

Управление и защита грузоподъемного крана с гашением раскачивания груза

Зарецкий Анатолий Абрамович, д.т.н., ОАО «Машстройиндустрия»,
 Каминский Леонид Станиславович, к.т.н., технический директор ООО НПП «ЭГО»,
 Маш Дмитрий Матвеевич, к.т.н., ООО НПП «ЭГО»,
 Пятницкий Игорь Андреевич, главный конструктор ООО НПП «ЭГО»,
 Фёдоров Игорь Германович, к.т.н., директор ООО НПП «ЭГО»

1. Введение

Существующая в настоящее время методика управления и защиты грузоподъемных механизмов со снижением уровня раскачивания груза предусматривает тривиальное инициирование и остановку движения оборудования оператором (крановщиком), который интуитивно, в соответствии со своей квалификацией, производит учёт динамики перемещающегося груза. Остановка движения оборудования при срабатывании системы защиты от перегрузки или от столкновений с препятствиями производится путем автоматического отключения приводов механизмов либо сразу, либо с незначительной задержкой по времени, предназначенной для исключения влияния помех на момент подачи сигнала от системы управления (Патент РФ на изобретение № 2116240 от 31.03.1997 г.).

Недостатком данного алгоритма является то обстоятельство, что во время управления краном не учитывается динамика перемещающегося груза, и в зависимости от установленного режима и скорости движения могут возникать колебания груза довольно низкой частоты. В отличие от помех отфильтровать эти колебания невозможно, так как для них постоянная времени фильтра имеет значительный уровень (несколько секунд), что недопустимо для срабатывания устройств защиты. Наличие же колебаний груза связано со снижением производительности, энергетическими потерями, а в некоторых случаях - со столкновениями и поломкой оборудования.

При совершенствовании управления и защиты грузоподъемных кранов предполагается расширение функциональных возможностей существующего алгоритма управления за счет создания такого режима приводов механизмов крана, при котором обеспечивается гашение раскачивания груза как в начале, так и при остановке его перемещения, что приводит к сокращению рабочего цикла.

Предлагаемый способ предусматривает силовое управление (включение в рабочий цикл на этапах разгона и торможения периода временной остановки), обеспечивающее активные меры по уменьшению динамической погрешности системы (гашению колебаний груза), снижению динамических нагрузок на кран, повышению безопасности и производительности работ, и в частности, защиту крана и груза от столкновений с препятствиями с заданной точностью.

После того, как оператор начнет инициировать движение крановых механизмов в соответствии с требуемой траекторией перемещения груза, предполагается запуск подпрограммы разгона по каждому движению. В рамках этой подпрограммы по сигналам датчиков, контролирующим положение оборудования и нагрузку на кран, производится вычисление параметров движения (скорости, ускорения, инерционных показателей) оборудования и осуществляется оптимальное управление, с целью минимизации амплитуды раскачивания груза после выхода

крана (точки подвеса груза) в режим установившегося движения.

При торможении (в результате воздействия оператора, либо при срабатывании устройств защиты) на базе вычисленных параметров движения осуществляется силовое оптимальное управление также и с целью минимизации амплитуды раскачивания груза.

Вариант подобного управления предложен в [1] и в обобщенном виде будет рассмотрен ниже. В основе реализации алгоритма предлагаемого управления лежит контроль динамической погрешности определения положения груза, оценка которой рассматривается далее. (Статическая погрешность системы, достаточно подробно рассмотренная в [2], может быть учтена, например, путем автоматической корректировки границ поля допуска на перемещение, то есть координат препятствия или конечной точки перемещения).

2. Динамические погрешности системы

Под динамической погрешностью системы будем понимать вызванные временными факторами отклонения координат груза от положения, задаваемого сигналом на включение и отключение механизмов крана.

Разделим их на методические (вызванные раскачиванием груза относительно точки подвеса – оголовка стрелы) и инструментальные (обусловленные временем прохождения сигнала на отключение механизмов до фактической их остановки). Это деление условно (особенно в части термина «методические»), однако необходимость в таком делении диктуется различным характером учета и компенсации этих погрешностей.

Погрешности, вызываемые раскачиванием груза

При разгоне и торможении механизмов, обеспечивающих перемещение груза, возникает раскачивание последнего. Отметим ряд допущений, принятых при рассмотрении динамики груза

Поскольку раскачивание груза на канатах затухает медленно и вследствие того, что при различных перемещениях приблизительно сохраняется плоскость качания груза, то при одновременном проведении нескольких операций (совмещении движений) и при чередовании пусков и торможений, колебания могут совпадать по направлению и фазе, а амплитуды колебаний при этом будут складываться. Поэтому оценка зоны, в которой может перемещаться груз независимо от сигналов системы, представляется весьма важной при построении системы управления и защиты.

Раскачивания будем рассматривать в горизонтальной плоскости, считая их независимыми от возможных колебаний груза в вертикальной плоскости, вызываемых, например, динамикой приводов.

Учет динамики груза произведем на двух уровнях. Первоначально учет динамики груза будет проведен без учета

динамики самого крана, когда вся масса крана приводится к оголовку стрелы, на который воздействуют определенные внешние силы или которому придается определенная скорость. Такое упрощение допустимо по следующим соображениям. Как подчеркивают исследователи кранов [3, 4, 5], собственные частоты и амплитуды колебаний кранов и частоты и амплитуды раскачивания грузов существенно отличаются (иначе краны бы опрокидывались).

Вместе с тем, учитывая, что самоходные краны с точки зрения защиты от столкновений с препятствиями до настоящего времени не исследовались, а не жесткость их конструкции (по мере увеличения длины многосекционной телескопической стрелы или работа пневмоколесных кранов) может существенно повлиять на параметры раскачивания груза, представляется необходимым учесть и упруго-динамические свойства кранов. Следует также иметь в виду, что, исследуя возможность осуществления управляемого разгона и (или) торможения механизмов крана с целью гашения раскачивания груза, необходим учет упруго-динамических свойств крана. Это предмет исследований на втором уровне.

Отметим также, что в расчетах могут быть использованы как параметры силового воздействия привода или тормоза на кран, так и кинетические законы движения звеньев механизмов. Второй случай особенно удобен, когда упругие колебания системы не оказывают практического влияния на законы движения механизма.

Теоретической основой исследований колебаний голономных (не содержащих производных или содержащих, но интегрируемых) систем с конечным числом степеней свободы служат уравнения Лагранжа в обобщенных координатах. В этих уровнях величины, определяющие движение системы (обобщенные координаты и их производные по времени), непосредственно связаны с заданными (обобщенными) силами.

Уравнения Лагранжа второго рода записываются согласно [6]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} = F_k \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия;
 Π – потенциальная энергия;
 q_k – обобщенные координаты;
 F_k – обобщенные внешние силы.

После определения кинетической и потенциальной энергии системы и преобразования по (1) получается система дифференциальных уравнений, решение которой позволяет судить о динамике системы.

Раскачивание грузов при разгоне и остановке механизмов перемещения

Обобщенную схему механизмов представим в виде двух масс, одна из которых (m_1) приведена к оголовку стрелы, а другая (m_2), связанная с первой нерастяжимой нитью, совершает колебательные движения (раскачивание).

На рис. 1 изображены эти массы, причем на m_1 действуют силы $f(t)$ под углом α к горизонту в соответствии с фактическим движением оголовка стрелы при остановке (срабатывании системы защиты):

- а) при телескопировании;
 - б) при опускании стрелы;
 - в) при повороте.
- Далее принято:
 m_1 – приведенная (к оголовку стрелы) масса:
 — выдвигаемых секций в случае телескопирования;
 — всей стрелы в случае ее опускания;

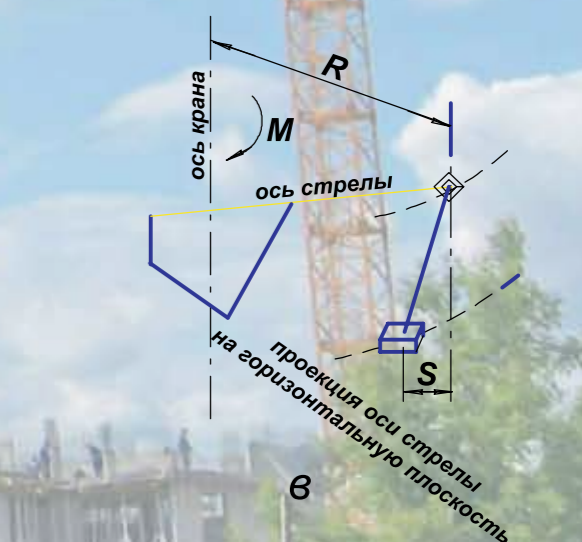
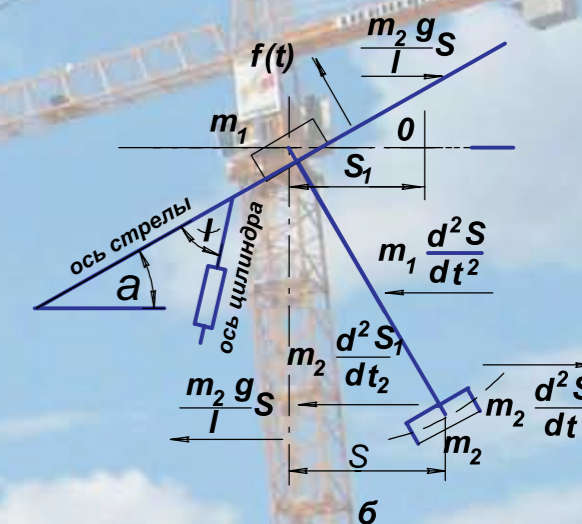
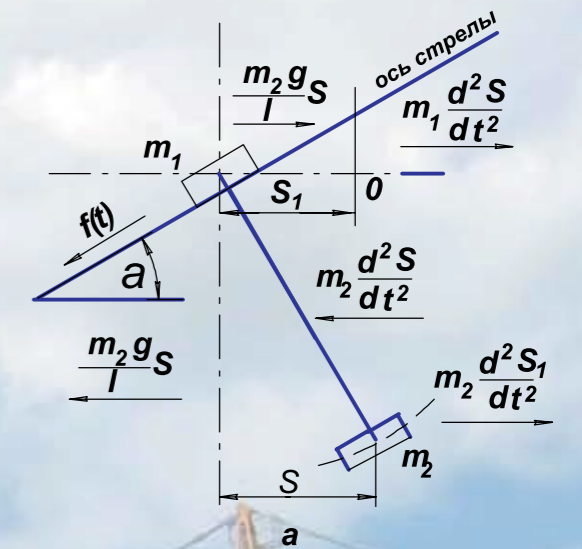


Рис. 1

m_2 – масса груза;
 l – длина каната;
 $f(t)$ – ускоряющая (замедляющая) силы;
 $f_R(t)$ – проекция ускоряющей (замедляющей) силы на горизонтальную плоскость;
 S – амплитуда горизонтальных раскачиваний груза в системе координат, движущейся с массой m_1 ;
 S_1 – расстояние массы m_1 (по горизонтали) от начала неподвижных координат в момент t
 t – время;
 g – ускорение силы тяжести.

Полагая для малых углов раскачивания $tg\gamma \cong \frac{S}{l}$, запишем дифференциальное уравнение движения массы m_2 (груза) и m_1 :

$$m_2 \left(\frac{d^2 S}{dt^2} - \frac{d^2 S_1}{dt^2} \right) - \frac{m_2 g}{l} S = 0 \quad (2)$$

$$m_1 \frac{d^2 S}{dt^2} + \frac{m_2 g}{l} S = f_R(t)$$

Поставим значение $\frac{d^2 S_1}{dt^2} = \frac{d^2 S}{dt^2} + \frac{g}{l} S$ из первого уравнения системы (2) во второе. Получим

$$m_1 \frac{d^2 S}{dt^2} + \frac{g}{l} (m_1 + m_2) \cdot S = f_R(t)$$

$$\text{или } \varphi(t) = \frac{P \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g} \quad (3)$$

Полученное выражение является дифференциальным уравнением движения груза в системе координат, имеющей начало на вертикальной оси, проходящей через центр свободно висящего груза (m_2).

Общее решение уравнения (3) имеет вид:

$$S = A \sin \cdot \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \cdot t + B \cos \cdot \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \cdot t + \varphi(t), \quad (4)$$

где $\varphi(t)$ – частное решение уравнения (4), зависящее от режима разгона или остановки.

В порядке первого приближения примем силу $f_R(t)$ равной P – усилию (давлению) в гидроцилиндре. Тогда, подставляя это значение $f_R(t)$ в уравнение (4), находим его частное решение:

$$\varphi(t) = \frac{P \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g}$$

где $P^* = P \cdot \cos \alpha$ (для рис. 1а),

$$P^* = P \cdot \sin \alpha \cdot \sin \psi \quad (\text{для рис. 1б}),$$

причем P_1 и P_2 – соответственно усилия гидроцилиндров телескопа и подъема стрелы.

Теперь уравнение (4) получим в виде:

$$S = A \sin \cdot \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \cdot t + B \cos \cdot \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \cdot t + \frac{P \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g}$$

$$+ \frac{P^* \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g} \quad (5)$$

Начальные условия – при $t = 0$; $S = 0$; $\frac{dS}{dt} = 0$.

$$\text{Тогда } A = 0; B = \frac{P^* \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g}$$

Окончательно получаем:

$$S = \frac{P^* \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g} \cdot \left[1 - \cos \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \cdot t \right] \quad (6)$$

Из (6) видно, что при разгоне и торможении механизмов крана груз совершает колебание относительно наклонной оси, определяемой средним значением амплитуды:

$$S_{cp} = \frac{P^* \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g}$$

Максимальное значение S_{max}

$$\text{при } \cos \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} = -1$$

$$\text{равно } S_{max} = \frac{2P^* \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g} \quad (7)$$

Значению S_{max} соответствует время t_{max}

$$t_{max} = \pi \sqrt{\frac{l \cdot m_1}{g \cdot (m_1 + m_2)}}$$

Если время разгона или торможения $t_1 < t_{max}$, то в первой волне качания:

$$S_{max} = \frac{P^* \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g} \cdot \left[1 - \cos \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \cdot t_1 \right] \quad (8)$$

В приведенных выше формулах частота колебаний груза

$$\kappa = \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \quad (9)$$

зависит от массы и длины подвеса груза l , которая в рабочем цикле изменяется.

В (6) и (7) значения P^* (или P) зависят от двух слагаемых

$$P = P_m + W, \quad (10)$$

где $P_m = \frac{M_m}{R_B \cdot \eta}$ – приведенная тормозящая сила,

причем M_m – момент, создаваемый тормозом;

R_B – радиус тормоза;

η – КПД механизма;

W – статическое сопротивление перемещению.

Пренебрегая трением скольжения отдельных узлов механизма перемещения получим:

$$W = + m_2 \cdot g \cdot \sin \alpha \quad \text{для рис. 1а}$$

$$W = - m_2 \cdot g \cdot \cos \alpha \quad \text{для рис. 1б}$$

Для случая торможения механизма поворота (рис. 1в) формула (6) преобразуется, если принять

$$P = \frac{M}{R}, \quad m_1 = \frac{J}{R} \quad \text{и } J = J_1 + J_2,$$

где M – избыточный вращающий (тормозящий) момент двигателя (тормоза);

R – вылет;

J_1 – приведенный момент инерции вращающихся частей вала двигателя;

J_2 – приведенный момент инерции вращающихся частей крана, то

$$S = \frac{M \cdot l}{g \cdot R \cdot \left(m_2 + \frac{J}{R^2}\right)} \cdot \left[1 - \cos \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2 \cdot R_2}{J}\right)} \cdot t \right], \quad (11)$$

причем $M = M_m + M_c$, где M_m и M_c – соответственно момент тормоза и момент статического сопротивления.

Выше рассматривался случай, когда торможение (или разгон) стрелы с подвешенным грузом совершался при грузе, висящем отвесно по отношению к оголовку. С точки зрения определения максимальной амплитуды раскачивания и необходимых мер, связанных с недопущением раскачивания, рассмотрим случай, когда в результате разгона груз начал раскачиваться, к моменту торможения раскачивания не затухли и торможение стрелы началось при раскачивающемся грузе. На рис. 2 приведена диаграмма скорости такого движения, причем для упрощения анализа ускорение на участке $0 - t_0$ и замедление на участке $t_1 - t_2$ принимались равными (ускоряющая и замедляющая силы равны).

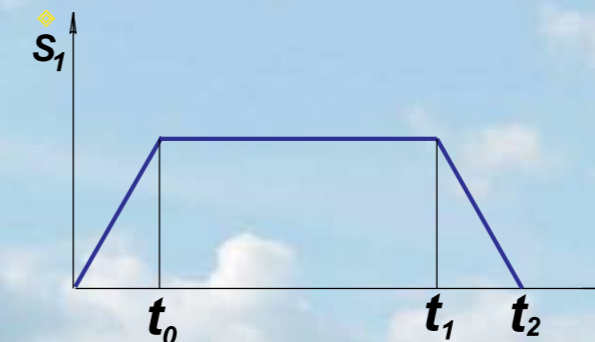


Рис.2

Выражение (6) запишем как

$$S = F \cdot (1 - \cos \kappa t), \quad (12)$$

где

$$F = \frac{2P^* \cdot l}{(m_1 + m_2) \cdot g} \quad \text{из (5)}$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \quad \text{из (9)}$$

Выражение (12) характеризует движение груза на этапе разгона ($0 - t_0$). На втором этапе равномерного движения ($t_0 - t_1$), когда ускоряющая сила равна нулю, в общем решении уравнения (4) будет принято $\dot{\phi}(t) = 0$, а коэффициенты A и B найдены из начальных условий, когда

$$S = F \cdot (1 - \cos \kappa t_0), \quad \dot{S} = F \cdot \kappa \cdot \sin \kappa t_0$$

Решение системы

$$S = A_1 \cdot \cos \dot{\epsilon} t_0 + \dot{A}_1 \cdot \sin \dot{\epsilon} t_0 = F \cdot (1 - \cos \dot{\epsilon} t_0)$$

$$\dot{S} = \kappa \cdot (A_1 \cdot \sin \kappa t_0 - B_1 \cdot \cos \kappa t_0) = F \cdot \dot{\epsilon} \cdot \sin \dot{\epsilon} t_0$$

приводит к значению

$$A_1 = F \cdot (1 - \cos \dot{\epsilon} t_0) \quad B_1 = -F \cdot \sin \dot{\epsilon} t_0,$$

в результате чего

$$S = F \cdot [\cos \dot{\epsilon} t - \cos \dot{\epsilon} (t - t_0)] \quad (13)$$

$$\text{при } t_0 = \frac{\pi}{\kappa} - S = 2F \cdot \cos \kappa t \quad \text{и } S_{max} = 2F \quad (14)$$

На третьем этапе равнозамедленного движения ($t_1 - t_2$) замедляющая сила равна $\phi(t) = +P^*$, а коэффициенты A и B в уравнении (4) находятся из начальных условий,

$$S = F \cdot [\cos \dot{\epsilon} t_1 - \cos \dot{\epsilon} (t - t_0)]$$

$$\dot{S} = F \cdot \kappa \cdot [-\sin \kappa t_1 + \sin \kappa (t_1 - t_0)]$$

Решение системы

$$S = A_2 \cdot \cos \dot{\epsilon} t_1 + B_2 \cdot \sin \dot{\epsilon} t_1 = F \cdot [\cos \dot{\epsilon} t_1 - \cos \dot{\epsilon} (t_1 - t_0)] + F$$

$$\dot{S} = \kappa \cdot (-A_2 \cdot \sin \kappa t_1 + B_2 \cdot \cos \kappa t_1) = F \cdot \kappa \cdot [-\sin \kappa t_1 + \sin \kappa (t_1 - t_0)]$$

приводит к значениям

$$A_2 = F (1 - \cos \kappa t_0 - \cos \kappa t_1)$$

$$B_2 = -F \cdot (\sin \kappa t_0 + \sin \kappa t_1), \quad \text{в результате чего}$$

$$S = F \cdot [1 + \cos \dot{\epsilon} t_1 - \cos \dot{\epsilon} (t - t_0)] - \dot{\epsilon} \sin \dot{\epsilon} (t - t_1), \quad (15)$$

$$\text{а при } t_0 = \frac{\pi}{\kappa}, \quad t_1 = \frac{3\pi}{\kappa}$$

$$S = F \cdot (1 + 3 \cos \dot{\epsilon} t) \quad \text{и } S_{max} = 4F \quad (16)$$

Из (16) видно, что при определенных условиях включения привода и тормоза возможно повышенное раскачивание груза, что необходимо учитывать при создании координатной системы защиты. Это явление должно быть устранено инструктивными мерами и квалифицированными действиями крановщика (как это имеет место в настоящее время), либо соответствующим управлением приводами.

Продолжение в следующем номере