

## Компьютерное моделирование раскачивания груза при телескопировании

А. А. Реутов✉

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская федерация

✉ bgtu2012@yandex.ru

### Резюме

В статье представлена компьютерная динамическая модель раскачивания груза на канате при различных управлениях выдвиганием секций телескопической стрелы крана. Цель работы – анализ возможности снижения раскачивания груза на канате при различных управлениях выдвиганием секций телескопической стрелы крана. Методом проведения работы является компьютерное моделирование движения телескопической стрелы с грузом с учетом механических характеристик канатов, секций и их контактного взаимодействия с использованием программного комплекса «Универсальный механизм». Проведено моделирование движения телескопической стрелы с грузом с одноэтапным и трехэтапными режимами управления, с зависимостью скорости выдвигания от времени и перемещения. Моделирование показало, что трехэтапный режим управления движением с переменным ускорением лучше снижает колебания груза по сравнению с двумя другими рассмотренными режимами, хотя максимальные значения отклонения и угла перекоса груза в большей мере зависят от ускорения движения секций, чем от закона движения. Использование зависимости скорости выдвигания от перемещения менее эффективно, чем зависимости от времени, и замедляет движение секций. Погрешность позиционирования обусловлена отличием фактической скорости выдвигания секций от заданной и составляет 0,8–1,3 %. Погрешность позиционирования может быть уменьшена уточнением значений силы гидроцилиндра. Компьютерную модель и установленные закономерности телескопирования грузов целесообразно использовать при проектировании монтажных операций, осуществляемых грузоподъемными кранами с телескопическими стрелами.

### Ключевые слова

телескопическая стрела, динамическая модель, управление движением, раскачивание груза, «Универсальный механизм»

### Для цитирования

Реутов А.А. Компьютерное моделирование раскачивания груза при телескопировании / А.А. Реутов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 24–32. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).24-32

### Информация о статье

поступила в редакцию: 03.02.2021, поступила после рецензирования: 08.02.2021, принята к публикации: 17.02.2021

## Computer simulation of load swaying while telescoping

А. А. Reutov✉

Bryansk State Technical University, Bryansk, the Russian Federation

✉ bgtu2012@yandex.ru

### Abstract

The article presents a computer dynamic model of swaying a load on a rope with various controls by extending the sections of the telescopic boom of the crane. The purpose of the work is to analyze the possibilities of reducing the swaying of the load with various controls by extending sections of the telescopic boom of the crane. The method of carrying out the work is computer simulation of the movement of a telescopic boom with a load, taking into account the mechanical characteristics of ropes, sections and their contact interaction using the “Universal Mechanism” software. The simulation of the movement of a telescopic boom with a load with one-stage and three-stage control modes, with the dependence of the extension speed on time and movement, has been carried out. The simulation has shown that the three-stage motion control mode with variable acceleration better reduces the load oscillations in comparison with the other two considered modes, although the maximum values of the deflection and skew angle of the load depend more on the acceleration of the sections movement than on the law of motion. Using the dependency of extension speed on displacement is less effective than using the time dependency and slows down the movement of the sections. The positioning error is conditioned by the difference between the actual section extension speed from the specified one. Positioning error is 0,8–1,3 % and can be reduced by adjusting the hydraulic cylinder force values. It is advisable to use a computer model and the established patterns of loads telescoping when designing assembly operations carried out by cranes with telescopic booms.

### Keywords

telescopic boom, dynamic model, movement control, load sway, “Universal mechanism”

**For citation**

Reutov A.A. Komp'yuternoe modelirovanie raskachivaniya gruza pri teleskopirovani [Computer simulation of load swaying while telescoping]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 24–32. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).24-32

**Article Info**

Received: 03.02.2021, Revised: 08.02.2021, Accepted: 17.02.2021

**Введение**

Телескопические стрелы с гидравлическим приводом нашли широкое применение в современных мобильных грузоподъемных кранах. В России наиболее распространены мобильные краны грузоподъемностью 25–50 т с трех- и четырехсекционными стрелами и высотой подъема до 50 м.

Телескопированием называют перемещение груза путем выдвижения или втягивания секций телескопической стрелы крана. Телескопирование применяют при невозможности перемещения груза другим способом, например, для подачи груза в проем здания.

Раскачивание груза на канате при перемещении краном снижает производительность крана, создает опасность повреждения груза и близко расположенных конструкций.

Для оценки интенсивности раскачивания груза при перемещении краном предложено много математических моделей, отличающихся расчетными схемами, способами описания движения тел, способами управления.

В настоящей статье, в отличие от аналитических моделей, разработана компьютерная модель движения секций телескопической стрелы крана с полиспастом и грузом. Компьютерная модель создана в среде программного комплекса «Универсальный механизм» (далее – Комплекс УМ).

**Способы ограничения раскачивания груза при перемещении кранами**

Во многих математических моделях поднимаемый груз представлен одинарным маятником с точечной массой. В работе [1] получены аналитические зависимости, учитывающие изменение длины каната при подъеме и опускании груза. Полная модель крана, включающая привод, была создана с использованием инструментов «Matlab» и успешно проверена на реальном кране [2].

На основе дифференциальных уравнений затухающих колебаний плоского маятника с подвижной точкой подвеса получены аналитические зависимости угла наклона грузового каната и его первой производной от времени при постоянном ускорении точки подвеса [3]. Разделение процесса разгона моста или грузовой тележки крана на три этапа (разгон с постоянным ускорением, движение с постоянной скоростью, дальнейший разгон с постоянным ускорением) позволяет выйти на режим заданной максимальной скорости перемещения точки подвеса груза при полном гаше-

нии колебаний груза. Получена аналитическая зависимость угла наклона грузового каната относительно вертикали при движении точки подвеса груза с постоянным ускорением. Показано, что разбиение процесса разгона точки подвеса груза на три этапа с различными ускорениями обеспечивает режим максимальной скорости перемещения точки подвеса груза при гашении колебаний грузового каната.

Недостатком данного способа разгона точки подвеса груза является необходимость использования высокоточного привода, обеспечивающего оптимальные длительности и ускорения этапов разгона.

Математические модели, представляющие крюковую подвеску и груз как двойной маятник представлены для мостового крана [4] и башенного крана [5]. Здесь уравнения Лагранжа использованы для описания движения узлов крана и груза, проектирования управления. Недостатком этих работ является неопределенность законов изменения силы (момента) привода, необходимых для реализации требуемого движения.

Среди множества схем управления кранами можно выделить замкнутые, незамкнутые и комбинированные (гибридные) схемы. Исследователи часто используют незамкнутые схемы управления для контроля раскачивания груза, поскольку они не требуют установки датчиков измерения угла отклонения каната [6]. Недостатком незамкнутых схем управления является их нечувствительность к внешним воздействиям, например, ветровой нагрузке. Кроме того, использование незамкнутой системы управления, задающей только закон движения или закон изменения скорости как функцию времени, невозможно.

Для достижения точного позиционирования при небольшом раскачивании груза изучались комбинированные методы управления. Это сделано для дальнейшего повышения производительности кранов, чего нельзя было добиться при использовании одного контроллера. Комбинированное управление снижает колебания груза при порывах ветра. Примеры моделирования подтверждают устойчивость комбинированного управления при различных комбинациях движения крана и ветровой нагрузки. Эти гибридные контроллеры включают комбинированное управление со скользящим режимом и частичной линеаризацией обратной связи, формирование входных сигналов с помощью адаптивного управления скользящим режимом и оптимальное ПИД-регулирование [11–13]. Формирование входных сигналов было объеди-

нено с контроллером обратной связи и с демпфером [14, 15].

### Цель и метод проведения работы

Целью работы является сравнительный анализ снижения раскачивания груза на канате при различных управлениях выдвиганием секций телескопической стрелы крана.

Методом проведения работы является компьютерное моделирование движения телескопической стрелы с грузом с учетом механических характеристик канатов, секций и их контактного взаимодействия с использованием Комплекса УМ.

Отличительными особенностями данной работы являются:

- создание компьютерной модели, позволяющей рассматривать телескопирование груза как управляемое движение многомассовой нелинейной системы;
- использование способа управления, задающего силу гидроцилиндра выдвигания секций (ГЦ) как функцию задаваемой и фактической скоростей выдвигания ГЦ;
- вычисление силы ГЦ с учетом механических характеристик узлов стрелы, полиспаста и груза.

### Описание компьютерной модели телескопической стрелы

Для моделирования движения телескопической стрелы создана компьютерная 2D-модель трехсекционной стрелы в среде Комплекса УМ (рис. 1).



Рис. 1. Компьютерная модель трехсекционной телескопической стрелы

Fig. 1. Computer model of a three-section telescopic boom

Компьютерная модель включает три секции стрелы, полиспаст с крюковой подвеской, груз, гид-

роцилиндры подъема стрелы и выдвигания секций, канатный механизм. Тела модели перемещаются в вертикальной плоскости  $YZ$ . Силы и перемещения тел в направлении оси  $X$  не рассматриваются.

Секция № 1, установленная на поворотной платформе крана, может вращаться в вертикальной плоскости относительно оси крепления. Секции № 2 и 3, полиспаст с крюковой подвеской, груз могут перемещаться в вертикальной плоскости, имея три степени свободы.

Контактное взаимодействие каждой пары секций представлено 4 контактными силами «точка – плоскость», описанными в Руководстве пользователя УМ [7]. Схема расположения контактных точек представлена (рис. 2).

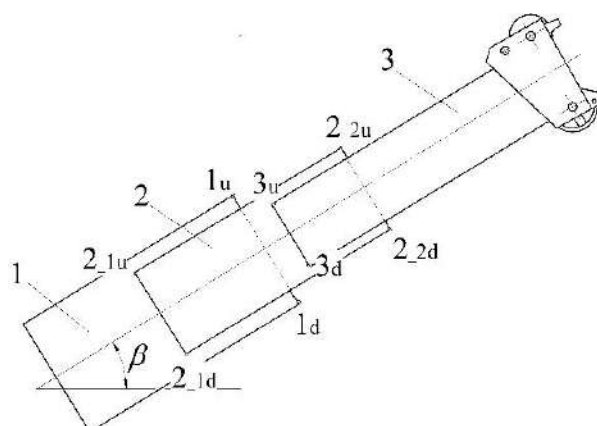


Рис. 2. Схема расположения контактных точек модели (1, 2 и 3 – секции № 1, 2 и 3)

Fig. 2. Model contact points layout (1, 2 and 3 are sections No. 1, 2 and 3)

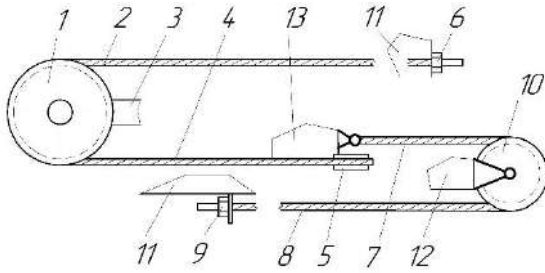
Две контактные точки секции № 1 обозначены 1d и 1u. Секция № 2 имеет четыре контактные точки, обозначенные 2\_1d и 2\_1u, 2\_2d и 2\_2u. Секция № 3 имеет две контактные точки – 3d и 3u [8],  $\beta$  – угол наклона продольной оси стрелы к горизонту.

Силы трения  $F_{mp}$  в опорах скольжения секций определены через коэффициент трения скольжения  $f$  и нормальные реакции  $N$ :

$$F_{mp} = fN.$$

В модели принята экспоненциальная зависимость коэффициента трения скольжения  $f$  от скорости скольжения. Переход от трения скольжения к трению покоя происходит, если скорость скольжения меняет направление на противоположное.

Во многих конструкциях телескопических стрел с 3 или 4 секциями используют канатный механизм выдвигания и втягивания секций, содержащий канат выдвигания и канат втягивания. У автомобильного крана КС-55713-5К-1 две ветви каната выдвигания расположены в вертикальной плоскости [9], оба конца каната закреплены на секции № 1 натяжителями (рис. 3).



**Рис. 3.** Кинематическая схема канатного механизма выдвижения и втягивания секции № 3 стрелы автомобильного крана КС-55713-5К-1:

1 – шкивы блока каната выдвижения; 2 – верхняя ветвь каната выдвижения; 3 – гидроцилиндр; 4 – нижняя ветвь каната выдвижения; 5 – полушкив секции № 2; 6 – натяжители каната выдвижения; 7 – верхняя ветвь каната втягивания; 8 – нижняя ветвь каната втягивания; 9 – натяжитель каната втягивания; 10 – шкив каната втягивания; 11–13 – соответственно секции № 1–3

**Fig. 3.** Kinematic diagram of the cable mechanism for extending and retracting section No. 3 of the automobile crane boom KS-55713-5K-1:

1 – extension rope block sheaves; 2 – the upper branch of the extension rope; 3 – hydraulic cylinder; 4 – the lower branch of the extension rope; 5 – dead sheave of section No. 2; 6 – extension rope tensioners; 7 – the upper branch of the retraction rope; 8 – the lower branch of the retraction rope; 9 – pull-in rope tensioner; 10 – retraction rope sheave; 11–13 – respective sections No. 1–3

Канат втягивания охватывает шкив блока, закрепленного на секции № 2. Конец верхней ветви каната выдвижения закреплен на секции № 3, конец нижней ветви – на секции № 1 посредством натяжителя (см. рис. 3).

Канаты выдвижения и втягивания в компьютерной модели представлены телами каната (ТК), соединенными упруго-диссипативными элементами (УДЭ). Изгибная жесткость канатов не учитывается. Необходимые количества ТК  $N_1$  и  $N_2$  определяются соотношениями длин канатов ( $l_1$  и  $l_2$ ) и диаметров блоков ( $D_1$  и  $D_2$ ) механизмов выдвижения и втягивания:

$$N_1 > 3l_1 / D_1 \text{ и } N_2 > 3l_2 / D_2.$$

Если канаты выдвижения и втягивания имеют жесткость на растяжение  $E_1$  и  $E_2$  соответственно, то жесткость УДЭ с длинами в недеформированном состоянии  $l_{01}$  и  $l_{02}$  определяется формулами

$$C_1 = E_1 / l_{01}, \quad C_2 = E_2 / l_{02}.$$

Коэффициенты диссипации УДЭ определены по формулам

$$\mu_1 = \eta_1 / l_{10}, \quad \mu_2 = \eta_2 / l_{20},$$

где  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – коэффициенты вязкости при растяжении канатов выдвижения и втягивания.

Жесткости канатов  $E_1$  и  $E_2$ , коэффициенты вязкости  $\eta_1$  и  $\eta_2$  определяют по экспериментальным данным затухающих продольных колебаний образцов канатов. Силы предварительного натяжения канатов обеспечивают их растянутое состояние при всех режимах работы.

Для канатных блоков механизмов выдвижения и втягивания моменты сопротивления вращению  $M_{Ci}$  выражены через реакции подшипников блоков  $R_i$ :

$$M_{Ci} = R_i K_c, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где  $K_c$  – коэффициент сопротивления  $i$ -го канатного блока.

Моделирование грузового каната цепью ТК и УДЭ усложняет модель при увеличении кратности полиспаста. Существенно упростить модель полиспаста можно, если не учитывать изменение массы и жесткости каната полиспаста при изменении его длины, а рассмотреть только изменение длины полиспаста [10]. В этом случае модель полиспаста включает верхний блок, соединенный с нижним блоком поступательным шарниром.

При заторможенном барабане грузового каната поступательный шарнир обеспечивает изменение длины полиспаста  $\Delta_n$  по закону

$$\Delta_n(t) = \Delta_b(t) / K_n, \quad (2)$$

где  $t$  – время;  $K_n$  – кратность полиспаста;  $\Delta_b$  – изменение длины стрелы.

Каждая ветвь стропа представлена в модели отдельным УДЭ, учитывающем механические свойства самой стропы и каната полиспаста средней для рассматриваемой задачи длины.

Воздействие верхней ветви грузового каната на секцию № 3 представлено силой  $S_k$ :

$$S_k = R_n / K_n \zeta_n \text{ – при подъеме груза;} \quad (3)$$

$$S_k = R_n \zeta_n / K_n \text{ – при опускании груза,}$$

где  $R_n$  – реакция подшипников верхнего блока полиспаста,  $\zeta_n$  – коэффициент полезного действия полиспаста.

### Способ управления выдвижением секций

Для выдвижения и втягивания секций с заданной скоростью  $V$  усилие ГЦ  $F_h$  задано формулой

$$F_h = \gamma_0 + \gamma_1 (V - v_2), \quad (4)$$

где  $\gamma_0 = F_{h0} \sin(\pi t / 2t_0)$  при  $t \in [0, t_0]$ ;

$\gamma_0 = F_{h0} + (F_{hL} - F_{h0})t / T_0$  при  $t \in [t_0, T_0]$ ,

при этом

$$\gamma_0 = F_{h0} \text{ при } t \geq T_0. \quad (5)$$

Здесь  $F_{h0}$  и  $F_{hL}$  – значения силы  $F_h$ , необходимые для выдвижения секций при  $y = 0$  и  $y = L_0$ ;  $y$  – продольная координата секции № 2;  $L_0$  – величина необходимого выдвижения ГЦ;  $v_2$  – текущая скорость выдвижения секции № 2;  $t_0$  – длительность плавного

возрастания силы  $F_h$  от 0 до  $F_{h0}$ ;  $\gamma_1$  – коэффициент пропорциональности;  $T_0$  – время телескопирования.

Уравнение (4) соответствует замкнутой схеме управления, поскольку учитывает фактическую скорость выдвигания секции № 2.

В компьютерной модели зависимости (1)–(5) созданы с использованием мастера связи с внешними библиотеками.

### Программа моделирования телескопирования груза

Рассмотрим телескопирование груза на расстояние  $\Delta_b$  синхронным выдвиганием секций. Для удлинения стрелы на величину  $\Delta_b$  необходимо выдвигание ГЦ на величину  $L_o$ . Для трехсекционной стрелы с канатным механизмом  $L_o = \Delta_b / 2$ .

Представим скорость выдвигания секции № 2  $V$  как функцию времени  $t$ . Правила эксплуатации [9] ограничивают скорость выдвигания ГЦ величиной 0,25 м/с.

Пусть при одноэтапном телескопировании

$$V = V_m \sin(k_1 t), \quad (6)$$

где  $V_m$  – максимальная скорость выдвигания ГЦ.

Тогда перемещение секции № 2  $y$  определяется формулой  $y = (V_m / k_1)[1 - \cos(k_1 t)]$ .

Если заданы перемещение ГЦ  $L_o$  и время телескопирования  $T_0$ , то  $k_1 = \pi / T_0$ ,  $V_m = \pi L_o / 2 T_0$ .

Если заданы  $L_o$  и  $V_m$ , то вычислим  $T_0 = \pi L_o / 2 V_m$

и  $k_1 = 2V_m / L_o$ .

Ускорение секции № 2 определяется формулой  $a = V_m k_1 \cos(k_1 t)$ . Максимальной величины  $a_{max} = \pi V_m / T_0$  ускорение секции № 2 достигает в начале и конце движения (при  $t = 0$ ,  $t = T_0$ ).

При трехэтапном телескопировании с постоянными ускорением и замедлением на 1 и 3 этапах:

$$V = V_m t / t_1 \text{ при } t \in [0, t_1];$$

$$V = V_m \text{ при } t \in [t_1, t_1 + t_2]; \quad (7)$$

$$V = V_m [1 - (t - t_1 - t_2) / t_3] \text{ при } t \in [t_1 + t_2, T_0].$$

Здесь  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  – длительности 1, 2 и 3 этапов.

Если заданы длины трех участков выдвигания  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$  ( $L_o = y_1 + y_2 + y_3$ ) и  $V_m$ , то вычислим длительности этапов и время телескопирования:

$$t_1 = 2y_1 / V_m, \quad t_2 = y_2 / V_m, \quad t_3 = 2y_3 / V_m, \quad (8)$$

$$T_0 = (2y_1 + y_2 + 2y_3) / V_m.$$

Если заданы длительности этапов, то вычислим длины трех этапов и величину выдвигания ГЦ:

$$y_1 = V_m t_1 / 2, \quad y_2 = V_m t_2, \quad y_3 = V_m t_3 / 2, \quad (9)$$

$$L_o = V_m (t_1 / 2 + t_2 + t_3 / 2).$$

Максимальное ускорение  $a_{max} = V_m / t_1$  или  $a_{max} = V_m / t_3$  секция № 2 имеет на 1 или 3 этапе.

При трехэтапном телескопировании с переменными ускорением и замедлением на 1 и 3 этапах:

$$V = V_m [1 - \cos(\omega_1 t)] / 2 \text{ при } t \in [0, t_1]; \quad (10)$$

Таблица 1. Исходные данные для моделирования (одинаковые для всех расчетов)

Table 1. Initial data for modeling (the same for all calculations)

Наименование (и обозначение) параметра	Размерность	Значение
Масса секции № 1, 2 и 3	кг	1 200, 1 000, 800
Масса крюковой подвески с нижним блоком полиспаста	кг	300
Масса элемента каната	кг	0,27
Длина груза	м	2
Длина ветви стропа	м	1,47
Коэффициенты трения покоя и скольжения	–	0,155; 0,15
Скорость Стрибека	м/с	0,001
Коэффициент контактной жесткости опор скольжения секций	Н/м	1,0e8
Коэффициент демпфирования контакта опор скольжения секций	Н·с/м	3000
$C_1$ и $C_2$ – жесткость УДЭ канатов выдвигания и втягивания	Н/м	9,25e7; 6,1e7
$\mu_1$ и $\mu_2$ – коэффициенты диссипации УДЭ канатов выдвигания и втягивания	Н·с/м	5 600
Коэффициент жесткости контакта каната со шкивом	Н/м	1,0e7
Коэффициент демпфирования контакта каната со шкивом	Н·с/м	500
$K_c$ – коэффициент сопротивления канатного блока	м	2,0e-4
Жесткость ветви стропа	Н/м	9,0e6
Коэффициент демпфирования ветви стропа	Н·с/м	140
$K_n$ – кратность полиспаста	–	6
$\zeta_n$ – коэффициент полезного действия полиспаста	–	0,95
$t_0$ – длительность плавного возрастания силы $F_h$	с	0,5
$V_m$ – максимальная скорость выдвигания ГЦ	м/с	0,2

$$V = V_m \text{ при } t \in [t_1, t_1 + t_2);$$

$$V = V_m [1 + \cos(\omega_2(t - t_1 - t_2))]/2$$

при  $t \in [t_1 + t_2, T_0]$ .

Здесь  $\omega_1 = \pi/t_1$ ,  $\omega_2 = \pi/t_3$ .

Если заданы длины участков выдвижения, то длительности этапов и время телескопирования вычислим по формулам (8). Если заданы длительности этапов, то длины этапов и величину выдвижения ГЦ вычислим по формулам (9).

Максимальной величины  $a_{max} = \pi V_m / 2t_1$  или  $a_{max} = \pi V_m / 2t_3$  ускорение секции № 2 достигает в середине 1 или 3 этапа.

При трехэтапных режимах телескопирования для сокращения времени выдвижения необходимо сократить длительности  $t_1$  и  $t_3$  по сравнению с  $t_2$ , хотя это приводит к увеличению ускорений секций и большему раскачиванию груза.

Для сравнения разных законов изменения скорости секции № 2 проведем моделирование телескопирования груза и сравним точность позиционирования стрелы, максимальное горизонтальное отклонение центра груза  $\Delta_{max}$ , максимальный угол перекоса груза в вертикальной плоскости  $\Theta_{max}$ . Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1 и 2.

Рассмотрим два значения угла  $\beta$ :  $19,2^\circ$  и  $45^\circ$ . При  $\beta = 19,2^\circ$  груз массой 1 т можно телескопировать на 10 м, при  $\beta = 45^\circ$  на 10 м можно телескопировать груз массой 2 т [9].

Помимо зависимостей (6), (7) и (10) скорость выдвижения секции № 2  $V$  представим также как функцию перемещения секции № 2  $y$ . Например, при одноэтапном телескопировании

$$V = V_m \sin(k_1 y). \quad (11)$$

Аналогично, в формулах (5)–(10) аргумент  $t$  необходимо заменить на  $y$ , параметры  $t_1, t_2, t_3$  – на  $y_1, y_2, y_3$ .

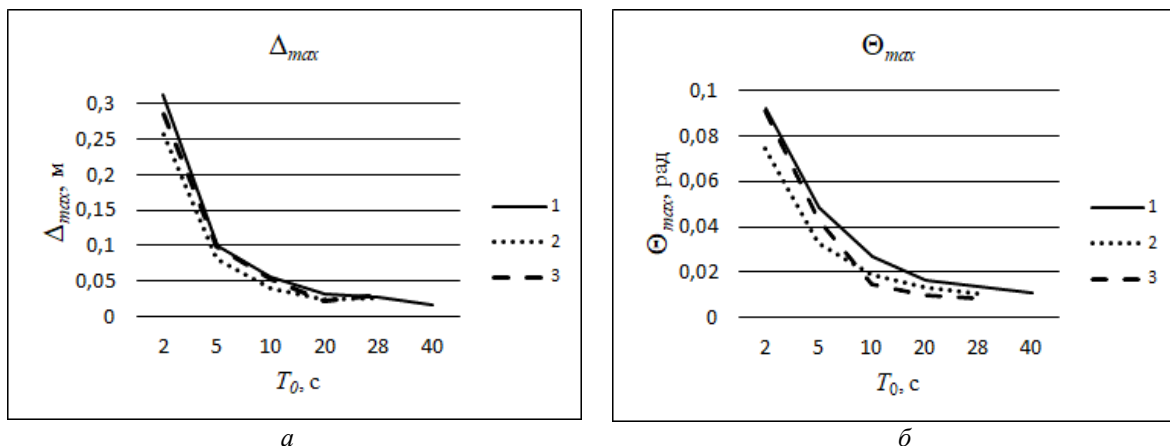
### Результаты моделирования

Далее приведены зависимости максимального горизонтального отклонения центра груза  $\Delta_{max}$  (м) и максимального угла перекоса груза в вертикальной плоскости  $\Theta_{max}$  (рад) от длительности телескопирования  $T_0$  (с) при  $\beta = 19,2^\circ$  (рис. 4). Длина полиспафта 0,8 м постоянна во время движения.  $F_{h0} = 20$  кН,  $F_{hL} = 30\text{--}40$  кН,  $\gamma_1 = 2,5$  МН·с/м.

Максимальная погрешность позиционирования составляет 0,8 % для одноэтапного режима, 1,0 % для трехэтапного режима с постоянным ускорением и 1,3 % для трехэтапного режима с переменным ускорением. Погрешность позиционирования обу-

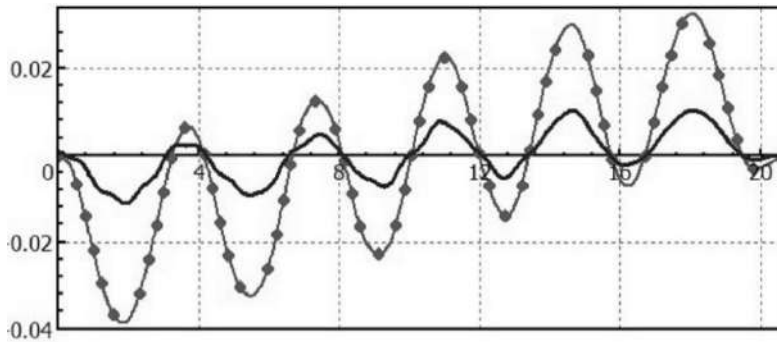
**Таблица 2.** Величины интервалов времени  $t_1, t_2, t_3$  трехэтапных режимов  
**Table 2.** Values of time intervals  $t_1, t_2, t_3$  of three-stage modes

$T_0$ , с	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с
2	1	0	1
5	2,5	1	1,5
10	5	1	4
20	10	2	8
28	20	2	6



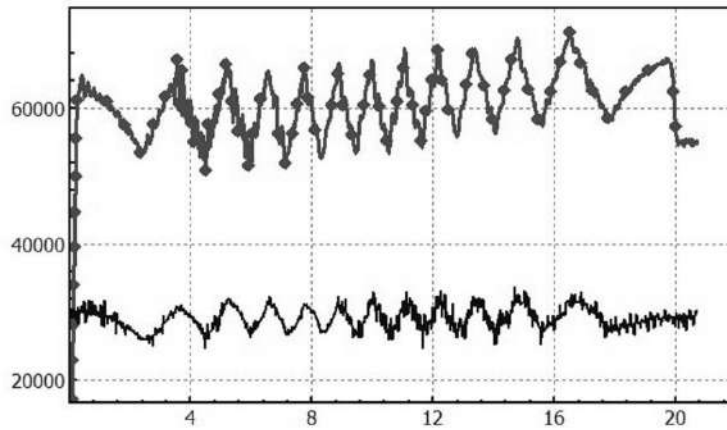
**Рис. 4.** Зависимости  $\Delta_{max}$  (а) и  $\Theta_{max}$  (б) от длительности телескопирования  $T_0$ :  
1 – одноэтапный режим; 2 – трехэтапный режим с постоянным ускорением;  
3 – трехэтапный режим с переменным ускорением

**Fig. 4.** Dependences of  $\Delta_{max}$  (a) and  $\Theta_{max}$  (b) on the duration of telescoping  $T_0$ :  
1 – one-stage mode; 2 – three-stage mode with constant acceleration;  
3 – three-stage mode with variable acceleration



**Рис. 5.** Зависимости  $\Delta$  (маркированная линия) и  $\Theta$  от времени при  $T_0 = 20$  с и  $\beta = 45^\circ$

**Fig. 5.** Dependences of  $\Delta$  (marked line) and  $\Theta$  on time at  $T_0 = 20$  s and  $\beta = 45^\circ$



**Рис. 6.** Зависимости сил  $F_h$  (маркированная линия) и  $S_1$  (Н) от времени (с) при  $T_0 = 20$  с и  $\beta = 45^\circ$

**Fig. 6.** Dependences of the forces  $F_h$  (marked line) and  $S_1$  (N) on time (s) at  $T_0 = 20$  s and  $\beta = 45^\circ$

словлена отличием фактической скорости движения секций от заданной и может быть уменьшена уточнением значений  $F_{h0}$  и  $F_{hL}$ .

На (рис. 5) приведены зависимости горизонтального отклонения центра груза  $\Delta$  (м) и угла перекоса груза в вертикальной плоскости  $\Theta$  (рад) от времени (с) для одноэтапного режима при  $T_0 = 20$  с и  $\beta = 45^\circ$ . Начальная длина полиспаста 2,3 м уменьшается во время движения по закону (2), а  $F_{h0} = 70$  кН,  $F_{hL} = 55\text{--}65$  кН,  $\gamma_1 = 2,5$  МН·с/м.

Отрицательные значения  $\Delta$  в первой половине движения (см. рис. 5) соответствуют отклонению груза против направления движения секций. Положительные значения  $\Delta$  во второй половине движения соответствуют отклонению груза по направлению движения секций.

В начальной трети движения укорочение полиспаста небольшое, и разница перекосов и смещений груза незначительна (менее 0,5 %) по сравнению с полиспастом постоянной длины. В последней трети движения укорочение полиспаста заметное, и разница перекосов и смещений груза более существенна ( $\Theta_{max}$  уменьшилось на 1,9 %, а  $\Delta_{max}$  – на 14,3 %) по сравнению с полиспастом постоянной длины.

На (рис. 6) приведены зависимости изменения силы ГЦ  $F_h$  (Н) и силы растяжения каната выдвижения  $S_1$  (Н) от времени (с) для одноэтапного режима при  $T_0 = 20$  с и  $\beta = 45^\circ$ .

Период осцилляций силы ГЦ  $F_h$  в начале и конце движения равен 3,3 с и совпадает с периодом колебаний груза. В середине движения период осцилляций силы  $F_h$  равен 1,1 с, размах осцилляций составляет 13,4 кН, среднее значение – 60,3 кН. Силы  $F_h$  и  $S_1$  изменяются синхронно. В начале и конце движения осцилляции силы  $F_h$  вызваны колебаниями груза, в середине движения – продольными колебаниями секций.

Общей тенденцией является снижение колебаний груза при использовании 3 режима движения по сравнению с режимами 1 и 2, хотя величины  $\Delta_{max}$  и  $\Theta_{max}$  в большей мере зависят от ускорения движения секций, чем от закона движения.

Для того чтобы сократить время телескопирования при трехэтапных режимах длительность 1 и 3 этапов должны быть минимальны и обеспечивать допустимые отклонения и перекосы груза. Длительность 2 этапа можно подобрать так, чтобы уменьшить колебания груза в конце телескопирования.

Зависимость скорости секции № 2 как функции перемещения  $y$  (11) замедляет движение секций по сравнению с зависимостью  $V(t)$  примерно в 1,5 раза при указанных параметрах. Для сокращения времени телескопирования требуется большая разница скоростей ( $V - v_2$ ) или большее отношение  $\gamma_0/\gamma_1$ . В целом, использование зависимости  $V(y)$  менее эффективно, чем  $V(t)$ .

### Заключение

Разработана компьютерная динамическая модель телескопической стрелы с грузом, позволяющая определять параметры раскачивания груза на канате при различных законах управления силой ГЦ выдвигания секций с учетом механических характеристик канатов, секций и их контактного взаимодействия.

Проведено моделирование движения телескопической стрелы с грузом с одноэтапным и трехэтапными режимами управления, с зависимостью скорости выдвигания от времени и от перемещения. Моделирование показало, что максимальная погрешность позиционирования составляет 0,8 % для одноэтапного режима, 1,0 % для трехэтапного режима с постоянным ускорением и 1,3 % для трехэтапного режима с переменным ускорением. Погрешность позиционирования обусловлена отличием фактической скорости движения секций от заданной и мо-

жет быть уменьшена уточнением значений силы ГЦ  $F_{h0}$  и  $F_{hL}$ .

Общей тенденцией является снижение колебаний груза при использовании трехэтапного режима движения с переменным ускорением по сравнению с двумя другими рассмотренными режимами, хотя максимальные значения отклонения и угла перекоса груза  $\Delta_{max}$  и  $\Theta_{max}$  в большей мере зависят от ускорения движения секций, чем от закона движения.

Использование зависимости скорости выдвигания от перемещения  $V(y)$  замедляет движение секций примерно в 1,5 раза по сравнению с зависимостью от времени  $V(t)$ . В целом, использование зависимости  $V(y)$  для управления усилием ГЦ выдвигания менее эффективно, чем зависимости  $V(t)$ .

Выявлено квазипериодическое изменение силы выдвигания ГЦ  $F_h$  относительно задаваемого управления (4). В начале и конце движения осцилляции силы  $F_h$  вызваны колебаниями груза, в середине движения – продольными колебаниями секций.

Компьютерную модель и установленные закономерности телескопирования грузов целесообразно использовать при проектировании монтажных операций, осуществляемых грузоподъемными кранами с телескопическими стрелами.

### Список литературы

1. An anti-swing and positioning controller for overhead cranes based on multi-sliding mode method / W. Xu, B. Liu, J. Chu et al. // *Advanced Materials Research* Vol. 468–471. P. 328–334. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.328.
2. Sorensen K., Singhose W., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes // *Control Eng. Pract.* 2007. Vol. 15. P. 825–837. DOI:10.1016/j.conengprac.2006.03.005.
3. Корытов М.С., Щербаков В.С., Титенко В.В. Аналитическое решение задачи разгона груза мостовым краном с постоянным ускорением при гашении колебаний грузового каната // *Динамика систем, механизмов и машин.* 2017. Т. 5, № 4. С. 132–135. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-132-136.
4. Singhose W., Kim D., Kenison M. Input shaping control of double-pendulum bridge crane oscillations // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 2008. Vol. 130. DOI:10.1115/1.2907363.
5. Vaughan J., Kim D., Singhose W. Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2010. Vol. 18. P. 1345–1358. DOI:10.1109/TCST.2010.2040178.
6. Saeidi H., Naraghi M., Raie A. A neural network self-tuner based on input shapers behavior for anti-sway system of gantry cranes // *Journal of Vibration and Control.* 2013. Vol. 19. P. 1936–1949. DOI: 10.1177/1077546312453065.
7. Программа ввода данных. Руководство пользователя. URL: [http://www.universalmecanism.com/download/80/rus/03\\_um\\_data\\_input\\_program.pdf](http://www.universalmecanism.com/download/80/rus/03_um_data_input_program.pdf) (дата обращения 21.12.2020).
8. Шестеров Ю.В. Моделирование выдвигания секций телескопической стрелы крана // *Инновационное развитие подъемно-транспортной техники : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Брянск : Изд-во Брян. гос. техн. ун-та, 2019. С. 55–60.*
9. Кран автомобильный КС-55713-5К-1. Руководство по эксплуатации КС-55713-5К-1.00.000 РЭ. URL: <http://oaokaz.ru/catalog/avtokran/KS-55713-5K-1> (дата обращения 21.08.2020).
10. Реутов А.А. Динамическая модель полиспафта механизма подъема груза // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. Курск : Юго-Запад. гос. ун-т, 2015. Т. 3. С. 391–394.*
11. Tuan L.A., Soon-Geul L., Moon S.C. Partial feedback linearization and sliding mode techniques for 2D crane control // *Transactions of the Institute of Measurement and Control covers applications in instrumentation and control.* 2014. Vol. 36. P. 78–87. DOI: 10.1177/0142331213492369.
12. Pai M.C. Closed-loop input shaping control of vibration in flexible structures via adaptive sliding mode control // *Shock and Vibration.* 2012. Vol. 19. P. 221–233. DOI: 10.1155/2012/803479
13. An optimal performance control scheme for a 3D gantry crane / M.J. Maghsoudi, Z. Mohamed, A.R. Husain et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2016. Vol. 66–67. P. 756–768. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.05.020.



14. Yang T., Singhose W. Combined input shaping and feedback control for double-pendulum systems / R. Mar, A. Goyal, V. Nguyen et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 85. P. 267–277. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.08.012.
15. Duc V., Trong K. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 116. P. 310–321. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.06.056.

### References

- Xu W., Liu B., Chu J., Zhou X. An anti-swing and positioning controller for overhead cranes based on multi-sliding mode method // *Adv. Mater. Res.*, 2012. Pp. 468–471, 328–334. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.328.
- Sorensen K., Singhose W., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes [Electronic media] // *Control Eng. Pract.*, 2007. Vol. 15. Pp. 825–837. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.03.005>.
- Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V. Analiticheskoe reshenie zadachi razgona gruza mostovym kranom s postoyannym uskoreniem pri gashenii kolebaniy gruzovogo kanata [Analytical solution of the problem of acceleration of a load by an overhead crane with constant acceleration when damping oscillations of a cargo rope] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2017. Vol. 5. No. 4. Pp. 132–135. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-132-136.
- Singhose W., Kim D., Kenison M. Input shaping control of double-pendulum bridge crane oscillations [Electronic media] // *J. Dyn. Syst. Meas. Control – Trans. ASME*, 2008. Vol. 130. 034504–034504-7. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2907363>.
- Vaughan J., Kim D., Singhose W. Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2010. Vol. 18. Pp. 1345–1358. DOI: 10.1109/TCST.2010.2040178.
- Saeidi H., Naraghi M., Raie A. A neural network self-tuner based on input shapers behavior for antisway system of gantry cranes // *J. Vib. Control*, 2013. Vol. 19. Pp. 1936–1949. DOI: 10.1177/1077546312453065.
- Programma vvoda dannykh. Rukovodstvo pol'zovatelya [Data input program. User's manual] [Electronic media]. URL: [http://www.universalmechanism.com/download/80/en/03\\_um\\_data\\_input\\_program.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/80/en/03_um_data_input_program.pdf) (Accessed December 21, 2020).
- Shesterov Yu.V. Modelirovaniye vydvizheniya sektsii teleskopicheskoi strely krana [Modeling the extension of sections of a telescopic boom of a crane] // *Innovatsionnoye razvitiye pod'emno-transportnoi tekhniki: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Innovative development of lifting and transport equipment: materials of the All-Russian scientific-practical conf.]. Bryansk: Bryansk State Technical University Publ., 2019. Pp. 55–60.
- Kran avtomobil'nyi KS-55713-5K-1. Rukovodstvo po ekspluatatsii KS-55713-5K-1.00.000 RE [Automobile crane KS-55713-5K-1. Operating manual KS-55713-5K-1.00.000 RE] [Electronic media]. URL: <http://oakaz.ru/catalog/avtokran/KS-55713-5K-1> (Accessed August 21, 2020).
- Reutov A.A. Dinamicheskaya model' polispasta mekhanizma pod'ema gruza: sb. nauch. tr. XII Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. «Sovremennyye instrumental'nye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii» 19–20 marta 2015. [The dynamic model of the chain hoist mechanism for lifting the load] // [Scientific works of the XII-th Intern. Scientific and Practical. Conf. "Modern instrumental systems, information technology and innovation" March 19–20, 2015]. Kursk: South-West State University, 2015. Vol. 3. Pp. 391–394.
- Tuan L.A., Soon-Geul L., Moon S.C. Partial feedback linearization and sliding mode techniques for 2D crane control. *Trans. Inst. Meas. Control*, 2014. Vol. 36. Pp. 78–87.
- Pai M.C. Closed-loop input shaping control of vibration in flexible structures via adaptive sliding mode control. *Shock Vib.*, 2012. Vol. 19. Pp. 221–233.
- Maghsoudi M.J., Mohamed Z., Husain A.R., Tokhi M.O. An optimal performance control scheme for a 3D gantry crane. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2016. Vol. 66–67. Pp. 756–768.
- Mar R., Goyal A., Nguyen V., Yang T., Singhose W. Combined input shaping and feedback control for double-pendulum systems. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2017. Vol. 85. Pp. 267–277.
- Duc V., Trong K. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2019. Vol. 116. Pp. 310–321.

### Информация об авторах

**Реутов Александр Алексеевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и оборудования, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, e-mail: bgtu2012@yandex.ru

### Information about the authors

**Aleksandr A. Reutov** – Doctor of Engineering Science, Professor, the Subdepartment of Transport and Handling Machines and Equipment, Bryansk State Technical University, Bryansk, e-mail: bgtu2012@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).32-43

УДК 621.924.93

## Разработка и исследование математической модели установки гидроабразивной резки

Ш. С. Нозирзода ✉

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Российская Федерация

✉ shoni\_1997@mail.ru