

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ МОСТОВОГО КРАНА С ВАКУУМ-ПРИСОСНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Виконано аналіз реальної механічної системи мостового крана з вакуум-присосним обладнанням і запропоновано розрахункову схему для створеної на базі аналізу математичної моделі динамічних процесів.

Проведен анализ реальной механической системы мостового крана с вакуум-присосным оборудованием и предложена расчётная схема для созданной на основе анализа математической модели динамических процессов.

The analysis of real mechanical system of the bridge crane with vacuum-sucker equipment is made and the design scheme for the mathematical model of dynamic processes created on the basis of the analysis is offered.

Постановка проблемы

Вакуум-присосное оборудование – наиболее эффективное средство для транспортировки листов из немагнитных материалов. Однако при применении такого оборудования возникает ряд трудностей, связанных со значительной удельной нагрузкой на единицу площади присоски, образованием шара окалина, запыленностью листов с неровностями их плоскостности. В литературе отсутствуют данные по общей методике расчёта вакуумных устройств в условиях динамического нагружения.

Постановка задачи

Целью данной статьи является анализ динамики мостового крана с вакуум-присосным оборудованием в целом, выбор и обоснование расчётной схемы.

С позиций динамического расчёта грузоподъёмный кран является единой динамической системой, состоящей из механизмов, несущей металлоконструкции, приводов и строительной части сооружения, в котором работает кран. Учесть всё многообразие взаимодействующих элементов крана в динамическом расчёте достаточно сложно, в большинстве случаев в этом нет необходимости. При переходе от реальной машины к её расчётной схеме следует пренебречь теми физическими факторами, которые для данного расчёта имеют несущественное значение.

Предложение варианта расчётной схемы

В общем случае при составлении расчётных динамических схем грузоподъёмных кранов учитывается количество дискретных масс, распределение масс по длине силового элемента, податливость силовых элементов и возможность её изменения в конкретной ситуации, за-

висимость движущих и тормозящих усилий приводных двигателей от частоты вращения ротора, переходные электромагнитные процессы в приводных электродвигателях, изменение тормозящих усилий механических тормозов во времени, изменение приведенных масс механизмов и проч. В каждом отдельном случае расчёта некоторые физические факторы суть главные, определяющие, другие же – второстепенные.

На рис. 1 представлен предлагаемый вариант расчётной схемы.

Приняты следующие обозначения:

m_1 – масса моста;

m_5 – масса вакуумной траверсы;

m_6 – масса поднимаемого груза;

I_2 – приведенный к барабану момент инерции электродвигателя;

I_3 – приведенный к барабану момент инерции вращающихся частей редуктора;

I_4 – момент инерции приводного барабана;

c_1 – коэффициент жёсткости металлических конструкций моста;

c_2 – коэффициент жёсткости муфты, соединяющей двигатель с редуктором;

c_3 – коэффициент жёсткости муфты, соединяющей редуктор с приводным барабаном;

c_4 – коэффициент жёсткости подъёмных канатов;

c_5 – коэффициент жёсткости вакуумных присосок;

ν_1 – коэффициент демпфирования муфты, соединяющей двигатель с редуктором;

ν_2 – коэффициент демпфирования муфты, соединяющей редуктор с приводным барабаном;

M_E – вращающий момент электродвигателя.

Таким образом, предлагается шестимассовая расчётная схема. Анализируя схему, находим, что несущая металлоконструкция мостового крана представлена дискретной массой m_1 , упругие характеристики которой отражены коэффициентом жёсткости c_1 . Представляет интерес вопрос определения и оценки усилий, действующих непосредственно на металлоконструкцию моста, как единого целого. Именно с этой целью в расчётную схему введена масса m_1 . Механизм подъёма груза представлен совокупностью элементов, как видно из схемы. Предлагается рассматривать не просто «части механизма подъёма груза, которые вращаются», а отдельно электродвигатель (I_2), редуктор (I_3), приводной барабан (I_4) и соединительные муфты, обладающие характеристиками – коэффициентами жёсткости и демпфирования (c_1 и v_1, c_2 и v_2).

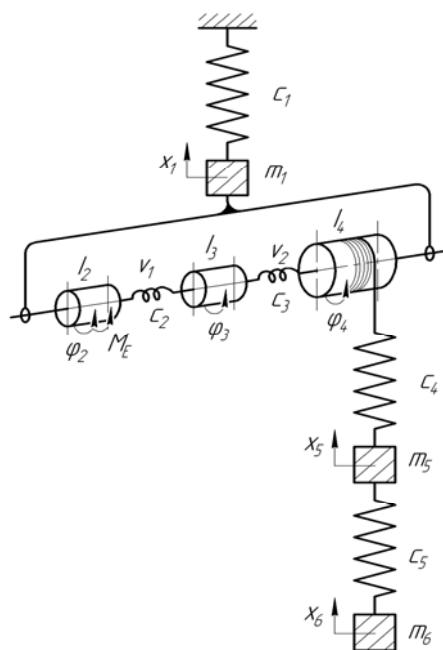


Рис. 1. Шестимассовая расчётная схема мостового крана с вакуум-присосным оборудованием

Данный подход позволяет рассмотреть механизм подъёма груза как крутильную колебательную механическую систему, которая является подсистемой системы более высокого порядка – системы мостового крана с вакуум-присосным оборудованием и грузом, который поднимается. Моменты инерции каждой из составляющих этой крутильной системы сведены к приводному барабану. Поскольку механизм подъёма груза жёстко закреплён на несущей металлоконструкции мостового крана, то и в

расчётной схеме это отражено соответствующей жёсткой связью между массой m_1 и крутильной подсистемой – «механизм подъёма груза».

Анализ расчётных схем

Установлено [2], что наиболее точно отражающей физический процесс работы мостового крана в реальных условиях моделью является трёхмассовая механическая система, в которой учитываются как масса поднимаемого груза и механизма подъёма, так и масса главных балок моста. Таким образом, наиболее точно отражающей динамику подъёма груза мостовым краном моделью является совокупность дискретной (а не континуальной модели) модели моста и двухмассовой модели механизма подъёма. Такого рода расчётная схема изображена на рис. 2. Приведенная выше модель наиболее полно описывает динамический процесс, происходящий в реальных условиях. Такого рода утверждение основано на опытных данных, полученных отечественными учёными при проведении экспериментальных исследований, которые показали, что расхождение между результатами математического моделирования и опытными данными составляет **не более 5...7 %**, что, безусловно, является вполне удовлетворяющим требованиям к точности инженерных расчётов. Работа мостового крана с таким специфическим оборудованием, как вакуум-присосная траверса, безусловно, порождает изменения в динамическом процессе подъёма груза. Степень подобного влияния будет оценена в данной статье. Вакуумную траверсу представим дискретной массой. Таким образом, трёхмассовая механическая система посредством введения дополнительной массы m_n преобразуется в четырёхмассовую.

На рис. 2 изображена четырёхмассовая механическая система мостового крана, где c_0 – коэффициент жёсткости металлических конструкций моста;

$c(l)$ – коэффициент жёсткости подъёмных канатов;

c_1 – коэффициент жёсткости вакуумных присосок;

β_0 – коэффициент демпфирования металлических конструкций моста;

β – коэффициент демпфирования подъёмных канатов;

β_1 – коэффициент демпфирования вакуумных присосок;

m_0 – масса грузовой тележки и двух балок моста;

m_1 – масса вращающихся частей привода механизма подъёма груза;
 m_n – масса вакуумной траверсы;
 m_2 – масса поднимаемого груза;
 $F(x'_1)$ – приведенная движущая (тормоз-

ная) сила привода механизма подъёма груза;

x, x_1, x_2, x_3 – координаты перемещений соответственно моста с грузовой тележкой, вращающихся частей привода, поднимаемого груза и вакуумной траверсы.

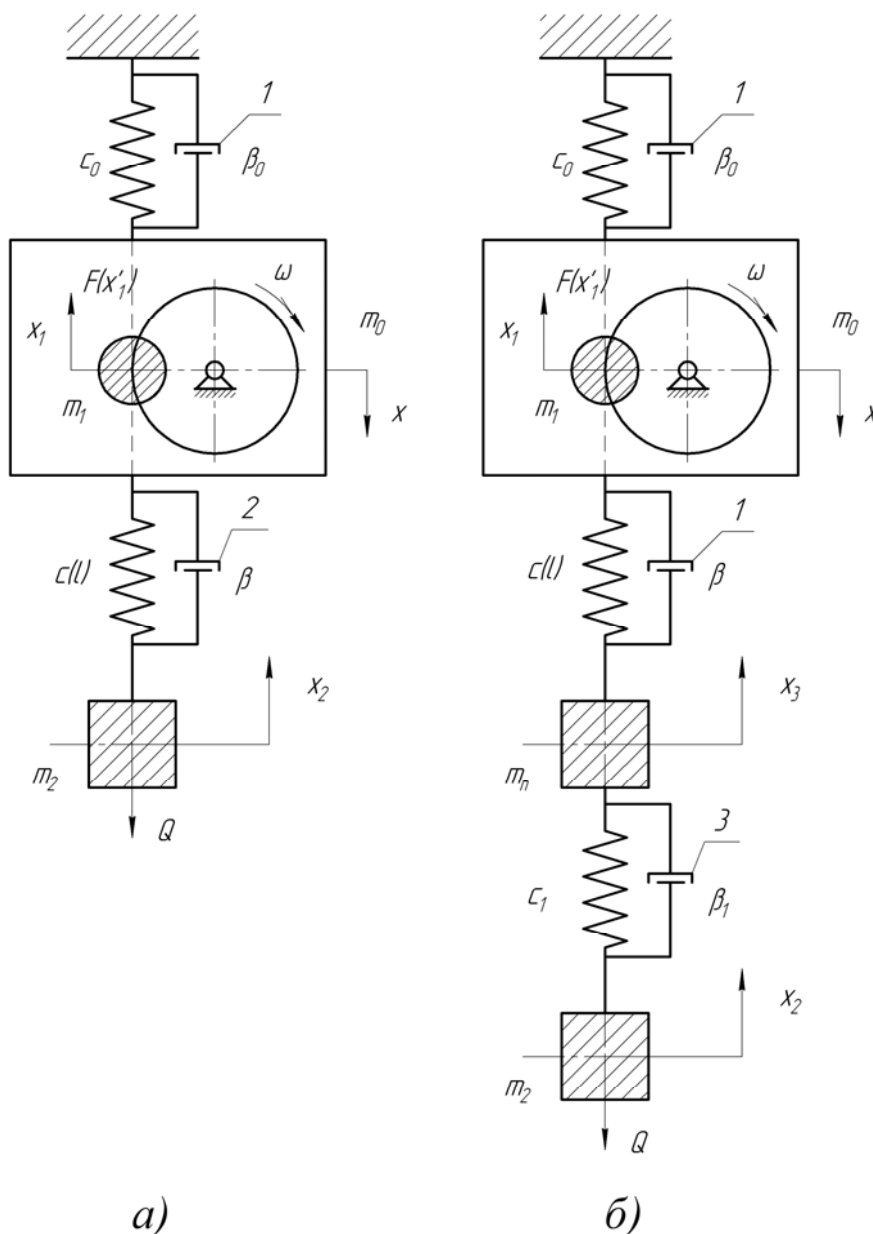


Рис. 2. Расчётные схемы мостового крана

Математическая модель процесса подъёма груза

Будем рассматривать три фазы процесса подъёма груза:

- 1) фаза выборки зазоров в системе;
- 2) доотрывная фаза;
- 3) послеотрывная фаза.

Известно, что во время первой фазы происходит пуск привода механизма подъёма и соответственно выбираются все зазоры в узлах крана. Вторая фаза характеризуется уже движени-

ем всех масс, входящих в систему, кроме самого груза. И с отрывом груза от основания начинается третья, последняя фаза, непосредственно подъём груза. Отметим, что производится подъём монолитного груза с абсолютно жёсткого основания. Рассматриваем подъём груза с основания «с подхватом».

Запишем систему дифференциальных уравнений движения для первой, трёхмассовой, схемы (начнём сразу со второй фазы, поскольку во время первой фазы в движении находится

только электродвигатель привода механизма подъёма; скорость, набранная электродвигателем к началу второго этапа, будет в дальнейшем учтена в начальных условиях):

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} = S - F; \\ m_1\ddot{x}_1 = P - S, \end{cases} \quad (1)$$

где S – усилие в подъёмных канатах;

F – усилие в металлоконструкции крана;

P – движущее усилие привода механизма подъёма груза.

Усилие, возникающее в металлоконструкции крана, запишется следующим аналитическим выражением:

$$F = c_0x + \beta_0\dot{x}. \quad (2)$$

Усилие в подъёмных канатах имеет следующий вид:

$$S = c(l) \cdot (x_1 - x) + \beta \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}). \quad (3)$$

Т.к. жёсткость подъёмных канатов переменна (изменяется с изменением длины), то выражение $c(l)$ запишется следующим образом [2]:

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} + c_0x + \beta_0\dot{x} + c_n(x - x_1) + \beta(\dot{x} - \dot{x}_1) = 0; \\ m_1\ddot{x}_1 + c_n(x_1 - x) + \beta(\dot{x}_1 - \dot{x}) + \frac{a_2\dot{x}_1 - a_1}{a_3 + \alpha(-a_4\dot{x}_1 + \dot{x}_1^2)} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений движения в третьей фазе имеет вид [2, с. 18]:

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} = S - F; \\ m_1\ddot{x}_1 = P - S; \\ m_2\ddot{x}_2 = S - Q, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} + c_0x + \beta_0\dot{x} + c_n(x_2 - x_1 + x) + \beta(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 + \dot{x}) = 0; \\ m_1\ddot{x}_1 + c_n(x_1 - x - x_2) + \beta(\dot{x}_1 - \dot{x} - \dot{x}_2) + \frac{a_2\dot{x}_1 - a_1}{a_3 + \alpha(-a_4\dot{x}_1 + \dot{x}_1^2)} = 0; \\ m_2\ddot{x}_2 + Q + c_n(x_2 - x_1 + x) + \beta(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 + \dot{x}) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Перейдём к составлению математической модели мостового крана с вакуум-присосным оборудованием, т.е. четырёхмассовой механической системы. Зерно изменения динамики мостового крана с вакуумной траверсой будет лежать в наличии ещё одной дискретно представленной массы – массы вакуумной траверсы. В четырёхмассовой системе помимо движущей силы привода механизма подъёма груза, таких внутренних усилий, как натяжение подъёмных канатов и сила, действующая на метал-

$$S = \frac{c_n a_0 (x_1 - x) + \beta(\dot{x}_1 - \dot{x})}{1 - bc_n(x_1 - x)/S_n}, \quad (4)$$

где a_0 и b – постоянные коэффициенты.

Движущее усилие электродвигателя при любом роторном сопротивлении согласно уравнению Клосса запишется в таком виде [2]:

$$P = \frac{a_1 - a_2\dot{x}_1}{a_3 + \alpha(-a_4\dot{x}_1 + \dot{x}_1^2)}, \quad (5)$$

где $a_1 = 2P_k s_k \dot{x}_c^2$, $a_2 = \frac{a_1}{\dot{x}_c}$, $a_3 = s_k^2 \dot{x}_c^2 + \dot{x}_c^2$,

$a_4 = 2\dot{x}_c$ (P_k и s_k – критические значения движущего усилия и скольжения; $\dot{x}_c$ – синхронная скорость подъёма груза).

Коэффициент жёсткости подъёмных канатов будем аппроксимировать ступенчато (начальная и конечная величина натяжения канатов). Принимаем, что электродвигатель работает на линейной ветви механической характеристики (производится подъём номинального груза), поэтому $\alpha = 0$. Таким образом, учитывая все вышеприведенные выкладки, система дифференциальных уравнений движения во второй фазе запишется следующим образом [2]:

где Q – вес поднимаемого груза. Также отметим, что коэффициент жёсткости на этой стадии принимаем постоянным. Развёрнутая система дифференциальных уравнений запишется следующим образом:

локонструкцию моста, возникнет усилие в вакуумных присосках оборудования (сила, действующая на вакуумную траверсу в целом). Обозначим усилие, возникающее в вакуумных присосках, R .

Во время доотрывной фазы система дифференциальных уравнений запишется так:

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} = S - F; \\ m_1\ddot{x}_1 = P - S; \\ m_{п}\ddot{x}_3 = S - R, \end{cases} \quad (9)$$

где R – сила веса вакуумной траверсы (заметьте, что это для доотрывной фазы процесса подъёма груза, т.е. груз находится во время этой фазы ещё на основании). На данном этапе:

$$R = c_1(x_3 - x_2) + \beta_1(\dot{x}_3 - \dot{x}_2). \quad (10)$$

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} + c_0x + \beta_0\dot{x} + c_n(x_3 - x_1 + x) + \beta(\dot{x}_3 - \dot{x}_1 + \dot{x}) = 0; \\ m_1\ddot{x}_1 + c_n(x_1 - x - x_3) + \beta(\dot{x}_1 - \dot{x} - \dot{x}_3) + \frac{a_2\dot{x}_1 - a_1}{a_3 + \alpha(-a_4\dot{x}_1 + \dot{x}_1^2)} = 0; \\ m_n\ddot{x}_3 + c_1x_3 + \beta_1\dot{x}_3 + c_n(x_3 - x_1 + x) + \beta(\dot{x}_3 - \dot{x}_1 + \dot{x}) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Фазой, которую назовём предотрывной, т.е. фазой, во время которой не только поднимаемый груз находится на основании, но и вакуумное оборудование неподвижно, пренебрегаем.

Перейдём к рассмотрению последней фазы – послеотрывной. Эта фаза – период непосредственно подъёма груза. В это время в мостовом кране, как механической системе в движении, находятся все дискретные массы, представленные в нашей четырёхмассовой модели. Следовательно, получаем систему из четырёх дифференциальных уравнений, которая запишется так, как показано ниже:

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} = S - F; \\ m_1\ddot{x}_1 = P - S; \\ m_n\ddot{x}_3 = S - R; \\ m_2\ddot{x}_2 = R - Q, \end{cases} \quad (12)$$

где R – усилие, возникающее в вакуумных присосках при подъёме груза. В этой фазе аналитическое выражение для R запишется следующим образом:

$$R = c_1(x_3 - x_2) + \beta_1(\dot{x}_3 - \dot{x}_2). \quad (13)$$

В развёрнутом виде система будет иметь вид:

$$\begin{cases} m_0\ddot{x} + c_0x + \beta_0\dot{x} + c_n(x_2 + x_3 - x_1 + x) + \beta(\dot{x}_2 + \dot{x}_3 - \dot{x}_1 + \dot{x}) = 0; \\ m_1\ddot{x}_1 + c_n(x_1 - x - x_2 - x_3) + \beta(\dot{x}_1 - \dot{x} - \dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \frac{a_2\dot{x}_1 - a_1}{a_3 + \alpha(-a_4\dot{x}_1 + \dot{x}_1^2)} = 0; \\ m_n\ddot{x}_3 + c_1(x_2 - x_1 - x_3 + x) + \beta_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 - \dot{x}_3 + \dot{x}) + c_n(x_2 + x_3 - x_1 + x) + \beta(\dot{x}_2 + \dot{x}_3 - \dot{x}_1 + \dot{x}) = 0; \\ m_2\ddot{x}_2 + Q + c_1(x_1 + x_3 - x_2 - x) + \beta_1(\dot{x}_1 + \dot{x}_3 - \dot{x}_2 - \dot{x}) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Выводы

Предложенный в статье вариант расчётной схемы позволит в дальнейшем детально изучить динамические воздействия на составляющие механической системы. Определение сил, действующих на металлоконструкцию моста, позволит оптимизировать их поперечные сечения и конструкцию. Знание величин сил, действующих на груз, позволит оценить возможные риски при подъёмно-транспортных работах. Характер воздействия силовых факторов на подъёмную траверсу позволит рационально её сконструировать. Все эти вопросы являются предметом дальнейших исследований этого оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Роспasiенко, В. И. Вакуум-присосные устройства для транспортирования листового металла [Текст] / В. И. Роспasiенко, И. Г. Роспasiенко // Подъёмно-транспортная техника. – 2003. – № 3. – С.128-138.
2. Лобов, Н. А. Динамика грузоподъёмных кранов [Текст] / Н. А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
3. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории упругих колебаний [Текст] / Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1967. – 316 с.
4. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

Поступила в редколлегию 28.11.2008.