdot \frac{t}{t_1} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_1^4}. \end{aligned} \quad (20)$$

Подставив два последних выражения (18) в равенства (11) и (13), получаем постоянные интегрирования в процессе пуска формовочной тележки

$$\begin{aligned} C_1 = 0; \quad C_2 = 2800 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^7}; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = -420 \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^5}; \quad C_5 = \frac{280}{3} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1^4}; \\ C_6 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_8 = -\frac{35}{18} \cdot \frac{\dot{x}_y}{t_1}; \quad C_9 = 0; \quad C_{10} = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

После этого с учётом постоянных интегрирования (21) получены функции изменения перемещения, скорости, ускорения, ускорений второго, третьего и четвёртого порядков формовочной тележки в процессе пуска

$$\begin{aligned}
x &= \frac{1}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{5}{24} \cdot \frac{t^6}{t_1^6} - \frac{7}{4} \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + \frac{7}{3} \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - \frac{35}{12} \right) \cdot \frac{t^2}{t_1}; & \dot{x} &= \frac{5}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^6} - \frac{63}{10} \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 7 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - \frac{7}{2} \right) \cdot \frac{t}{t_1}; \\
\ddot{x} &= \frac{35}{9} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^6}{t_1^6} - \frac{9}{2} \cdot \frac{t^4}{t_1^4} + 4 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1}{t_1}; & \ddot{x} &= \frac{70}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( \frac{t^3}{t_1^3} - 3 \cdot \frac{t}{t_1} + 2 \right) \cdot \frac{t^2}{t_1^4}; \\
x^{IV} &= \frac{70}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 5 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 9 \cdot \frac{t}{t_1} + 4 \right) \cdot \frac{t}{t_1^4}; & x^V &= \frac{140}{3} \cdot \dot{x}_y \cdot \left( 10 \cdot \frac{t^3}{t_1^3} - 9 \cdot \frac{t}{t_1} + 2 \right) \cdot \frac{1}{t_1^4}.
\end{aligned} \tag{22}$$

На установившемся режиме движения формовочной тележки координата перемещения, скорости, ускорения, ускорений второго, третьего и четвёртого порядков её центра масс описываются уравнениями [19]

$$x = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y}) \cdot t}{t_y}; \quad \dot{x} = \frac{(x_{1y} - x_{0y})}{t_y} = \text{const}; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad x^{IV} = 0; \quad x^V = 0, \tag{23}$$

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

В выражениях (23) координату начального положения центра масс тележки при установившемся движении  $x_{0y}$  принимаем равной  $x_1$ . Тогда, приняв амплитуду перемещения тележки от одного крайнего положения в другое  $\Delta x$ , конечную координату положения центра масс тележки при установившемся движении можно определить как  $x_{1y} = \Delta x - x_1$ .

Подставив полученные координаты  $x_{0y}$  и  $x_{1y}$  во второе выражение (23), получаем зависимость для определения скорости движения тележки на установившемся движении  $\dot{x}_y$

$$\dot{x}_y = \frac{\Delta x - 2 \cdot x_1}{t_y} = \frac{\Delta x - \frac{17}{12} \cdot \dot{x}_y \cdot t_1}{t_y} \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{\Delta x}{t_y + \frac{17}{12} \cdot t_1}. \tag{24}$$

Приняв общее время движения формовочной тележки от одного крайнего положения в другое  $t_0$ , его можно разделить на три части: время пуска –  $t_n$ ; время установившегося движения –  $t_y$ ; время торможения –  $t_t$ . Для обеспечения уплотнения бетонной смеси формовочной тележкой с постоянной скоростью движения на большинстве её рабочего хода примем время установившегося движения, например  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_0$  [4]. Тогда, задавшись условием равенства времени пуска и торможения, их можно определить соответственными выражениями  $t_n = t_t = t_1 = \frac{1}{6} \cdot t_0$ .

Функции скорости движения тележки на установившемся движении и координаты  $x_1$  с учётом зависимости (24) будут иметь вид

$$\dot{x}_y = \frac{72 \cdot \Delta x}{65 \cdot t_0}; \quad x_1 = \frac{17}{130} \cdot \Delta x. \tag{25}$$

Рассматривая движение формовочной тележки от одного крайнего положения в другое и подставив выражения (25) в равенства (20), (23) и (22), получаем функции изменения перемещения, скорости, ускорения, ускорений второго, третьего и четвёртого порядков формовочной тележки

– на участке пуска

$$\begin{aligned}
 x &= -\frac{144}{65} \cdot \Delta x \cdot \left( 9720 \cdot \frac{t^6}{t_0^6} - 2268 \cdot \frac{t^4}{t_0^4} + 504 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - \frac{35}{12} \right) \cdot \frac{t^2}{t_0^2}; \\
 \dot{x} &= -\frac{48}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 46656 \cdot \frac{t^6}{t_0^6} - \frac{81648}{10} \cdot \frac{t^4}{t_0^4} + 1512 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - \frac{7}{2} \right) \cdot \frac{t}{t_0^2}; \\
 \ddot{x} &= -\frac{336}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 46656 \cdot \frac{t^6}{t_0^6} - 5832 \cdot \frac{t^4}{t_0^4} + 864 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1}{t_0^5}; \\
 \ddot{\ddot{x}} &= \frac{870912}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 108 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - 9 \cdot \frac{t}{t_0} + 1 \right) \cdot \frac{t^2}{t_0^5}; \\
 \overset{IV}{x} &= \frac{870912}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 540 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - 27 \cdot \frac{t}{t_0} + 2 \right) \cdot \frac{t}{t_0^5}; \\
 \overset{V}{x} &= \frac{1741824}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 1080 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - 27 \cdot \frac{t}{t_0} + 1 \right) \cdot \frac{1}{t_0^5};
 \end{aligned} \tag{26}$$

– на участке установившегося движения

$$x = \frac{\Delta x}{130} \cdot \left( 17 + 144 \cdot \frac{t}{t_0} \right); \quad \dot{x} = \frac{72 \cdot \Delta x}{65 \cdot t_0} = const; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{\ddot{x}} = 0; \quad \overset{IV}{x} = 0; \quad \overset{V}{x} = 0; \tag{27}$$

– на участке торможения

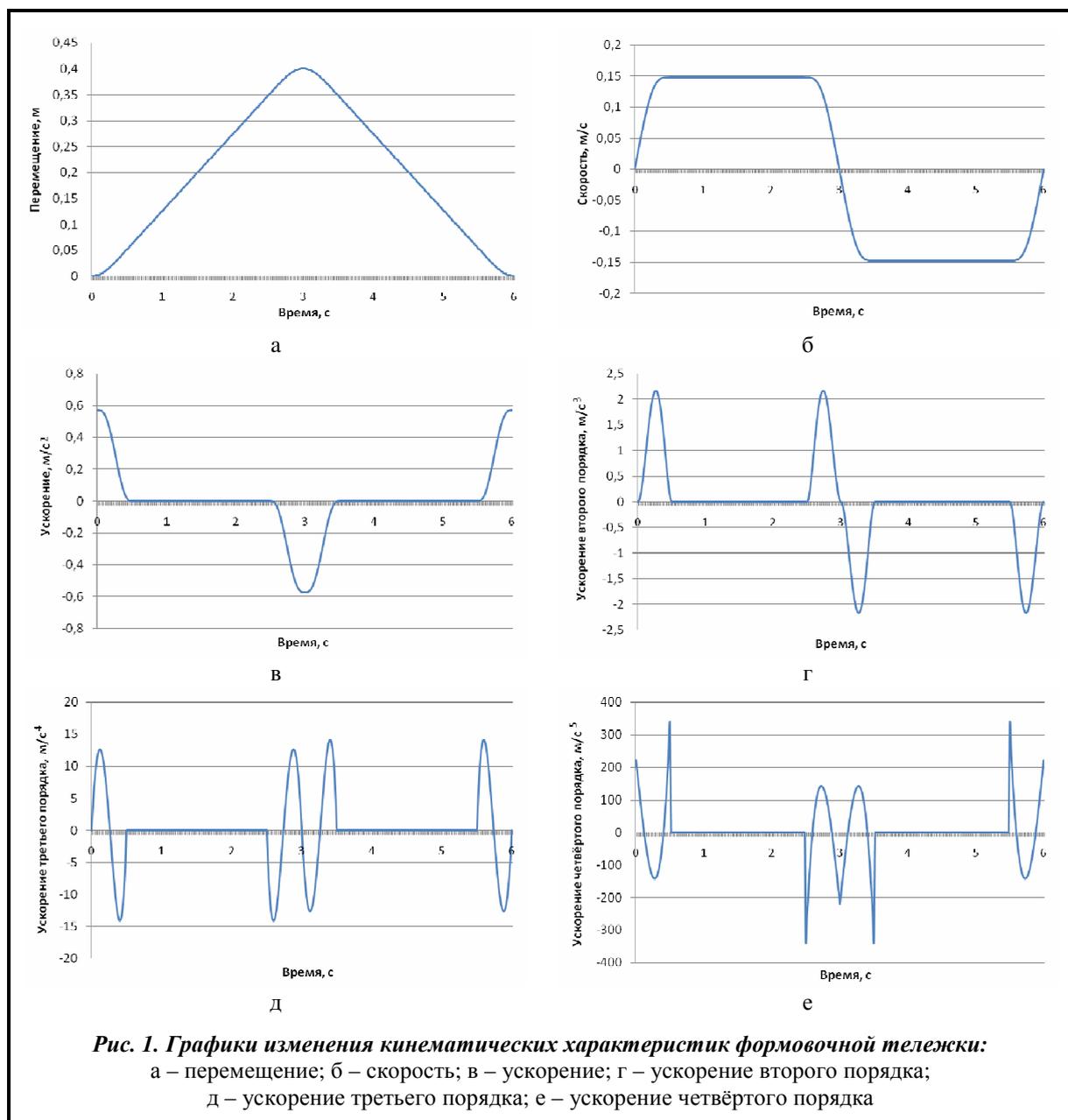
$$\begin{aligned}
 x &= \Delta x + \frac{24}{65} \cdot \Delta x \cdot \left( 58320 \cdot \frac{t^8}{t_0^8} - 77760 \cdot \frac{t^7}{t_0^7} + 31752 \cdot \frac{t^6}{t_0^6} - 4536 \cdot \frac{t^5}{t_0^5} + 3 \cdot \frac{t}{t_0} - \frac{17}{48} \right); \\
 \dot{x} &= \frac{72}{65} \cdot \Delta x \cdot \left( 155520 \cdot \frac{t^7}{t_0^7} - 181440 \cdot \frac{t^6}{t_0^6} + 63504 \cdot \frac{t^5}{t_0^5} - 7560 \cdot \frac{t^4}{t_0^4} + 1 \right) \cdot \frac{1}{t_0}; \\
 \ddot{x} &= \frac{217728}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - 72 \cdot \frac{t^2}{t_0^2} + 21 \cdot \frac{t}{t_0} - 2 \right) \cdot \frac{t^3}{t_0^5}; \\
 \ddot{\ddot{x}} &= \frac{1306368}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 72 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - 60 \cdot \frac{t^2}{t_0^2} + 14 \cdot \frac{t}{t_0} - 1 \right) \cdot \frac{t^2}{t_0^5}; \\
 \overset{IV}{x} &= \frac{2612736}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 180 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - 120 \cdot \frac{t^2}{t_0^2} + 21 \cdot \frac{t}{t_0} - 1 \right) \cdot \frac{t}{t_0^5}; \\
 \overset{V}{x} &= \frac{2612736}{13} \cdot \Delta x \cdot \left( 720 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - 360 \cdot \frac{t^2}{t_0^2} + 42 \cdot \frac{t}{t_0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_0^5}.
 \end{aligned} \tag{28}$$

Приняв амплитуду перемещения формовочной тележки  $\Delta x = 0,4 \text{ м}$  и продолжительность ее движения от одного крайнего положения к другому  $t_0 = 3 \text{ с}$  [4], по уравнениям (26)–(28) были рассчитаны кинематические характеристики и построены графики (рис. 1) изменения перемещения (рис. 1, а), скорости (рис. 1, б), ускорения (рис. 1, в), ускорения второго порядка (рывка) (рис. 1, г), ускорения третьего порядка (рис. 1, д) и ускорения четвертого порядка (рис. 1, е) при движении формовочной тележки от одного крайнего положения к другому и в обратном направлении с режимом реверсирования по ускорению четвертого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений.

Анализ графиков на рис. 1 показывает, что функции скорости, ускорения, ускорения второго порядка (рывка) и ускорения третьего порядка формовочной тележки изменяются плавно, не создавая значительных динамических нагрузок в установке, что в свою очередь позитивно влияет на её долговечность. При этом значение скорости формовочной тележки на участке установившегося движения имеет значение

$\dot{x} = \frac{72 \cdot \Delta x}{65 \cdot t_0} = 0,148 \text{ м/с}$ , что на 5% меньше по сравнению с режимом движения по ускорению третьего порядка [18];

максимальное значение ускорения на этапах пуска и торможения имеет значение  $\ddot{x} = 0,574 \text{ м/с}^2$ , что на 7% меньше по сравнению с режимом движения по ускорению третьего порядка [18]; максимальное значение ускорения второго порядка (рывка) на этапах пуска и торможения имеет значение  $\ddot{\ddot{x}} = 2,163 \text{ м/с}^3$ , что в 2,33 раза меньше по сравнению с режимом движения по ускорению третьего порядка [18]. Кроме того, из графиков на рис. 1 видно, что изменение функции ускорения второго порядка (рывка) на этапах пуска и торможения происходит в одном квадранте, то есть в процессе пуска и торможения ускорение второго порядка (рывок) изменяется от нулевого значения до экстремального и возвращается обратно к нулевому. При этом кривая не пересекает оси абсцисс, по сравнению с режимом движения по ускорению третьего порядка [18]. Следовательно, при таком режиме движения формовочной тележки уменьшается количество изменений знака ускорения второго порядка (рывка), что приводит к уменьшению знакопеременных сил в установке и, соответственно, снижает уровень напряжений в тележке.



### Результаты исследования

Закон движения тележки, описанный уравнениями (26)–(28), может быть осуществлён приводом с кулачковым механизмом (рис. 2) возвратно-поступательного движения тележки. При этом движение тележки в одном направлении осуществляется за счёт поворота кулачка 1 на половину оборота (т. е.  $\varphi = \pi$ ) и в обратном направлении ещё на половину оборота; полный цикл движения тележки – за один оборот кулачка. Для осуществления описанного закона движения тележки необходимо, чтобы приращение радиуса кулачка соответствовало приращению перемещения тележки.

Из выражений (26)–(28) исключаем время  $t$ , так как  $t = \varphi/\omega$ , а  $t_1 = \pi/\omega$ . Здесь  $\varphi$  – угловая координата поворота кулачка, а  $\omega$  – угловая скорость кулачка. Поскольку время пуска формовочной тележки принимаем  $t_{\text{п}} = \frac{1}{6} \cdot t_0$ , то процесс пуска будет осуществляться поворотом кулачка на угол

в пределах от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \pi/6$ ; время установившегося движения –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_0$ , тогда установившееся

движение тележки будет обеспечиваться поворотом кулачка на угол в пределах от  $\varphi = \pi/6$  до  $\varphi = 5\pi/6$ ;

время торможения –  $t_{\text{т}} = \frac{1}{6} \cdot t_0$ , тогда процесс торможения будет осуществляться поворотом кулачка на

угол в пределах от  $\varphi = 5\pi/6$  до  $\varphi = \pi$ . Согласно этому, преобразовав первые уравнения выражений (26)–(28) для случая, когда начало координат отсчитывается от среднего положения перемещения формовочной тележки, радиус кулачка, который описывает его профиль, связывается с угловой координатой следующими выражениями:

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{144}{65} \cdot \Delta x \cdot \left( 9720 \cdot \frac{\varphi^6}{\pi^6} - 2268 \cdot \frac{\varphi^4}{\pi^4} + 504 \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} - \frac{35}{12} \right) \cdot \frac{\varphi^2}{\pi^2} - \frac{\Delta x}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (29)$$

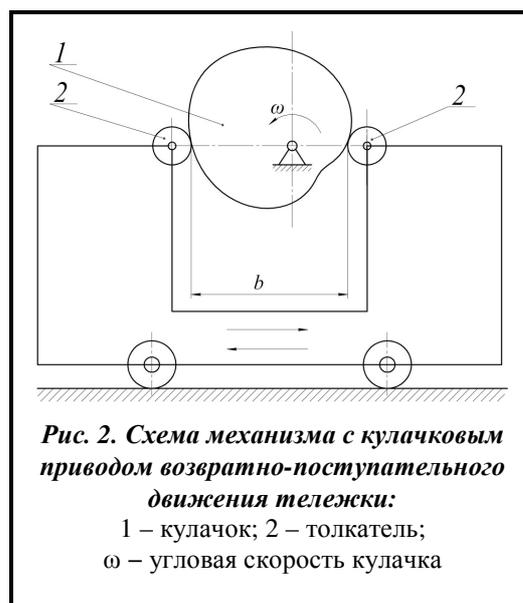
$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{130} \cdot \left[ 17 + 144 \cdot \left( \varphi - \frac{\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (30)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} + \frac{24}{65} \cdot \Delta x \cdot \left[ \begin{array}{l} 58320 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^8 \cdot \frac{1}{\pi^8} - 77760 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{\pi^7} + \\ + 31752 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 4536 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ + 3 \cdot \left( \varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - \frac{17}{48} \end{array} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi, \quad (31)$$

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

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

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{144}{65} \cdot \Delta x \cdot \left[ 9720 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^6}{\pi^6} - 2268 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + 504 \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} - \frac{35}{12} \right] \cdot \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (32)$$

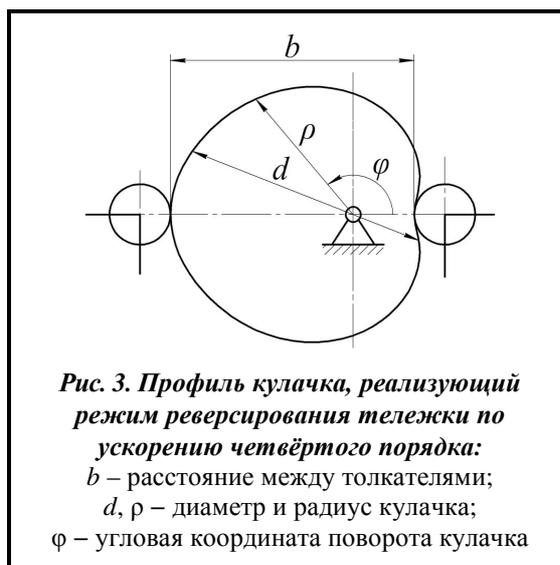


$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{130} \cdot \left[ 17 + 144 \cdot \left( \varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (33)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} - \frac{24}{65} \cdot \Delta x \cdot \left[ \begin{aligned} & 58320 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^8 \cdot \frac{1}{\pi^8} - 77760 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{\pi^7} + \\ & + 31752 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{\pi^6} - 4536 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{\pi^5} + \\ & + 3 \cdot \left( \varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \cdot \frac{1}{\pi} - \frac{17}{48} \end{aligned} \right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (34)$$

Для предотвращения ударов кулачка о толкатели при изменении направления движения тележки описанный уравнениями (29)–(34) профиль кулачка (рис. 3) имеет такой вид, что в любом положении его диаметр  $d$  – величина постоянная и равна расстоянию между толкателями  $b$  ( $d=b$ ).

Для уменьшения динамических нагрузок в элементах установки и повышения её надёжности предложено использование в конструкции установки приводного механизма, обеспечивающего возвратно-поступательное движение формовочной тележки с режимом реверсирования по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений (рис. 4). Приводной механизм выполнен в виде шарнирно установленных на портале кулачковых механизмов, которые контактируют с толкателями, жёстко прикреплёнными к формовочной тележке.



**Рис. 3. Профиль кулачка, реализующий режим реверсирования тележки по ускорению четвёртого порядка:**  
 $b$  – расстояние между толкателями;  
 $d, \rho$  – диаметр и радиус кулачка;  
 $\varphi$  – угловая координата поворота кулачка

Наличие двух толкателей с каждой стороны формовочной тележки позволяет создавать жёсткую силовую цепь при её прямом и возвратном движении. Кулачки приводятся во вращательное движение от двигателей.

При использовании в установке кулачкового приводного механизма с каждой стороны формовочной тележки предотвращается возможность её осевого перекашивания, уменьшаются динамические нагрузки в элементах привода, и, соответственно, повышается долговечность установки в целом.

Закон движения тележки, описанный уравнениями (26)–(28), также может быть осуществлён приводом от высокомоментного шагового двигателя, который вмонтирован в укатывающие ролики формовочной тележки установки. Приняв время пуска формовочной тележки  $t_n = \frac{1}{6} \cdot t_0$ , время установившегося движения –  $t_y = \frac{2}{3} \cdot t_0$  и время торможения –  $t_r = \frac{1}{6} \cdot t_0$  [4], из выражений (26)–(28) получаем закон изменения угловой скорости приводного шагового двигателя при движении формовочной тележки от одного крайнего положения к другому

$$\dot{\varphi} = -\frac{48 \cdot \Delta x}{13 \cdot R} \cdot \left( 46656 \cdot \frac{t^6}{t_0^6} - \frac{81648}{10} \cdot \frac{t^4}{t_0^4} + 1512 \cdot \frac{t^3}{t_0^3} - \frac{7}{2} \right) \cdot \frac{t}{t_0^2}, \quad 0 \leq t \leq \frac{t_0}{6}; \quad \dot{\varphi} = \frac{72 \cdot \Delta x}{65 \cdot t_0 \cdot R}, \quad \frac{t_0}{6} < t < \frac{5 \cdot t_0}{6};$$

$$\dot{\varphi} = \frac{72 \cdot \Delta x}{65 \cdot R} \cdot \left[ \begin{aligned} & 155520 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_0}{6} \right)^7 \cdot \frac{1}{t_0^7} - 181440 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_0}{6} \right)^6 \cdot \frac{1}{t_0^6} + \\ & + 63504 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_0}{6} \right)^5 \cdot \frac{1}{t_0^5} - 7560 \cdot \left( t - \frac{5 \cdot t_0}{6} \right)^4 \cdot \frac{1}{t_0^4} + 1 \end{aligned} \right] \cdot \frac{1}{t_0}, \quad \frac{5 \cdot t_0}{6} < t \leq t_0.$$

где  $R$  – радиус укатывающих роликов.

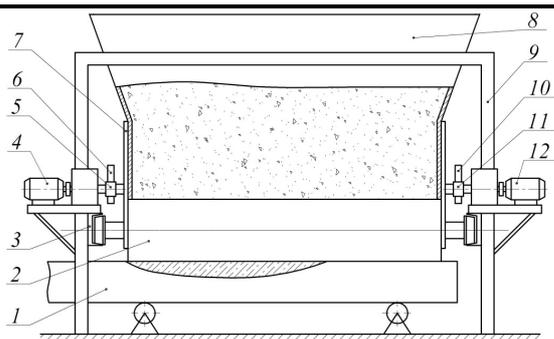
Аналогично определяется закон изменения угловой скорости приводного шагового двигателя при движении формовочной тележки в обратном направлении

$$\dot{\phi} = \frac{48 \cdot \Delta x}{13 \cdot R} \cdot \left[ 46656 \cdot \frac{(t-t_0)^6}{t_0^6} - \frac{81648}{10} \cdot \frac{(t-t_0)^4}{t_0^4} + 1512 \cdot \frac{(t-t_0)^3}{t_0^3} - \frac{7}{2} \right] \cdot \frac{(t-t_0)}{t_0^2}, \quad t_0 \leq t \leq \frac{7 \cdot t_0}{6};$$

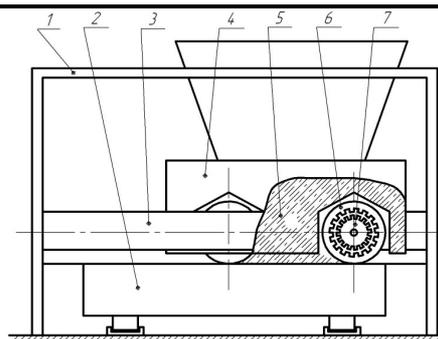
$$\dot{\phi} = -\frac{72 \cdot \Delta x}{65 \cdot t_0 \cdot R}, \quad \frac{7 \cdot t_0}{6} < t < \frac{11 \cdot t_0}{6};$$

$$\dot{\phi} = -\frac{72 \cdot \Delta x}{65 \cdot R} \cdot \left[ 155520 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_0}{6}\right)^7 \cdot \frac{1}{t_0^7} - 181440 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_0}{6}\right)^6 \cdot \frac{1}{t_0^6} + \right. \\ \left. + 63504 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_0}{6}\right)^5 \cdot \frac{1}{t_0^5} - 7560 \cdot \left(t - \frac{11 \cdot t_0}{6}\right)^4 \cdot \frac{1}{t_0^4} + 1 \right] \cdot \frac{1}{t_0}, \quad \frac{11 \cdot t_0}{6} < t \leq 2 \cdot t_0.$$

Также предложено в конструкции роликовой формовочной установки использование привода от высокомоментного шагового двигателя, обеспечивающего возвратно-поступательное движение формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений (рис. 5). Тележка приводится в возвратно-поступательное движение с помощью высокомоментного шагового двигателя, вмонтированного в ролики, причём ось ролика исполняет роль статора, а сам ролик – ротора [22].



**Рис. 4. Роликовая формовочная установка с кулачковым приводным механизмом**



**Рис. 5. Роликовая формовочная установка с приводом от шагового двигателя**

При использовании в установке привода от высокомоментного шагового двигателя, вмонтированного в укатывающие ролики, закон изменения угловой скорости которого описан приведенными выше уравнениями, уменьшаются динамические нагрузки в элементах привода и, соответственно, повышается долговечность установки в целом.

## Выводы

1. В результате проведенных исследований с целью повышения надёжности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений.

2. Получены кинематические характеристики формовочной тележки при режиме реверсирования по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений.

3. Предложено использовать в конструкции установки привод в виде кулачкового механизма, построен профиль кулачка для обеспечения комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки с реверсированием по ускорению четвёртого порядка с оптимальными значениями граничных ускорений.

4. Рассмотрено применение в конструкции роликовой формовочной установки привода от высокомоментного шагового двигателя, вмонтированного в укатывающие ролики формовочной тележки.

5. 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 в режимах реальной эксплуатации. Также результаты работы могут использоваться при проектировании или усовершенствовании механизмов с возвратно-поступательным движением исполнительных элементов.

### Литература

1. Гарнець В. М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси. К.: Будівельник, 1991. 144 с.
2. Гарнець В. М., Зайченко С. В., Човнюк Ю. В., Шаленко В. О., Приходько Я. С. Бетоноформувальні агрегати. Конструктивно-функціональні схеми, принцип дії, основи теорії. К.: Інтерсервіс, 2015. 238 с.
3. Кузин В. Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: автореф. дис. ... канд. наук / Моск. инж.-строит.ин-т. М., 1981.
4. Рюшин В. Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей: дис. ... канд. техн. наук / Киев. инж.-строит. ин-т. Киев, 1986.
5. Ловейкін В. С. Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. *Динаміка, міцність і надійність с.-г машин*: Пр. І міжнар. наук.-техн.конф. (DSR AM-I). (Тернопіль, 4–7 жовт. 2004). Тернопіль, 2004. С. 507–514.
6. Ловейкін В. С., Почка К. І. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. *Вісн. Харк. нац. ун-ту сільськ. госп-ва ім. П. Василенка*. 2007. Т 1. № 59. С. 465–474.
7. Назаренко І. І., Смірнов В. М., Пелевін Л. Є., Фомін А. В., Свідерський А. Т., Костенюк О. О., Ручинський М. М., Дедов О. П., Гаркавенко О. М., Мартинюк І. Ю. Основи теорії руху землерийних і ущільнювальних машин будіндустрії з керованими у часі оптимальними параметрами. К.: МП Леся, 2013. 188 с.
8. Zaichenko S., Shalenko V., Shevchuk N., Varnichna V. Development of a geomechanic complex for geotechnical monitoring contour mine groove. *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3/9 (87). P. 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102067>
9. Гарнець В. М., Човнюк Ю. В., Зайченко С. В., Шаленко В. О., Приходько Я. С. Теорія і практика створення бетоноформувальних агрегатів (БФА). *Гірни., буд., дор. та меліор. машини*. 2014. Вип. 83. С. 49–54.
10. Гарнець В. М., Зайченко С. В., Приходько Я. С., Шаленко В. О. Розробка науково-практичних рекомендацій по створенню бетоноформуючих агрегатів (БФА). *Гірни., буд., дор. та меліор. машини*. 2012. Вип. 79. С. 46–52.
11. Зайченко С. В., Шевчук С. П., Гарнець В. М. Енергетичний аналіз процесу роликового ущільнення. *Енергетика: Економіка, технологія, екологія*. 2012. № 1 (30). С. 77–83.
12. Зайченко С. В., Шевчук С. П., Гарнець В. М. Тривимірне моделювання процесу роликового ущільнення стовбурного кріплення. *Гірни., буд., дор. та меліор. машини*. 2012. Вип. 79. С. 40–45.
13. Приходько Я. С., Гарнець В. М. Взаємоузгодженість роботи механізмів при ролико-екструзійному формуванні багатопустотних виробів. *Галузеве машинобуд., буд-во*. 2012. № 1 (31). С. 305–310.
14. Ловейкін В. С., Почка К. І. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. *Автоматизація вироб. процесів у машинобуд. та приладобуд.* НУ «Львівська політехніка». 2007. № 41. С. 127–134.
15. Ловейкін В. С., Почка К. І. Динамічна оптимізація режиму реверсування роликової формувальної установки. *Машинобудування*. Харків: Укр. інж.-пед. акад. 2015. № 15. С. 76–86.
16. Ловейкін В. С., Почка К. І. Оптимізація ривкового режиму реверсування роликової формувальної установки. *Наук.вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. техніка та енергетика АПК*. 2015. Ч. 1, Вип. 212. С. 186–197.
17. Ловейкін В. С., Почка К. І. Оптимізація режиму реверсування роликової формувальної установки за прискоренням третього порядку. *Вісн. Донбас. машинобуд. акад.* 2015. № 3 (36). С. 16–26.
18. Ловейкін В. С., Почка К. І. Синтез кулачкового приводного механізму роликової формувальної установки з комбінованим режимом руху по прискоренню третього порядку. *Наука і техніка*. 2017. Т. 16, № 3. С. 206–214. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214>
19. Ловейкін В. С. Расчёты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Киев: УМК ВО, 1990. 168 с.
20. Дегтярев Ю. И. Методы оптимизации. М.: Сов. радио, 1980. 272 с.
21. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. пер. с англ. М.: Мир, 1986. Кн. 1. 352 с.
22. Установка для формирования виробів з бетонних сумішей: пат. 105744 Україна МПК В28В 13/00: № а 201309305; заявл. 25.07.2013; опубл. 10.06.2014.

Надійшла до редакції 31.10.2018