

ВЕСТНИК ПНИПУ. ГЕОЛОГИЯ. НЕФТЕГАЗОВОЕ И ГОРНОЕ ДЕЛО
BULLETIN OF PNRPU. GEOLOGY. OIL & GAS ENGINEERING & MINING
ISSN 2224-9923
Том / Volume 15 №21 2016
<http://vestnik-pstu.ru/geo/>

УДК 621.87

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

УТОЧНЕННЫЙ АНАЛИЗ И МИНИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТАХ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

В.С. Ловейкин, Ю.В. Човнюк, И.А. Кадыкало

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины (03127, Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 12в)

UPDATED ANALYSIS AND MINIMIZATION OF DYNAMIC LOADS IN ELASTIC ELEMENTS OF LIFTING EQUIPMENT

V.S. Loveikin, Yu.V. Chovniuk, I.A. Kadykalo

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (12v Geroev Oborony str., Kiev, 03127, Ukraine)

Получена / Received: 19.07.2016. Принята / Accepted: 31.10.2016. Опубликовано / Published: 02.12.2016

Ключевые слова:

уточнение, анализ, минимизация, динамические нагрузки, упругие элементы, грузоподъемные машины, канаты, режимы движения, «с веса», «с подхватом», подъем.

Исследованы закономерности развития динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин, которые в условиях реальной эксплуатации необходимо минимизировать.

Проведен уточненный анализ динамических нагрузок в канатах кранов и определены условия, при которых они могут быть минимизированы.

Обоснованы режимы движения груза на упругом канате грузоподъемного крана, при которых минимизируется коэффициент динамичности K_d , а приводной механизм осуществляет при этом оптимальные движения. При этом использованы методы классического вариационного исчисления и аппарат дифференциальных уравнений (обыкновенных), а расчеты осуществлены для двух классических способов подъема груза (с веса и с подхватом).

Проведен уточненный динамический анализ и минимизированы нагрузки, которые возникают в упругих элементах (канатах) грузоподъемных машин, в рамках двухмассовой модели. При этом рассмотрены способы подъема груза с веса и с подхватом для различных возможных режимов движения приводного механизма на участке пуска.

Обоснованы модели подъема груза с веса и с подхватом, которые минимизируют динамические нагрузки в канате грузоподъемного крана, в период его пуска ($t \in [0, t_p]$).

Полученные в работе результаты могут в дальнейшем быть использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчета режимов движения грузоподъемных кранов и их элементов (при подъеме с веса или с подхватом), которые минимизируют нагрузку в канатах при оптимальных режимах движения привода как на стадиях проектирования (конструирования) подобных систем, так и в режимах их реальной эксплуатации

Keywords:

update, analysis, minimization, dynamic loads, elastic elements, lifting machines, ropes, movement modes, "hanging", "with pickup", lifting.

Dynamic loads regularities in elastic elements of the load-lifting machines were analyzed, in conditions of actual use they should be minimized.

An updated analysis of dynamic loads in crane ropes was conducted and conditions of loads minimization were determined. Modes of load movement on elastic rope of lifting crane were substantiated. In these modes dynamic factor KD minimizes and drive mechanism performs optimum movements. At the same time methods of classical variational calculus and apparatus of differential equations (ordinary) were used, and the calculations were carried out for two classic ways of load lifting ("hanging" and "with pickup").

The updated dynamic analysis was conducted and loads that arise in elastic elements (ropes) of lifting equipment were minimized within the two-mass model. At the same time methods of load lifting "hanging" and "with pickup" were considered for various possible modes of drive mechanism motion in the starting area.

Models for load lifting "hanging" and "with pickup" which minimizes the dynamic loads in the rope of the crane in its launching period ($t \in [0, t_p]$) were justified.

The results obtained can later be used to update and improve existing engineering methods for movement mode's calculation of lifting cranes and their components (when lifting is "hanging" or "with pickup"), these modes minimize the rope load at optimal modes of drive motion as at the design (construction) stage of such systems, as well during their real operation.

Ловейкин Вячеслав Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования машин и оборудования, вице-президент Подъемно-транспортной академии наук Украины (тел.: 044 527 87 34, e-mail: lovvs@ukr.net).

Човнюк Юрий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования машин и оборудования, академик Подъемно-транспортной академии наук Украины (тел.: 044 527 87 34, e-mail: ychovnyuk@ukr.net).

Кадыкало Иван Александрович – аспирант кафедры конструирования машин и оборудования (тел.: 044 527 87 34, e-mail: kadykaloivan@nubip.edu.ua). Контактное лицо для переписки.

Viacheslav S. Loveikin – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Machinery and Equipment Construction, Vice President of the Ukrainian Academy of Lifting-Transport Sciences (tel.: 044 527 87 34, e-mail: lovvs@ukr.net).

Iurii V. Chovniuk – PhD of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Machinery and Equipment Construction, Academician of the Ukrainian Academy of Lifting-Transport Sciences (tel.: 044 527 87 34, e-mail: ychovnyuk@ukr.net).

Ivan A. Kadykalo – postgraduate student at the Department of Machinery and Equipment Construction (tel.: 044 527 87 34, e-mail: kadykaloivan@nubip.edu.ua). The contact person for correspondence.

Постановка проблемы

Известно [1–5], что динамические нагрузки в упругих элементах гибких рабочих органов (например в канатах), в приводе и металлоконструкциях грузоподъемных машин существенно влияют на их производительность, надежность функционирования. Кроме того, от указанных нагрузок существенно зависит и точность выполнения такими машинами различных разгрузочных, погрузочных, транспортных и монтажных операций. Следует отметить, что величина динамических нагрузок является функцией участка движения грузоподъемного механизма или машины в целом. Особенно значительные перегрузки возникают на участках переходных процессов (в частности при пуске, торможении, реверсировании движения). Поэтому проблема минимизации динамических нагрузок в упругих элементах (канатах) грузоподъемных машин является актуальной и требует углубленного всестороннего исследования с целью ее решения.

Анализ публикаций по теме исследования

Исследованию проблемы минимизации динамических нагрузок в упругих элементах (канатах) грузоподъемных машин посвящено много работ, в частности [1–25]. Так, автор [4] утверждает, что при торможении в процессе спуска груза коэффициент динамичности (K_d) в канатах кантовых механизмов может превышать 2,5.

Для уменьшения этих нагрузок существует выбор необходимых режимов движения приводных механизмов на участках переходных процессов [2]. В [3] проведена минимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин, которая основана на использовании специальных режимов движения приводных механизмов [2], позволяет существенно уменьшить величину коэффициента динамичности K_d . Однако в данном исследовании минимизация нагрузок в канатах грузоподъемных кранов осуществлена на основе другого критерия качества движения системы, который использует режимы движения привода, предложенные в [2], и одновременно минимизирует собственно коэффициент K_d .

Основное содержание исследования

На схеме динамической модели механизма подъема груза (рис. 1) с веса приняты следующие

обозначения: m_1 , m_2 – сведены к подъемному канату массы соответственно приводного механизма с барабаном и груза; x_1 , x_2 – обобщенные координаты соответственно масс m_1 и m_2 ; F_2 – вес груза, $F_2 = m_2g$; g – ускорение свободного падения; F_1 – движущая сила привода (и F_1 , и F_2 сведены к грузовому канату); C – жесткость каната.

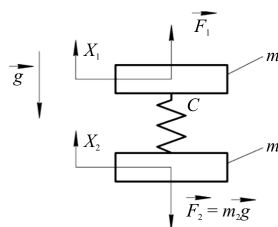


Рис. 1. Динамическая модель механизма подъема груза «с веса»

Уравнения движения рассматриваемой модели механизма подъема груза «с веса» выглядят [3] так:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = F_1 - C(x_1 - x_2); \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = C(x_1 - x_2) - m_2g. \end{cases} \quad (1)$$

Систему (1) можно легко свести к одному дифференциальному уравнению четвертого порядка для x_2 :

$$x_2^{(IV)} + k^2 \cdot \ddot{x}_2 = k^2 \cdot a, \quad (2)$$

где k – частота собственных колебаний выбранной динамической модели механизма подъема

груза с веса, $k = \left\{ C \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$; a – функция

ускорения того или иного режима движения приводного механизма, которая зависит от времени t и приведена в [2, 3], $a = a(t)$. Уравнение (2) получено с учетом того, что движущая сила привода определяется зависимостью $F_1 = F_2 + (m_1 + m_2)a = m_2g + (m_1 + m_2)a$.

Решение (2) зависит от вида правой части, определяется режимом движения приводного механизма [2, 3]. В указанных работах рассмотрены следующие возможные режимы движения приводного механизма на участке пуска: 1) режим движения с постоянным ускорением, который минимизирует величину движущего момента привода: $a(t) = a_1 = \frac{V_y}{t_p} = \text{const}$, где V_y –

скорость установившегося движения груза во время подъема; t_p – продолжительность

разгона груза; 2) режим движения с линейным изменением ускорения, который минимизирует динамическую составляющую мощности привода:

$$a(t) = a_2(t) = \frac{2V_y}{t_p} \left(1 - \frac{t}{t_p} \right); \quad 3) \text{ режим}$$

движения с изменением ускорения по кривой третьего порядка:

$$a(t) = a_3(t) = \frac{12V_y}{t_p} \left(\frac{t}{t_p} - 2\frac{t^2}{t_p^2} + \frac{t^3}{t_p^3} \right);$$

4) режим движения с изменением ускорения по кривой пятого порядка:

$$a(t) = a_4(t) = \frac{60V_y}{t_p} \left(1 - \frac{t}{t_p} \right)^3 \frac{t^2}{t_p^2}.$$

Последние два режима движения привода дают плавное изменение ускорения приводного механизма, обеспечивающего уменьшение колебаний динамических нагрузок в упругих элементах (канатах) грузоподъемного крана.

Критерий качества движения системы сводится к следующему:

$$\int_0^{t_p} K_d^2(t) dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\text{где } K_d = \frac{C(x_1 - x_2)}{m_2 g} = \frac{m_2 \ddot{x}_2 + m_2 g}{m_2 g} = 1 + \frac{\ddot{x}_2}{g}. \quad (4)$$

В данном случае значение K_d было получено из второго уравнения системы (1). Если использовать критерий (3) с подставкой (4), тогда получим

$$\int_0^{t_p} \left\{ 1 + \frac{\ddot{x}_2}{g} \right\}^2 dt \rightarrow \min. \quad (5)$$

Используя аппарат классического вариационного исчисления, можно легко определить необходимое условие реализации критерия (5) в виде уравнения Эйлера–Пуассона:

$$x_2^{(IV)} = 0. \quad (6)$$

Если сопоставить (6) с более общим уравнением движения системы (2), получим

$$\begin{cases} x_2^{(IV)} = 0; \\ x_2^{(IV)} + k^2 \ddot{x}_2 = k^2 a(t); \end{cases} \Rightarrow \ddot{x}_2 = a(t) \Rightarrow \ddot{a}(t) \equiv 0. \quad (7)$$

Тогда выражение для $K_d(t)$ приобретает вид

$$K_d(t) = 1 + \frac{a(t)}{g}. \quad (8)$$

Минимальное значение K_d будет определяться только функцией $a(t)$:

$$\int_0^{t_p} [K_d(t)]^2 dt \rightarrow \min \Rightarrow \int_0^{t_p} \left[1 + \frac{a(t)}{g} \right]^2 dt \rightarrow \min. \quad (9)$$

Однако, по мнению авторов данного исследования, такой подход не обеспечивает наименьшего значения $K_d(t)$ в течение $t \in [0, t_p]$, поскольку, исходя из (7), должно выполняться соотношение для $a(t)$, которое справедливо только для первого и второго режимов движения приводного механизма. Поэтому следует использовать при установлении критерия качества движения типа (5) не только второе уравнение системы (1), но и первое, т.е. необходимо $\ddot{x}_2$ выразить через $a(t)$ и $x_2^{(IV)}$ из уравнения (2), которое описывает все особенности движения системы в целом. Итак, будем иметь с (2) и (5)

$$\begin{aligned} \int_0^{t_p} \left[1 + \frac{1}{g} \left(\frac{k^2 a(t) - x_2^{(IV)}}{k^2} \right) \right]^2 dt = \\ = \int_0^{t_p} \left[1 + \frac{a(t)}{g} - \frac{x_2^{(IV)}}{gk^2} \right]^2 dt \Rightarrow \min. \end{aligned} \quad (10)$$

Необходимым условием реализации (10) – критерия качества движения – является уравнение Эйлера–Пуассона:

$$x_2^{(VIII)} = k^2 \cdot a^{(IV)}. \quad (11)$$

Для первого, второго и третьего режимов движения приводного механизма ($i = \overline{1,3}$) имеем: $a^{(IV)}(t) \equiv 0$. Только для четвертого

$$\text{режима } a^{(IV)}(t) = \frac{60V_y}{t_p^5} \left\{ 72 - 120 \frac{t}{t_p} \right\}.$$

Для решения (11) необходимо задавать соответствующие начальные условия:

$$\begin{cases} x_2|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_2|_{t=0} = 0; \quad \ddot{x}_2|_{t=0} = 0; \\ \ddot{x}_2|_{t=0} = 0; \quad x_2^{(IV)}|_{t=0} = k^2 a(0); \\ x_2^{(V)}|_{t=0} = k^2 \dot{a}(0); \quad x_2^{(VI)}|_{t=0} = k^2 \ddot{a}(0); \\ x_2^{(VII)}|_{t=0} = k^2 \ddot{\ddot{a}}(0). \end{cases} \quad (12)$$

Для нахождения конкретных значений производных $x_2(t)$ по времени (t) при $t = 0$ следует найти $a_i(0)$, $\dot{a}_i(0)$, $\ddot{a}_i(0)$, $\ddot{\ddot{a}}_i(0)$ для $a_i(t)$,

$i = \overline{(1,4)}$. Определяются эти величины соотношениями

$$\begin{cases} a_1(0) = \frac{V_y}{t_p}; \dot{a}_1(0) = 0; \ddot{a}_1(0) = 0; \\ \ddot{a}_1(0) = 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} a_2(0) = \frac{2V_y}{t_p}; \dot{a}_2(0) = -\frac{2V_y}{t_p^2}; \ddot{a}_2(0) = 0; \\ \ddot{a}_2(0) = 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} a_3(0) = 0; \dot{a}_3(0) = \frac{12V_y}{t_p^2}; \ddot{a}_3(0) = -\frac{48V_y}{t_p^3}; \\ \ddot{a}_3(0) = \frac{72V_y}{t_p^4}; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} a_4(0) = 0; \dot{a}_4(0) = 0; \ddot{a}_4(0) = \frac{120V_y}{t_p^3}; \\ \ddot{a}_4(0) = -\frac{1080V_y}{t_p^4}. \end{cases} \quad (16)$$

Чтобы решить уравнение (11) при начальных условиях (12) для режимов движения привода $i = \overline{(1,3)}$, используем следующую запись $x_2^{(i)}(t)$:

$$\begin{aligned} x_2^{(i)}(t) = & \alpha_0^{(i)} + \alpha_1^{(i)} \cdot t + \alpha_2^{(i)} \cdot t^2 + \alpha_3^{(i)} \cdot t^3 + \\ & + \alpha_4^{(i)} \cdot t^4 + \alpha_5^{(i)} \cdot t^5 + \alpha_6^{(i)} \cdot t^6 + \alpha_7^{(i)} \cdot t^7, \end{aligned} \quad (17)$$

где $i = \overline{(1,3)}$. С учетом условий (12) выражения (17) существенно упрощаются:

$$x_2^{(i)}(t) = \alpha_4^{(i)} \cdot t^4 + \alpha_5^{(i)} \cdot t^5 + \alpha_6^{(i)} \cdot t^6 + \alpha_7^{(i)} \cdot t^7 \quad i = \overline{(1,3)}. \quad (18)$$

При этом

$$\begin{cases} \alpha_4^{(1)} = \frac{k^2 V_y}{4! t_p}; \alpha_5^{(1)} = 0; \alpha_6^{(1)} = 0; \alpha_7^{(1)} = 0; \\ \alpha_4^{(2)} = \frac{k^2}{4!} \left(\frac{2V_y}{t_p} \right); \alpha_5^{(2)} = \frac{k^2}{5!} \left(-\frac{2V_y}{t_p^2} \right); \\ \alpha_6^{(2)} = 0; \alpha_7^{(2)} = 0; \\ \alpha_4^{(3)} = 0; \alpha_5^{(3)} = \frac{k^2}{5!} \left(-\frac{12V_y}{t_p^2} \right); \\ \alpha_6^{(3)} = \frac{k^2}{6!} \left(-\frac{48V_y}{t_p^3} \right); \alpha_7^{(3)} = \frac{k^2}{7!} \left(\frac{72V_y}{t_p^4} \right). \end{cases} \quad (19)$$

Для режима $x_2^{(4)}(t)$ ($i = 4$) решение (11) приобретает вид

$$\begin{aligned} x_2^{(4)}(t) = & \alpha_4^{(4)} \cdot t^4 + \alpha_5^{(4)} \cdot t^5 + \alpha_6^{(4)} \cdot t^6 + \\ & + \alpha_7^{(4)} \cdot t^7 + \alpha_8^{(4)} \cdot t^8 + \alpha_9^{(4)} \cdot t^9, \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$\begin{cases} \alpha_8^{(4)} = \frac{k^2 \cdot 4320 \cdot V_y}{8! t_p^5}; \\ \alpha_9^{(4)} = -\frac{7200 \cdot V_y \cdot k^2}{9! t_p^6}; \\ \alpha_4^{(4)} = 0; \alpha_5^{(4)} = 0; \alpha_6^{(4)} = \frac{k^2 \cdot 120 \cdot V_y}{6! t_p^3}; \\ \alpha_7^{(4)} = \frac{k^2 (-1080 \cdot V_y)}{7! t_p^4}. \end{cases} \quad (21)$$

Представим полученные результаты в сводной форме:

$$\begin{cases} x_2^{(1)}(t) = \frac{k^2 \cdot V_y \cdot t^4}{4! t_p}; x_2^{(2)}(t) = \frac{k^2 V_y}{12 t_p} \cdot t^4 - \frac{k^2 V_y \cdot t^5}{60 t_p^2}; \\ x_2^{(3)}(t) = \frac{k^2 \cdot V_y \cdot t^5}{10 t_p^2} - \frac{k^2 \cdot V_y \cdot t^6}{15 t_p^3} + \frac{k^2 \cdot V_y \cdot t^7}{70 t_p^4}; \\ x_2^{(4)}(t) = \frac{k^2 \cdot V_y \cdot t^6}{6 \cdot t_p^3} - \frac{k^2 \cdot V_y \cdot 3 \cdot t^7}{14 t_p^4} + \\ + \frac{k^2 \cdot V_y \cdot 3 \cdot t^8}{28 t_p^5} - \frac{k^2 \cdot V_y \cdot 5 \cdot t^9}{252 \cdot t_p^6}. \end{cases} \quad (22)$$

Именно при таких (22) режимах движение груза на канате при его подъеме с веса для всех ($i = \overline{(1,4)}$) приобретает свое идеальное (!) значение, т.е. $K_d^{(i)}(t) \equiv 1$ при $t \in [0, t_p]$.

Для анализа режима подъема груза с подхватом представим модель, которая описывает процесс в виде дифференциального уравнения для силы натяжения каната $F = C(x_1 - x_2)$:

$$\begin{aligned} \ddot{F} + k^2 \cdot F = & 2k^2 \cdot Q + \frac{C(m_1 + m_2)}{m_1} a_i(t), \\ Q = & m_2 g, \end{aligned} \quad (23)$$

с начальными условиями

$$t = 0; F = 0; \dot{F} = C \cdot V_y. \quad (24)$$

Условие (24) соответствует ситуации, когда при подъеме груза с подхватом в начальный момент деформация каната равна нулю (так как вес груза воспринимается основанием), но приведенная масса привода (m_1) в процессе выбора слабости

каната имеет скорость V_y , практически равную номинальной или близкую к ней [1].

Коэффициент динамичности $K_d^{(i)}(t)$ при $i = \overline{(1,4)}$ для всех вариантов движения привода в рамках модели (23) имеет вид

$$K_d^{(i)}(t) = 2 + \frac{\left\{ \frac{C(m_1 + m_2)}{m_1} a_i(t) - \ddot{F} \right\}}{k^2 \cdot m_2 g}. \quad (25)$$

Для режима подъема груза с веса начальные условия для (23), кстати, приобретают следующий вид:

$$t = 0; F = Q = m_2 g; \dot{F} = 0. \quad (26)$$

На рис. 2. приведены зависимости $F(t)$ и $K_d^{(i)}(t)$ для всех $i = \overline{(1,4)}$ режимов движения привода. Анализ показывает, что наблюдаются существенные колебания как $F(t)$, так и $K_d^{(i)}(t)$ в течение времени $t \in [0, t_p]$. Графики имеют колеблющийся характер для каждого i -го режима движения привода при подъеме как с веса, так и с подхватом.

Рассмотрим далее условия, при которых при подъеме груза (с веса или с подхватом) реализуется критерий качества движения следующего вида:

$$I = \int_0^{t_p} \left\{ K_d^{(i)}(t) \right\}^2 dt \rightarrow \min. \quad (27)$$

Необходимым условием реализации этого критерия является уравнение Эйлера–Пуассона, которое в рамках модели (23) принимает вид

$$F^{(IV)} = \frac{C(m_1 + m_2)}{m_1} \ddot{a}_i(t). \quad (28)$$

Для подъема груза с веса начальные условия для (28) имеют вид

$$\begin{cases} t = 0; F = Q = m_2 g; \dot{F} = 0; \\ \ddot{F} = k^2 \cdot Q + \frac{C(m_1 + m_2)}{m_1} a_i(0); \\ \ddot{\ddot{F}} = \frac{C(m_1 + m_2)}{m_1} \dot{a}_i(0). \end{cases} \quad (29)$$

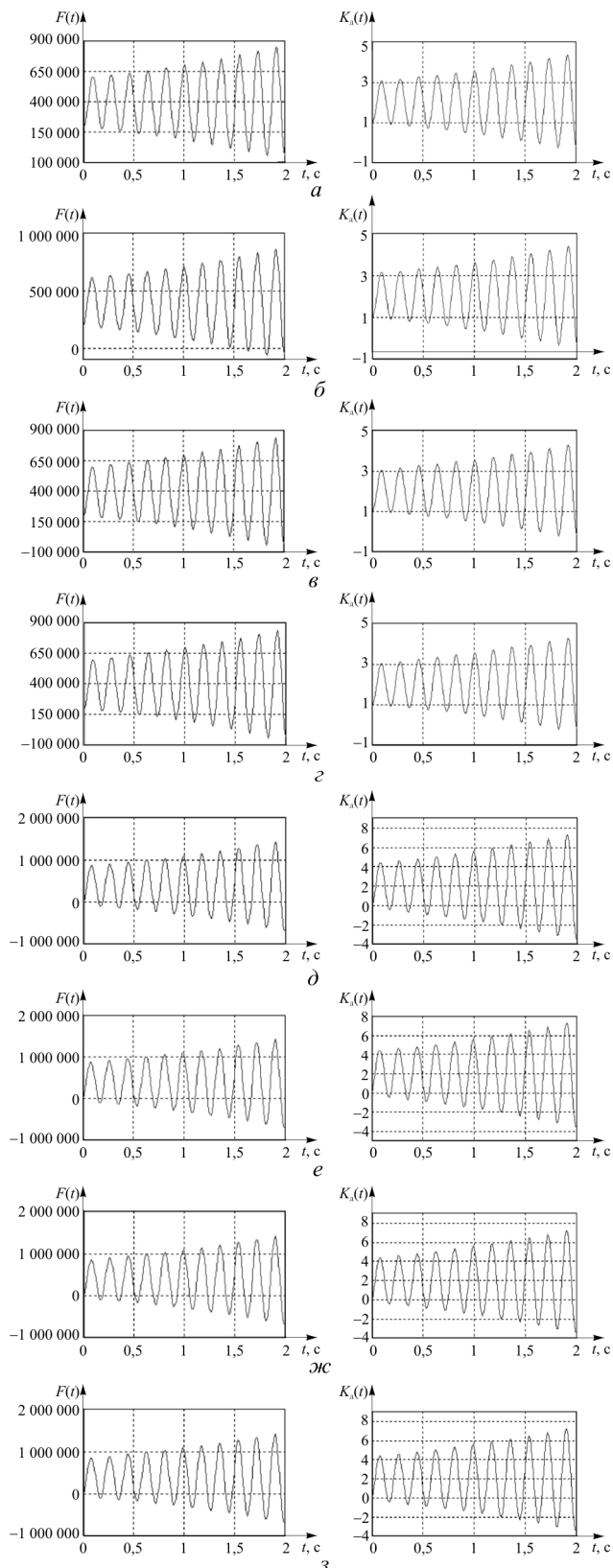


Рис. 2. Зависимости $F(t)$ и $K_d^{(i)}(t)$ для всех $i = \overline{(1,4)}$ режимов движения привода при неоптимальном подъеме: а–г – подъем с веса; д–з – подъем с подхватом

Для подъема груза с подхватом начальные условия для (28) таковы:

$$\begin{cases} t=0; F=0; \dot{F}=C \cdot V_y; \\ \ddot{F}=k^2 \cdot Q + \frac{C(m_1+m_2)}{m_1} a_i(0); \\ \ddot{\ddot{F}} = \frac{C(m_1+m_2)}{m_1} \dot{a}_i(0). \end{cases} \quad (30)$$

Для проведения численных расчетов на компьютере были использованы следующие значения параметров механизма подъема груза крана [3]: $C=1,545 \cdot 10^7$ Н/м; $g=9,81$ м/с²; $m_1=41\,550$ кг; $m_2=20\,000$ кг; $V_y=0,5$ м/с; $t_p=2,0$ с.

Значения $\ddot{a}_i(t)$, $a_i(0)$ и $\dot{a}_i(0)$ для $i=\overline{1,4}$ представлены ниже:

$$\begin{cases} \ddot{a}_1(t)=0; \ddot{a}_2(t)=0; \\ \ddot{a}_3(t)=\frac{24V_y}{t_p} \left\{ -\frac{2}{t_p^2} + \frac{3t}{t_p^3} \right\}; \\ \ddot{a}_4(t)=\frac{120V_y}{t_p^3} \left\{ 1-9\frac{t}{t_p}+18\frac{t^2}{t_p^2}-10\frac{t^3}{t_p^3} \right\}. \end{cases} \quad (31)$$

$$a_1(0)=\frac{V_y}{t_p}; a_2(0)=\frac{2V_y}{t_p}; \quad (32)$$

$$\begin{aligned} a_3(0)=0; a_4(0)=0; \\ \dot{a}_1(0)=0; \dot{a}_2(0)=-\frac{2V_y}{t_p^2}; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\dot{a}_3(0)=\frac{12V_y}{t_p^2}; \dot{a}_4(0)=0.$$

В модели (28) для условий (29) или (30) (соответственно подъем с веса или с подхватом) и значений $\ddot{a}_i(t)$ (31), $a_i(0)$ (32), $\dot{a}_i(0)$ (33) проведены расчеты $F(t)$ и $K_d^{(i)}(t)$ при изменении t в интервале $[0; t_p]$.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, для функций $F(t)$ и $K_d^{(i)}(t)$ показывает, что в рамках модели (28) и соответствующих начальных условий для силы F и ее производных $\dot{F}$, $\ddot{F}$, $\ddot{\ddot{F}}$, значений $\ddot{a}_i(t)$ (31), $a_i(0)$ (32), $\dot{a}_i(0)$ (33) характер графиков $F(t)$ не колебательный (а только монотонный, растущий с течением времени t), а $K_d^{(i)}(t)$

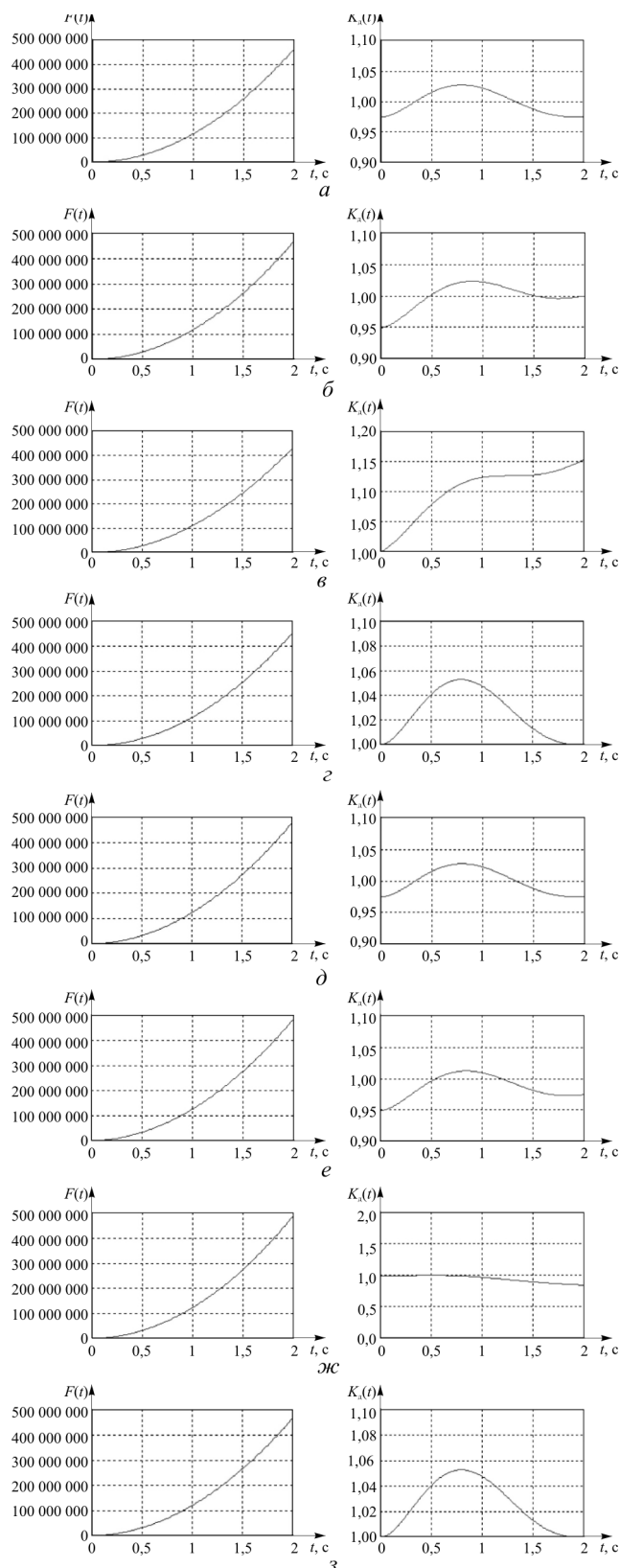


Рис. 3. Зависимости $F(t)$ и $K_d^{(i)}(t)$ для всех $i=\overline{1,4}$ режимов движения привода при оптимальном подъеме: а–г – подъем с веса; д–з – подъем с подхватом

для $i = \overline{1,4}$ при подъеме как с веса, так и с подхватом в течение $t \in [0, t_p]$ практически соответствует «идеальному» подъему груза ($K_d^{(i)}(t) \rightarrow 1, t \in [0, t_p]$).

Выводы и предложения

1. Обоснованы модели подъема груза с веса и с подхватом, которые минимизируют динамические нагрузки в канате грузоподъемного крана в период его пуска ($t \in [0, t_p]$).

2. Полученные в работе результаты могут в дальнейшем быть использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчета режимов движения грузоподъемных кранов и их элементов (при подъеме с веса или с подхватом), которые минимизируют нагрузку в канатах при оптимальных (с точки зрения результатов работы [2]) режимах движения привода как на стадиях проектирования (конструирования) подобных систем, так и в режимах их реальной эксплуатации.

Список литературы

1. Теория, конструкция и расчет строительных и дорожных машин / Л.А. Гоберман, К.В. Степанян, А.А. Яркин, В.С. Зеленский. – М.: Машиностроение, 1979. – 407 с.
2. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 166 с.
3. Ловейкин В.С. Минимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин // Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины. – Киев, 1998. – Вып.52. – С. 63–68.
4. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.
5. Волков Д.П. Динамические нагрузки в универсальных экскаваторах-кранах. – М.: Машгиз, 1958. – 269 с.
6. Зоммерфельд А. Механика. – М.: ТИИЛ, 1947. – 392 с.
7. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины. – М.: Высшая школа, 1985. – 520 с.
8. Вайсон А.А. Подъемно-транспортные машины. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.
9. Гайдамака В.Ф. Грузоподъемные машины. – Киев: Высшая школа. Головное изд-во, 1989. – 326 с.
10. Грузоподъемные машины / М.П. Александров, Я.Н. Колобов, Н.А. Лобов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
11. Подъемно-транспортные машины / В.В. Красников, З.Ф. Дубинин, В.Ф. Акимов [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1987. – 272 с.
12. Марон Ф.Л., Кузьмин А.В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. – Минск: Высшая школа, 1977. – 270 с.
13. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – М.: Металлургия, 1981. – 168 с.
14. Расчет крановых механизмов и их деталей / ВНИИПТМаш. – М.: Машиностроение, 1971. – 495 с.
15. Зубко Н.Ф. Прогнозирование коэффициентов динамичности в элементах крановых механизмов // Вестник Одесского национального морского университета. – 2013. – № 2 (38). – С. 63–71.
16. Dietrich M. Dynamic von kranen bei plötzlichem lastabfall // Hebezeuge und Fördermittel. – 1964. – № 4. – S. 362–364.
17. Dietrich M. O dynamice hamowania dSwignic // Arch. Bud. Masz. – Warszawa, 1965. – Vol. 12, z. 2. – S. 261–281.
18. Dietrich M. Statistische analyse der dynamik beim kranfahren. Wissen. 2. T.U. – Dresden, 1969. – 18, H I. – S. 223–225.
19. Dresig H. Ermittlung dynamischer belastungen an wipprehkranen: dissertation, T.H. – Dresden, 1965. – 203 s.
20. Dresig H. Massenkräfte in kranen beim anheben der last // Hebezeuge und Fördermittel. – 1967. – Vol. 1. – S. 13–16; № 2. – S. 38–42.
21. Dresig H. Massenkräfte beim drehen von doppelkerkranen // Hebezeuge und Fördermittel. – 1968. – 18. – S. 225–230.
22. Eiler P. Uber massenkräfte an dreh-und wippenkranen: dissertation, T.H. – München, 1966. – 246 s.
23. Ernst L. Dimensionieren von hebezeugen auf der grundlage des betriebsfestigkeitsnachweises der TGL 13470; Ausgabe 10.74 // Hebezeuge und Fördermittel. – 1976. – № 1. – S. 14–17.
24. Fetizon F., Jouannet J.G., Yatremetz M. Tower crane in turbulent wind // Pract. Exper. Flow-induced Vibr. Symp., Karlsruhe, 1978. – Berlin: 1980. – P. 760–765.
25. Fiegehen E.G. The standardization of crane essentials // The Engineer. – 1925. – № 3623. – P. 7–11; № 3649. – P. 8–9.

References

1. Gberman L.A., Stepanian K.V., Iarkin A.A., Zelenskii V.S. Teoriia, konstruktsiia i raschet stroitel'nykh i dorozhnykh mashin [Theory, design and calculation of building and road machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 407 p.
2. Loveikin V.S. Raschety optimal'nykh rezhimov dvizheniia mekhanizmov stroitel'nykh mashin [Calculations of optimal movement modes of building machines' mechanisms]. Kiev: UMK VO, 1990, 166 p.
3. Loveikin V.S. Minimizatsiia dinamicheskikh nagruzok v uprugikh elementakh gruzopod'emnykh mashin [Minimizing dynamic loads in elastic elements of lifting equipment]. *Gornye, stroitel'nye, dorozhnye i meliorativnye mashiny*. Kiev, 1998, vol.52, pp.63-68.
4. Kozhevnikov S.N. Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh [The dynamics of non-stationary processes in machines]. Kiev: Naukova dumka, 1986, 288 p.

5. Volkov D.P. Dinamicheskie nagruzki v universal'nykh ekskavatorakh-kranakh [Dynamic loads in universal excavators-cranes]. Moscow: Mashgiz, 1958, 269 p.
6. Zommerfel'd A. Mekhanika [Mechanics]. Moscow: TIIL, 1947, 392 p.
7. Aleksandrov M.P. Pod'emno-transportnye mashiny [Lifting and transport machines]. Moscow: Vysshaia shkola, 1985, 520 p.
8. Vaison A.A. Pod'emno-transportnye mashiny [Lifting and transport machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 536 p.
9. Gaidamaka V.F. Gruzopod'emnye mashiny [Lifting machines]. Kiev: Vysshaia shkola, 1989, 326 p.
10. Aleksandrov M.P., Kolobov Ia.N., Lobov N.A. et al. Gruzopod'emnye mashiny [Lifting machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 400 p.
11. Krasnikov V.V., Dubinin Z.F., Akimov V.F. et al. Pod'emno-transportnye mashiny [Lifting and transport machines]. Moscow: Agropromizdat, 1987, 272 p.
12. Maron F.L., Kuz'min A.V. Spravochnik po raschetam mekhanizmov pod'emno-transportnykh mashin [Manual for mechanisms calculations in lifting and transport machines]. Minsk: Vysshaia shkola, 1977, 270 p.
13. Pravila ustroystva i bezopasnoi ekspluatatsii gruzopod'emnykh kranov [Rules for arrangement and safe operation of lifting cranes]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 168 p.
14. Raschet kranovykh mekhanizmov i ikh detalei [Calculation of crane mechanisms and their parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 495 p.
15. Zubko N.F. Prognozirovaniye koeffitsientov dinamichnosti v elementakh kranovykh mekhanizmov [Prediction of dynamic factors in the crane mechanisms elements]. *Vestnik Odesskogo natsional'nogo morskogo universiteta*, 2013, no.2 (38), pp.63-71.
16. Dietrich M. Dynamic von Kranen bei plötzlichem lastabfall. *Hebezeuge und Fördermittel*, 1964, no.4, pp.362–364.
17. Dietrich M. O dynamice hamowania dSwignic. *Arch. Bud. Masz.* Warszawa, 1965, vol. 12, z. 2, pp.261-281.
18. Dietrich M. Statistische analyse der dynamik beim kranfahren. Wissen. 2. T.U. Dresden, 18, H I, pp.223–225.
19. Dresig H. Ermittlung dynamischer belastungen an wippdrehkranen: dissertation, T.H. Dresden, 1965, 203 p.
20. Dresig H. Massenkräfte in kranen beim anheben der last. *Hebezeuge und Fördermittel*, 1967, vol. 1, s. 13–16, no.2, pp.38-42.
21. Dresig H. Massenkräfte beim drehen von doppellenkerkranen. *Hebezeuge und Fördermittel*, 1968, 18, pp.225-230.
22. Eiler P. Über massenkräfte an dreh-und wippenkranen: dissertation, T.H. München, 1966, 246 p.
23. Ernst L. Dimensionieren von hebezeugen auf der grundlage des betriebsfestigkeitsnachweises der TGL 13470; Ausgabe 10.74. *Hebezeuge und Fördermittel*, 1976, no.1, pp.14-17.
24. Fetizon F., Jouannet J.G., Yatremetz M. Tower crane in turbulent wind. *Pract. Exper. Flow-induced Vibr. Symp.*, Karlsruhe, 1978. Berlin, 1980, p. 760-765.
25. Fiegehen E.G. The standardization of crane essentials. *The Engineer*, 1925, no. 3623, p. 7-11; no. 3649, p. 8-9.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Уточненный анализ и минимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин / В.С. Ловеikin, Ю.В. Човнюк, И.А. Кадыкало // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №21. – С.354–361. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.7

Please cite this article in English as:

Loveikin V.S., Chovniuk Iu.V., Kadykalo I.A. Updated analysis and minimization of dynamic loads in elastic elements of lifting equipment. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.21, pp.354–361. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.7