

# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.874:62-783

**Семенюк В.Ф.**

Одесский национальный политехнический университет

**Лингур В.Н.**

Одесский национальный политехнический университет

## ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА ОТ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК

*В статье обоснована необходимость защиты кранов мостового типа от систематических перегрузок. Получены аналитические зависимости для определения динамических нагрузок, возникающих в подъемных канатах при подъеме груза. Определена жесткость дополнительного упругого звена, введение которого в силовую цепь механизма подъема позволяет предотвратить систематические перегрузки крана. Сформулированы требования к конструкции дополнительного упругого звена. Даны рекомендации для создания конструкции дополнительного упругого звена.*

**Ключевые слова:** кран мостового типа, систематические перегрузки, дополнительное упругое звено, динамические нагрузки, жесткость дополнительного упругого звена.

**Постановка проблемы.** Одним из наиболее распространенных средств механизации погрузочно-разгрузочных работ на промышленных предприятиях, строительных площадках, в речных и морских портах, на железнодорожном транспорте являются грузоподъемные краны, обеспечивающие подъем груза, перемещение его на незначительное расстояние и опускание с помощью грузозахватного устройства [1, с. 27]. К кранам мостового типа относят мостовые и козловые краны, мостовые перегружатели, кабельные и мостокабельные краны, а также мостовые краны-штабелеры.

Краны мостового типа должны оборудоваться ограничителями грузоподъемности в том случае, когда возможна перегрузка их по технологическим причинам. Ограничитель грузоподъемности крана мостового типа не должен допускать перегрузку более чем на 25% [2, с. 143]. К кранам, в которых перегрузки возникают по технологическим причинам, относят мостовые краны грейферные и магнитные, краны предприятий строительной индустрии, используемые для извлечения готовых железобетонных изделий из пропарочных камер, краны, работающие на открытых складах, когда не исключено прилипание или примерзание к грунту поднимаемых грузов, краны, используемые для демонтажа оборудования, и др.

Кроме того, перегрузки могут возникнуть при эксплуатации кранов в обычных производствен-

ных условиях из-за возможных ошибок при визуальной оценке массы поднимаемого груза или нарушения машинистом правил эксплуатации кранов.

Оснащение кранов ограничителями нагрузки позволяет сократить число поломок, уменьшить время простоев, исключить опасность для обслуживающего персонала, предохранить от повреждения оборудование, находящееся в зоне работы кранов, снизить нагрузки на строительные конструкции.

Причиной перегрузки может быть не только подъем груза, превышающего номинальную грузоподъемность крана, но и возникающие при подъеме груза динамические нагрузки. Так, при подъеме груза «с подхватом» отношение максимальной динамической нагрузки к статической нагрузке для различных механизмов подъема составляет от 1,35 до 1,94 [3, с. 101]. Если создать систему защиты крана таким образом, что при каждом превышении нагрузки более чем на 25% будет срабатывать ограничитель грузоподъемности, то кран не сможет поднимать грузы, даже соответствующие номинальной грузоподъемности крана. Поэтому целесообразно в системе защиты мостовых кранов от перегрузки предусмотреть две функции: защиты крана от пиковых перегрузок, которые во много раз превышают допустимый уровень, и защиты кранов от

систематических перегрузок, представляющих собой относительно небольшие по величине перегрузки, возникающие чаще всего в результате подъема груза близкого по значению к номинальной грузоподъемности крана, но при больших ускорениях.

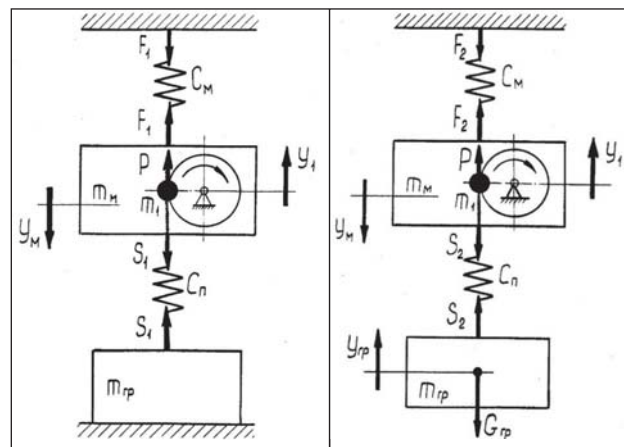
**Анализ последних исследований и публикаций.** Большинство из выполненных до сих пор исследований в области защиты мостовых кранов от перегрузки посвящено разработке, исследованию и определению основных параметров различных ограничителей грузоподъемности, выбору критериев для оценки их работы.

Для защиты грузоподъемных кранов от перегрузки наиболее часто применяют способ отключения электродвигателя. Недостатком такого способа является то, что для мостовых кранов при подъеме груза массой выше допустимой, после срабатывания ограничителя грузоподъемности поднимаемый груз оказывается поднятым над основанием и, несмотря на срабатывание ограничителя, кран оказывается перегруженным до тех пор, пока крановщик не опустит груз на основание. Это подтверждают исследования характера изменения усилий подъема при срабатывании ограничителя грузоподъемности, работающего по способу отключения электродвигателя механизма подъема [4, с. 229–246].

Способ защиты крана путем отключения электродвигателя механизма подъема груза и наложения тормоза, хотя и предотвращает работу крана с грузом недопустимо большой массы, но не решает задачу защиты элементов крана от опасных перегрузок, так как при простом отключении двигателя поднимаемый груз (масса которого значительно превышает номинальную) успеет оторваться от основания и длительное время остается в поднятом состоянии [5, с. 38–44]. Для повышения эффективности предохранения кранов от перегрузок предложен способ воздействия ограничителя грузоподъемности на механизм подъема, который позволяет при срабатывании ограничителя переключать подъемный двигатель на короткое время для работы на спуск груза [5, с. 42]. При таком способе поднимаемый груз все равно некоторое время остается в поднятом состоянии и перегружает кран.

В последнее время выполнены несколько диссертаций посвященных защите мостовых кранов от перегрузки [6; 7]. Но задача защиты мостовых кранов от систематических перегрузок не решена.

**Постановка задания.** Целью настоящей работы является обоснование возможности



**Рис. 1.** Расчетная динамическая схема мостового крана в «доотрывной» стадии движения

**Рис. 2.** Расчетная динамическая схема мостового крана в «послеотрывной» стадии движения

защиты грузоподъемных кранов мостового типа от систематических перегрузок путем введения в систему подвески груза дополнительного упругого звена.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель процесса подъема груза с основания «с подхватом»;
- найти аналитическую зависимость для определения максимального значения усилия в подъемных канатах после отрыва груза от основания;
- найти аналитическую зависимость для определения жесткости дополнительного упругого звена, введение которого в силовую цепь механизма подъема позволит предотвратить систематические перегрузки крана.

**Изложение основного материала исследования.** Для определения динамических нагрузок, действующих на подъемные канаты, а также на металлоконструкцию крана, рассмотрим движение системы «кран-груз» в «доотрывной» (рис. 1) и «послеотрывной» (рис. 2) стадиях. На этих рисунках приняты следующие обозначения:  $m_m$  – масса моста и тележки, приведенная к вертикальной деформации моста  $y_m$ , отсчитываемой от статического положения моста при условии отсутствия груза на крюке крана;  $c_m$  – жесткость моста в точке подъема груза;  $m_1$  – масса вращающихся частей механизма подъема, приведенная к поступательному перемещению  $y_1$ , совпадающему с направлением перемещения груза  $y_г$ ;  $c_n$  – жесткость канатной подвески груза;  $m_г$  – масса груза;  $G_г$  – вес груза;  $P$  – усилие подъемного двигателя, приведенное к поступательному

перемещению груза;  $S_1$  и  $S_2$  – суммарное усилие в подъемных канатах соответственно до отрыва груза и после отрыва груза от основания;  $F_1$  и  $F_2$  – усилие, действующее на мост крана, возникающее при подъеме груза в «доотрывной» и «послеотрывной» стадиях движения соответственно.

«Доотрывная» стадия.

Уравнения движения системы «кран-груз» в «доотрывной» стадии имеют вид

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m &= S_1 - F_1; \\ m_1 \ddot{y}_1 &= P - S_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $S_1 = c_n (y_1 - y_m)$ ;  $F_1 = c_m y_m$ . (2)

Приведенное движущее усилие электродвигателя механизма подъема

$$P = 2M \frac{u_p \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot a}{D_6 + d}, \quad (3)$$

где  $M$  – момент двигателя механизма подъема;  $u_p$  – передаточное число редуктора механизма подъема;

$\eta_{\text{мех}}$  – КПД механизма подъема;

$a$  – кратность полиспаста;

$D_6$  – диаметр барабана механизма подъема;

$d$  – диаметр каната.

Приняв прямолинейный характер механических характеристик низших ступеней асинхронных электродвигателей, а также характеристик их высших ступеней в области номинального момента, найдем, что движущее усилие на данном этапе изменяется по зависимости

$$P = P_0 - \beta \dot{y}_1, \quad (4)$$

где  $P_0$  – усилие в момент пуска электродвигателя при числе оборотов, равном нулю;

$\dot{y}_1$  – скорость приведенной массы вращающихся частей механизма подъема;

$\beta$  – коэффициент жесткости механической характеристики

$$\beta = \eta_{\text{мех}} \frac{2M_0}{\pi \cdot n_0} \left( \frac{u_p \cdot a}{D_6 + d} \right)^2, \quad (5)$$

Здесь:  $M_0$  – момент на валу двигателя при скорости вращения, равной нулю; определяется при условии прямолинейности характеристик электродвигателя механизма подъема;  $n_0$  – число оборотов электродвигателя механизма подъема, соответствующее его синхронной скорости.

Подставляя значения  $S_1$ ,  $F_1$  и  $P$  в (1), получим дифференциальные уравнения, описывающие движение динамической системы на «доотрывной» стадии

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m + (c_n + c_m) y_m - c_n y_1 &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta \dot{y}_1 + c_n (y_1 - y_m) &= P_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Начальные условия для рассматриваемой стадии движения системы в случае подъема груза с подхватом

$$t_1 = 0, y_m = 0, \dot{y}_m = 0, y_1 = 0, \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_0, \quad (7)$$

при этом  $(\dot{y}_1)_0$  – скорость массы  $m_1$ , соответствующая скорости холостого хода электродвигателя механизма подъема, равна

$$(\dot{y}_1)_0 = \frac{\pi \cdot n_0 (D_6 + d)}{u_p \cdot a}. \quad (8)$$

Условием перехода к «послеотрывной» стадии движения динамической системы является равенство

$$(S_1)_1 = G_{\text{сп}}, \quad (9)$$

где  $(S_1)_1$  – усилие в подъемных канатах в конце «доотрывной» стадии.

«Послеотрывная» стадия.

После отрыва груза от основания движение системы описывается уравнениями

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m &= S_2 - F_2; \\ m_1 \ddot{y}_1 &= P - S_2; \\ m_{\text{сп}} \ddot{y}_{\text{сп}} &= S_2 - G_{\text{сп}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Усилие в металлоконструкции и натяжение канатов определяются выражениями

$$F_2 = c_m y_m; S_2 = c_n (y_1 - y_m - y_{\text{сп}}). \quad (11)$$

С учетом (11) система дифференциальных уравнений (10) запишется в следующем виде

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m + (c_m + c_n) y_m - c_n y_1 + c_n y_{\text{сп}} &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta \dot{y}_1 + c_n (y_1 - y_m - y_{\text{сп}}) &= P_0; \\ m_{\text{сп}} \ddot{y}_{\text{сп}} - c_n (y_1 - y_m - y_{\text{сп}}) &= -G_{\text{сп}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Начальные условия для данной стадии движения

$$\begin{aligned} t_2 = 0, y_m &= (y_m)_1, \dot{y}_m = (\dot{y}_m)_1, \\ y_1 &= (y_1)_1, \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_1, y_{\text{сп}} = 0, \dot{y}_{\text{сп}} = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $(y_m)_1, (y_1)_1, (\dot{y}_m)_1, (\dot{y}_1)_1$  – перемещения и скорости масс  $m_m$  и  $m_1$  в конце доотрывной стадии движения.

Численное решение систем дифференциальных уравнений (6) и (12) может быть выполнено с использованием метода Рунге-Кутты.

Найдем аналитическую зависимость для определения усилий  $S_1$  и  $S_2$ . Примем, что окружная скорость вала двигателя в процессе подъема груза с основания при работе двигателя на естественной механической характеристике постоянна и равна  $(\dot{y}_1)_0$  [5, с. 21], тогда  $y_1 = (\dot{y}_1)_0 t$ , и система дифференциальных уравнений (6) превращается в одно уравнение

$$m_m \ddot{y}_m + (c_m + c_n) y_m = c_n (\dot{y}_1)_0 t. \quad (14)$$

или

$$\ddot{y}_m + \frac{c_m + c_n}{m_m} y_m = \frac{c_n}{m_m} (\dot{y}_1)_0 t. \quad (15)$$

Общее решение линейного неоднородного уравнения (15)

$$y_m = A \cos \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t + B \sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t + \frac{c_n}{c_m + c_n} (\dot{y}_1)_0 t. \quad (16)$$

Начальные условия при  $t_1 = 0, y_m = 0, \dot{y}_m = 0, u = 0$ ,

$$B = -\frac{\frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}}. \quad (17)$$

С учетом (17)

$$y_m = \frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0 \left[ t - \frac{1}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}} \sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t \right]. \quad (18)$$

Усилие в подъемных канатах до отрыва груза от основания

$$S_1 = \frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0 \left[ c_m t + c_n - \frac{\sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}} \right]. \quad (19)$$

В момент отрыва  $(S_1)_1 = G_{ep}$  а, следовательно, продолжительность  $t_1$  «доотрывной» стадии определится из уравнения

$$\frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0 \left[ c_m t_1 + c_n - \frac{\sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t_1}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}} \right] = G_{ep}. \quad (20)$$

При рассмотрении «послеотрывной» стадии учтем, что при  $t_2 = 0$

$$c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) = G_{ep} + c_n(y_1 - y_m - y_{ep}). \quad (21)$$

где  $y_1, y_m, y_{ep}$  – отсчитываются от начала «послеотрывной» стадии и при  $t_2 = 0; y_1 = 0; y_m = 0; y_{ep} = 0$ .

Приняв это во внимание, а также допустив, что  $P = G_{ep}$  в начале «послеотрывной» стадии, запишем систему дифференциальных уравнений (12) в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m + c_m y_m - c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) &= G_{ep}; \\ m_{ep} \ddot{y}_{ep} - c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Для упрощения решения системы предположим, что динамическая деформация несущей металлоконструкции мало отличается от статической деформации, то есть

$$c_m y_m \approx c_n(y_1 - y_m - y_{ep}). \quad (23)$$

Как отмечается в [3, с. 97], это предположение вносит весьма малую ошибку в результат.

Умножая второе уравнение системы (22) на  $m_{ep}$ , а третье уравнение на  $m_1$  и вычитая из второго уравнения третье, после преобразований получим

$$m_1 m_{ep}(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_{ep}) + (m_1 + m_{ep})c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) = m_{ep} G_{ep}. \quad (24)$$

Обозначив  $c_m \cdot c_n / (c_m + c_n) = c$ , из (23) получим

$$c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) = c(y_1 - y_{ep}). \quad (25)$$

Тогда, учитывая (25), уравнение (24) примет вид

$$m_1 m_{ep}(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_{ep}) + (m_1 + m_{ep})c(y_1 - y_{ep}) = m_{ep} G_{ep}. \quad (26)$$

или

$$\left( \ddot{y}_1 - \ddot{y}_{ep} \right) + \frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}} \cdot c(y_1 - y_{ep}) = \frac{G_{ep}}{m_1}. \quad (27)$$

Общее решение уравнения (27)

$$(y_1 - y_{ep}) = A \cos pt + B \sin pt + (y_1 - y_{ep})_*, \quad (28)$$

где  $p = \sqrt{\frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}}} c u(y_1 - y_{ep})$ , – частное решение уравнения (27), которое равно

$$(y_1 - y_{ep})_* = \frac{G_{ep} \delta}{m_1} \frac{(m_1 + m_{ep})c}{m_1 m_{ep}} = \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{(m_1 + m_{ep})c}. \quad (29)$$

Учитывая (29), запишем уравнение (28)

$$(y_1 - y_{ep}) = A \cos pt + B \sin pt + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{(m_1 + m_{ep})c}, \quad (30)$$

Начальные условия при  $t_2 = 0; y_1 - y_{ep} = 0; \dot{y}_1 - \dot{y}_{ep} = (\dot{y}_1)_1$ , так как  $y_{ep} = 0$ . Примем, что скорость  $(\dot{y}_1)_1$  в начале «послеотрывной» стадии равна  $(\dot{y}_1)_0$ . Продифференцировав (30), найдем

$$\left( \dot{y}_1 - \dot{y}_{ep} \right) = -pA \sin pt + pB \cos pt. \quad (31)$$

Подставив из начальных условий  $y_1 - y_{ep} = 0$  в (30) и  $\dot{y}_1 - \dot{y}_{ep} = (\dot{y}_1)_0$  в (31) получим

$$A = -\frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{c(m_1 + m_{ep})}; \quad (32)$$

$$B = \frac{(\dot{y}_1)_0}{\sqrt{\frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}} \cdot c}}. \quad (33)$$

Приняв во внимание значения А и В, из уравнения (30) найдем

$$(y_1 - y_{ep}) = \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{c(m_1 + m_{ep})}(1 - \cos pt) + \frac{(\dot{y}_1)_0}{p} \sin pt, \quad (34)$$

Усилие в подъемных канатах после отрыва груза от основания

$$S_2 = G_{ep} + c(y_1 - y_{ep}) \quad (35)$$

и с учетом (34)

$$S_2 = G_{ep} - \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{(m_1 + m_{ep})}(1 - \cos pt) + \frac{c \cdot (\dot{y}_1)_0}{p} \sin pt, \quad (36)$$

Для определения максимального усилия в подъемных канатах после отрыва груза от основания исследуем функцию  $S_2(t_2)$  на экстремум. Дифференцируя и приравнявая нулю уравнение (36) получим

$$\frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} p \sin pt_2 + c(y_1)_0 \cos pt_2 = 0. \quad (37)$$

Разделив обе части уравнения (37) на  $\cos pt_2$ , найдем

$$\operatorname{tg}(pt_2) = -\frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}}. \quad (38)$$



Учитывая периодичность функции тангенса, определим точку максимума функции  $S_2(t_2)$

$$pt_2 + \pi = \operatorname{arctg} \left[ -\frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right]. \quad (39)$$

а, следовательно,

$$t_2 = -\frac{\operatorname{arctg} \left[ -\frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] + \pi}{p}. \quad (40)$$

Для удобства понимания и компактности подстановки значения  $t_2$  из (40) в выражение (36) подставим значение  $t_2$  вне выражения (36) в  $\cos pt_2$  и  $\sin pt_2$ , преобразовав, получим

$$\begin{aligned} \cos pt_2 &= -\cos \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] \right\}, \\ \sin pt_2 &= \sin \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (41)$$

Подставив значения  $\cos pt_2$  и  $\sin pt_2$  из (41) в выражение (36), найдем максимальное значение усилия в подъемных канатах после отрыва груза от основания

$$\begin{aligned} S_{2max} &= G_{ep} + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \cos \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] \right\} + \\ &+ \frac{c \cdot (y_1)_0}{p} \sin \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right], \end{aligned} \quad (42)$$

Преобразовав выражение (42), учитывая, что

$$\cos \operatorname{arctg} \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha^2}}, \sin \operatorname{arctg} \alpha = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (43)$$

получим в другом виде выражение для определения  $S_{2max}$ :

$$S_{2max} = G_{ep} + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right]^2} \right\}, \quad (44)$$

или раскрыв  $p = \sqrt{c \cdot \frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}}}$ , имеем

$$S_{2max} = G_{ep} + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{c \cdot m_1 (m_1 + m_{ep})}{m_{ep}} \left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2} \right\}, \quad (45)$$

Тогда коэффициент динамичности для нагружения канатов определяется:

$$k_{дин} = 1 + \frac{m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{c \cdot m_1 (m_1 + m_{ep})}{m_{ep}} \left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2} \right\}, \quad (46)$$

С введением дополнительного упругого звена жесткость канатной подвески изменится и будет определяться по зависимости

$$c_n = \frac{c_k \cdot c_{дон}}{c_k + c_{дон}}, \quad (47)$$

где  $c_k$  – приведенная жесткость тяговых элементов;  $c_{дон}$  – жесткость дополнительного упругого звена.

Следовательно, приведенная жесткость несущей металлоконструкции и тяговых элементов

с учетом жесткости дополнительного упругого звена будет определяться

$$c = \frac{c_M \cdot c_k \cdot c_{дон}}{c_M \cdot c_k + c_M \cdot c_{дон} + c_k \cdot c_{дон}}. \quad (48)$$

Из зависимости (48) следует, что

$$c_{дон} = \frac{c_M \cdot c_k}{\frac{c_M \cdot c_k}{c} - c_M - c_k}. \quad (49)$$

Тогда определим зависимость  $c$  от  $k_{дин}$ . Преобразовав выражение (46), получим

$$c = \left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2 \frac{k_{дин} - 1}{m_1} \left\{ (k_{дин} - 1) \frac{m_1 + m_{ep}}{m_{ep}} - 2 \right\}. \quad (50)$$

Подставив полученную зависимость (50) в (49), получим зависимость для определения жесткости дополнительного упругого звена:

$$c_{дон} = \frac{c_M \cdot c_k}{\left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2 \frac{k_{дин} - 1}{m_1} \left\{ (k_{дин} - 1) \frac{m_1 + m_{ep}}{m_{ep}} - 2 \right\} - c_M - c_k}. \quad (51)$$

Таким образом, для каждого конкретного случая по формуле (51) можно определить значение жесткости дополнительного упругого звена, введение которого в силовую цепь механизма подъема позволит предотвратить систематические перегрузки крана, при этом действие указанного упругого элемента должно начинаться в момент отрыва груза от основания.

Для того, чтобы действие дополнительного упругого элемента начиналось в момент отрыва груза от основания, этот упругий элемент должен быть предварительно поджат на величину усилия, соответствующего номинальной грузоподъемности крана. При этом он должен иметь нелинейную характеристику жесткости: после отрыва груза от основания и начала действия дополнительного упругого элемента его жесткость должна уменьшаться. Обеспечить переменную жесткость дополнительного упругого элемента можно путем использования пружины с нелинейной характеристикой, например, тарельчатой пружины, либо выполнить его составным с применением пружины с постоянной жесткостью и передаточного механизма, передаточное число которого увеличивалось бы по мере перемещения подвижных деталей этого механизма после начала его срабатывания. Для этого можно использовать схему роликового передаточного механизма, рассмотренную в [8, с. 12–14].

#### Выводы:

1) обеспечить защиту грузоподъемных кранов мостового типа от систематических перегрузок можно путем введения в систему подвески груза дополнительного упругого звена;

2) дополнительное упругое звено должно быть предварительно поджато на величину усилия, соответствующего номинальной грузоподъемности крана;

3) дополнительное упругое звено должно иметь переменную жесткость, уменьшающуюся после начала его действия.

#### Список литературы:

1. Грузоподъемные машины / М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов и др. Москва: Машиностроение, 1986. 400 с.
2. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справочник / И.И. Абрамович, В.Н. Березин, А.Г. Яуре. Москва: Машиностроение, 1989. 360 с.
3. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин. Киев-Москва: Машгиз, 1953. 188 с.
4. Шеффлер М., Пайер Г., Курт Ф. Основы расчета и конструирования подъемно-транспортных машин: Сокр. Пер. с нем. Москва: Машиностроение, 1980. 255 с.
5. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. Москва: Машиностроение, 1987. 160 с.
6. Орлов Д.Ю. Повышение безопасности эксплуатации кранов мостового типа на основе ограничителя грузоподъемности с расширенными функциональными возможностями: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2004. 20 с.
7. Столяров Д.П. Совершенствование системы защиты и контроля технического состояния крана мостового типа: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2010. 22 с.
8. Семенюк В.Ф., Лингур В.Н. Способ и устройство для повышения точности защиты от перегрузки кранов мостового типа. Подъемные сооружения, специальная техника. 2017. № 12. С. 12–14.

#### ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАХИСТУ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ МОСТОВОГО ТИПУ ВІД СИСТЕМАТИЧНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

*У статті обґрунтовано необхідність захисту кранів мостового типу від систематичних перевантажень. Отримано аналітичні залежності для визначення динамічних навантажень, що виникають у підйомних канатах, під час підйому вантажу. Визначено жорсткість додаткової пружної ланки, введення якої в силовий ланцюг механізму підйому дозволяє запобігти систематичному перевантаженню крана. Сформульовано вимоги до конструкції додаткової пружної ланки. Дано рекомендації для створення конструкції додаткової пружної ланки.*

**Ключові слова:** кран мостового типу, систематичні перевантаження, додаткова пружна ланка, динамічні навантаження, жорсткість додаткової пружної ланки.

#### SUBSTANTIATION OF POSSIBILITIES TO PROTECT THE BRIDGE TYPE HOISTING CRANES AGAINST SYSTEMATIC OVERLOADS

*The necessity of bridge type cranes protection against systematic overloads is substantiated. Obtained are analytical dependencies for determining the dynamic loads in lifting ropes, when load hoisting. Determined is the desired rigidity of an additional elastic link introduced into the lifting mechanism power chain to prevent systematic overloading of the crane. Formulated are the requirements for the additional elastic link design. Recommendations are given for creating the additional elastic link structure.*

**Key words:** bridge type crane, systematic overload, additional elastic link, dynamic loads rigidity of additional elastic link.