

Управление и защита грузоподъемного крана с гашением раскачивания груза

Зарецкий Анатолий Абрамович, д.т.н., ЗАО «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»

Продолжение, начало в № 16

Раскачивание груза при его перемещении с учетом податливости конструкции крана

Учитывая, что продольная жесткость стрелы значительно больше ее поперечной жесткости, а линейная скорость перемещения оголовка при телескопировании меньше скорости перемещения оголовка при опускании выдвинутой стрелы, далее рассмотрим (как наиболее опасный случай) опускание стрелы гидроцилиндром подъема с учетом жесткости стрелы.

Преобразуем рис. 16 в рис.3, на котором учтена поперечная жесткость стрелы С, и воздействие цилиндра производится на массу m_0 , не участвующую в колебательном процессе конструкции, тогда как груз m_2 подвешен к массе m_1 , динамически эквивалентной массе $(m_0 + m_1)$ всей конструкции.

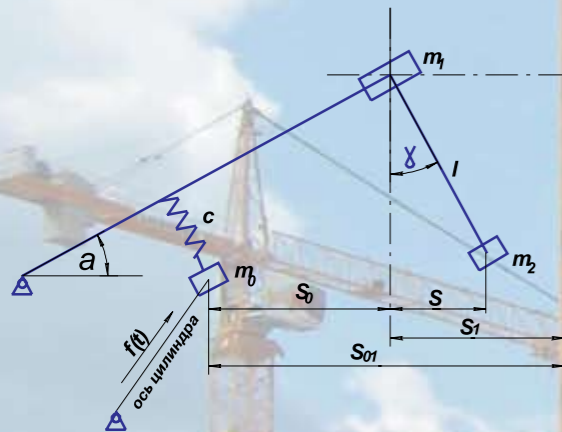


Рис. 3

Заметим, что при рассмотрении работы крана с надувных колес может быть также принята эта трехмассовая схема. В таком случае под массой m_0 надо понимать всю массу крана, а воздействие $f(t)$ производить через жесткость (C_k) опоры (колес).

Для схемы на рис.3 составим дифференциальные уравнения движения, полагая как и ранее $\text{tg} \gamma \cong \frac{S}{l}$:

$$\begin{aligned} m_0 \cdot \ddot{S}_{01} + cS_0 &= f_R(t) \\ m_1 \cdot (\ddot{S}_{01} - \ddot{S}_0) &= cS_0 - m_2 \cdot g \cdot \frac{S}{l} \\ m_2 \cdot (\ddot{S}_1 - \ddot{S}) &= m_2 \cdot g \cdot \frac{S}{l} \end{aligned} \quad (17)$$

Преобразуем (17) в систему однородных уравнений относительно обобщенных координат S и S_0 .

$$\text{Так как } \ddot{S}_{01} = \frac{f_R(t) - cS_0}{m_0}$$

$$\ddot{S}_1 = \ddot{S}_{01} - \ddot{S}_0 = \frac{f_R(t) - cS_0}{m_0} - \ddot{S}_0,$$

то после соответствующих подстановок получим:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{S}_0 + C \cdot \frac{m_0 + m_1}{m_0} \cdot S_0 - m_2 \cdot \frac{g}{l} \cdot S &= f_R(t) \cdot \frac{m_1}{m_0} \\ \ddot{S} + \ddot{S}_0 + \frac{C}{m_0} \cdot S_0 + \frac{g}{l} \cdot S &= \frac{f_R(t)}{m_0} \end{aligned} \quad (18)$$

Так как данная трехмассовая система не имеет точки закрепления, то при трех степенях свободы она имеет две формы плавных колебаний, определяемых величинами отношений амплитуд колебаний X_1 и X_2 при частотах K_1 и K_2 . Из решения (18)

$$\tilde{D}_{1,2} = \frac{\tilde{N} \cdot \frac{m_0 + m_1}{m_0} - m_1 \cdot \hat{e}_{1,2}^2}{m_2 \cdot \frac{g}{l}} \quad (19)$$

$$\text{или } \tilde{D}_{1,2} = \frac{\hat{e}_{1,2}^2 - \frac{C}{m_0}}{\frac{g}{l} - \hat{e}_{1,2}^2} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \hat{e}_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ C \cdot \frac{m_0 + m_1}{m_0 \cdot m_1} + \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \cdot \frac{g}{l} \pm \right.} \\ \left. \pm \sqrt{\left[\frac{c(m_0 + m_1)}{m_0 \cdot m_1} + \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \cdot \frac{g}{l} \right]^2 - \right.} \\ \left. - 4c \cdot \frac{g}{l} \cdot \frac{m_0 + m_1 + m_2}{m_0 \cdot m_1} \right\}} \end{aligned} \quad (21)$$

Общее решение системы (21) имеет вид:

$$S_0 = A \cdot \sin k_1 t + B \cdot \cos k_1 t + D \cdot \sin k_2 t + E \cdot \cos k_2 t + \varphi_0(t) \quad (22)$$

Определим частные решения $\varphi_0(t)$, $\varphi(t)$ и произвольные постоянные А, В, Д и Е из начальных условий при $t = 0$.

Рассмотрим торможение, закон изменения которого $f_R(t)$ приведен на рис.4.

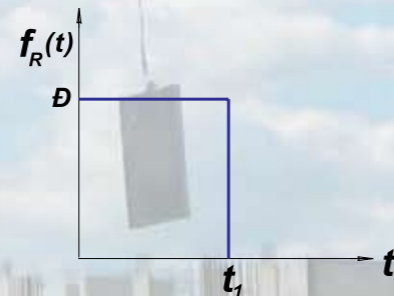


рис.4.

Для $t < t_1$ и $f_R(t) = P$ частное решение системы (22) найдем из условия

$$\begin{aligned} C \cdot \frac{m_0 + m_1}{m_0} \cdot \varphi_0(t) - m_2 \cdot \frac{g}{l} \cdot \varphi(t) &= P \cdot \frac{m_1}{m_0} \\ C \cdot \frac{1}{m_0} \cdot \varphi_0(t) + \frac{g}{l} \cdot \varphi(t) &= P \cdot \frac{l}{m_0} \end{aligned} \quad (23)$$

Откуда

$$\begin{aligned} \varphi_0(t) &= \frac{P}{C} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_0 + m_1 + m_2} = V_R = \frac{\omega(m_1 + m_2)}{C} \\ \varphi(t) &= \frac{P}{m_0 + m_1 + m_2} \cdot \frac{l}{g} = \omega \frac{l}{g} \end{aligned}$$

где V_R — прогиб конструкции по горизонтальной оси; ω — ускорение, которое вызывает сила P перемещаемых масс конструкции и груза.

При $t = 0$ $S_0 = \dot{S}_0 = S = \dot{S} = 0$.

Отсюда из решений (22) получаем

$$\begin{aligned} A = D = 0; \\ V_R \cdot X_2 - \frac{l}{g} \cdot \omega \\ B = \frac{X_1 - X_2}{X_1 - X_2} = -a \\ V_R \cdot X_1 - \frac{l}{g} \cdot \omega \\ E = \frac{X_1 - X_2}{X_1 - X_2} = -b \end{aligned}$$

В результате уравнения движения оголовка и грузов по горизонтальной оси будут

$$\begin{aligned} S_0 &= V_R - a \cdot \cos k_1 t - b \cdot \cos k_2 t \\ S &= \omega \frac{l}{g} - a \cdot X_1 \cos k_1 t - b \cdot \cos k_2 t \end{aligned} \quad (24)$$

Для получения максимальных значений S_0 и S продолжительность действия силы торможения должна быть не менее полупериода колебаний низшей частоты:

$$t_1 > \frac{\tau_1}{2}. \text{ Полагая при этом } \cos k_1 t = \cos \frac{2\pi}{\tau_1} = -1 \text{ и } \cos k_2 t = -1, \text{ из (24) получим}$$

$$\begin{aligned} S_{0 \max} &= 2 V_R \\ S_{\max} &= 2\omega \frac{l}{g} = \frac{2P \cdot l}{(m_0 + m_1 + m_2)g} \end{aligned} \quad (25)$$

Заметим, что S_{\max} по (25) совпадает S_{\max} по (7).

При $t_1 < \frac{\tau_1}{2}$ значение S_{\max} определяется подстановкой t_1 в (24).

Для оценки влияния упругих связей механизма поворота (при этом деформацией стрелы в горизонтальной плоскости по сравнению с амплитудой раскачивания пренебрежем) преобразуем схему на рис. 1 в схему на рис.5 и составим дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} J_0 \ddot{\varphi}_0 + (\varphi_0 - \varphi_1)C &= M_c + M_m \\ J_1 \ddot{\varphi}_1 - (\varphi_0 - \varphi_1)C &= -M_c - \frac{m_2 g R}{l} \cdot S \\ J_2 \left(\ddot{\varphi}_0 - \frac{\ddot{S}}{2\pi R} \right) &= \frac{m_2 g R}{l} \cdot S \end{aligned} \quad (26)$$

После преобразования и обозначая

$$\varphi_0 - \varphi_1 = \varphi; \frac{J_0 + J_1}{J_0 \cdot J_1} = \lambda_1; \frac{m_2 g R}{l} = \lambda_2; \frac{1}{2\pi R} = \lambda_3 \text{ получим}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_p + \lambda_1 \cdot C \cdot \varphi_p - \lambda_2 \cdot \frac{1}{J_0} \cdot S &= \lambda_1 \cdot M_c + \frac{M_m}{J_1} \\ \ddot{\varphi}_p + \lambda_3 \cdot \ddot{S} + \frac{\varphi_p \cdot C}{J_0} + \frac{\lambda_2 \cdot S}{J_2} &= \frac{M_c + M_m}{J_0} \end{aligned} \quad (27)$$

Общее решение системы аналогично (22), частные решения которых определим из начальных условий при $t = 0$ и законе изменения тормозного момента, аналогичного изменению усилия $f(t)$ на рис.4,

$$\begin{aligned} \lambda_1 \cdot C \cdot \varphi_0(t) - \lambda_2 \cdot \frac{1}{J_0} \cdot \varphi(t) &= \lambda_1 \cdot M_c + \frac{M_m}{J_1} \\ C \cdot \frac{1}{J_0} \cdot \varphi_0(t) + \frac{\lambda_2 \cdot \varphi(t)}{J_2} &= \frac{M_c + M_m}{J_0} \end{aligned} \quad (28)$$

откуда

$$\begin{aligned} \varphi_0(t) &= + \frac{J_0^2 (\lambda_1 \cdot J_1 \cdot M_c + M_m) + J_1 \cdot J_2 \cdot (M_c + M_m)}{C \cdot J_1 (J_0^2 \cdot \lambda_1 + J_2)} \\ \varphi(t) &= \frac{(\lambda_1 \cdot J_1 - 1) \cdot J_0 \cdot J_2 \cdot M_m}{\lambda_2 J_1 (\lambda_1 J_0^2 + J_2)} \end{aligned}$$

или после преобразований

$$\varphi(t) = \frac{M_m \cdot l \cdot R}{g (J_0^2 + J_1 + J_2)} \quad (29)$$

Выражение (29) представляет собой амплитуду отклонения груза при раскачиваниях, совпадающую с амплитудой по (11).

Согласно [5] с учетом значительного различия в частотах колебаний конструкции и груза формулы для определения колебания несколько упрощены и составляют:

для груза S — согласно (11)
 частота $K_2 = \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2 R^2}{J_0 + J_1}\right)}$ (30)

для оголовка:

частота $K_1 = \sqrt{\frac{(J_0 + J_1) \cdot C}{J_0 J_1}}$ (31)

$$\varphi_p = \frac{J_0 (M_m + M_c)}{C (J_0 + J_1)} (1 - \cos K_1 t) + \frac{M_m \cdot J_1 \cdot m_2 (1 - \cos K_2 t)}{C (m_2 + \frac{J_0 + J_1}{R^2}) \cdot (J_0 + J_1)} - \frac{M_c}{C} \quad (32)$$

Полученные результаты, которые прежде обусловлены существенной разницей в частотах раскачивания груза и собственной частоты колебаний конструкции крана, позволяют оценивать допуск на размеры, ограничивающие препятствия типа «стена», а в общем случае (при управлении краном) допуск на координаты остановки движения по величине амплитуды S_{\max} , раскачивания подвешенного груза без учета влияния упругих свойств оборудования крана.

Однако в случае защиты от ЛЭП как от отдельного провода (рис.6) амплитуда колебаний оголовка, влияющая на допуск «а», должна быть учтена.

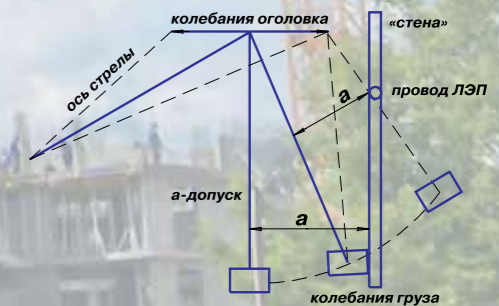


Рис. 6

Раскачивание груза при подъеме его с земли

Горизонтальные раскачивания груза возникают также при подъеме груза с земли, что обусловлено податливостью как самой стрелы, так и иных упругих элементов крана (опорно-поворотного круга, рам выносных опор) и грунта. Эти факторы приводят к смещению по горизонтали проекции точки подвеса груза (оголовка стрелы) относительно самого груза, что при отрыве груза от земли вызывает его колебания. Амплитуда этих колебаний должна учитываться как для оценки колебаний при других движениях (например в случае разгона или торможения телескопа, подъема стрелы, а при повороте крана на 90° и поворота) в качестве начальных условий, так и непосредственно (вблизи от препятствия).

Амплитуда колебаний может быть определена по формуле, учитывающей влияние следующих факторов (рис.7): прогиб стрелы, упругую деформацию опорных элементов крана и грунта (поворот ходовой рамы), упругую деформацию опорных элементов крана и грунта (поворот ходовой рамы относительно горизонта), а также неточность наведения точки подвеса груза (крюка с расчалками) на центр тяжести груза (погрешность S_и). Тогда амплитуда горизонтальных колебаний груза после его отрыва от земли будет:

$$S = S_{кр} + \Delta R, \pm S_{и} \quad (32)$$

В (32) ΔR, взято из [2], а S_{кр} определяется как изменение вылета R в результате изменения угла наклона стрелы Δα = η

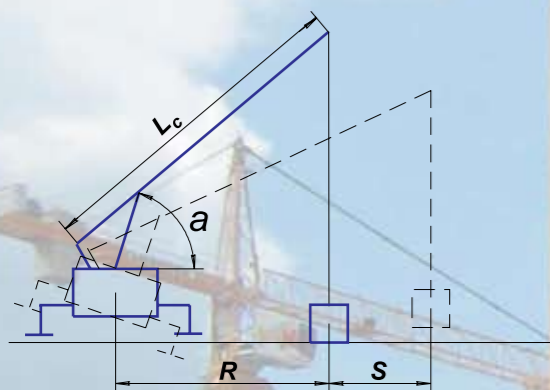


Рис. 7

Так как вылет $R \cong L_c \cos \alpha$, где L_c — длина стрелы, — угол наклона стрелы, то

$$\delta R = \frac{\partial R}{\partial \alpha} \Delta \alpha \cdot \frac{1}{R} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \Delta \alpha$$

где δR и ΔR — относительное и абсолютное изменение вылета

$$\eta = \eta' + \eta''$$

где η' и η'' — соответственно углы поворота платформы относительно ходовой рамы и ходовой рамы относительно горизонта.

Техническими требованиями на поворотные круги задан предельный угол поворота

$$\eta_{пр} = 0,002 \text{ рад. от максимального момента } M = Q_{\max} R.$$

Тогда фактический угол η' будет равен

$$\eta' = 0,002 \frac{Q}{Q_{\max}} \text{ (рад)}$$

Для вычисления угла η'' также следует принять форму записи

$$\eta'' = d \frac{Q}{Q_{\max}}$$

где d = f(C_{гр}, C_{рам}, φ) требует экспериментального определения, а C_{гр} и C_{рам} — жесткости грунта и рамы, φ — угол поворота платформы. Тогда (32) преобразуется

$$S = L_c \cdot \sin \alpha \cdot (0,002 + d) \frac{Q}{Q_{\max}} + \Delta R, \pm S_{и} \quad (33)$$

Погрешности, вызываемые запаздыванием сигнала на отключение механизмов

Прохождение сигнала на отключение механизмов до момента остановки происходит за время τ_i, где индекс i означает соответствие времени τ конкретному перемещению (телескопированию, опусканию стрелы или повороту). Это время, умноженное на скорость перемещения \dot{S}_{li} оголовка стрелы образует путь, который может быть выражен через угол поворота соответствующего датчика: телескопирования, угла наклона стрелы или поворота платформы

$$\Delta = \dot{S}_{li} \cdot \tau_i \quad (34)$$

Погрешность системы при этом может быть определена по одной из формул для определения статической погрешности [2] в зависимости от осуществляемого движения (для совмещенного движения по формуле, определяющей максимальную погрешность). Учитывая, что в погрешностях (34) велика доля систематической составляющей, последняя может быть скомпенсирована предварительным отключением механизмов на время, зависящее от вида движения (более точно — с учетом длины стрелы, с ростом которой увеличиваются линейные скорости).

На основе проведенного анализа возможных динамических погрешностей можно сделать следующие выводы.

1. Применение на кранах системы автоматической защиты и управления предъявляет существенные требования к приводным механизмам кранов, в частности к возможному снижению ускорений при разгоне и торможении. Так как при этом с целью уменьшения амплитуды раскачивания время разгона должно быть ограничено, снижению подлежит уровень ускоряющей силы.

2. В случае торможения, когда при небольшом тормозном моменте возрастает погрешность «выбега» механизма, а при большом тормозном моменте — погрешность в результате раскачивания груза, необходимым условием применения автоматической системы защиты является применение предварительной ступени управления приводами, снижающими скорость перемещения.

3. При существенно различных частотах колебаний крана и груза для определения параметров движения, а также допуска на ограничение препятствий типа «стена» достаточно рассматривать кран как двухмассовую систему.

4. При оценке максимально возможной погрешности от раскачивания груза при совмещении движений погрешности складываются арифметически. Наиболее успешная работа системы защиты и управления возможна при обеспечении активных мер для гашения колебаний груза как при разгоне, так и при торможении.

5. Целесообразность компенсации погрешности, возникающей в результате запаздывания отключения механизмов, может быть определена после экспериментальной оценки количественных характеристик запаздывания. В качестве критерия целесообразности следует принять уровень погрешности системы, не превышающий 5%.

3. Алгоритмы управления и защиты грузоподъемного крана от столкновений с препятствиями

Необходимо признать, что контуры рационального или оптимального решения задачи управления и защиты крана от столкновения с препятствиями в практическом плане достаточно расплывчаты, это в определенной степени отражается и на структуре алгоритмов работы системы.

На данном этапе работы представляется целесообразным дать качественную характеристику алгоритма, содержащего ряд блоков, которые с одной стороны могут иметь самостоятельное, универсальное значение (если крановые системы могут их реализовать), а с другой стороны могут не включаться в общий алгоритм управления (если крановые системы в настоящее время эти алгоритмы реализовать не могут).

Универсальный алгоритм должен быть обобщенным без количественных характеристик в силу следующих факторов:

- аппаратура защиты должна быть универсальной и способной устанавливаться на различные краны;
- количественные характеристики кранов (упруго-динамические характеристики оборудования, временные и механические характеристики приводов), реакции опор на податливость грунтов, влияние иных внешних факторов (ветер) должны быть определены для каждого типа крана конкретно на последующих этапах работы.

Отметим также варианты общего алгоритма. Основным будет рассмотрен алгоритм, в соответствии с которым система управления и защиты не оказывает обратного влияния на технологию производства работ. Другими словами, машинист может инициировать любые движения крана, а система управления и защиты обеспечивает их выполнение, контролируя при этом скорости движения, возможную раскачку груза, гашение этих колебаний и регулирование скорости.

Другим вариантом, менее развитым, является алгоритм, при котором система оказывает влияние на технологию работ. В частности, если из-за отсутствия возможности регулирования процессами разгона и торможения не может быть обеспечена необходимая точность позиционирования груза, или время затухания колебаний груза окажется достаточно большим, следует рассмотреть алгоритм с последовательным управлением движениями, когда на первом этапе автоматически совершаются движения, направленные на уменьшение амплитуды раскачивания груза [подъем на определенную высоту и уменьшение вылета (радиуса поворота)], затем поворот, а затем наводку груза посредством движения, создающего грузу минимальную линейную скорость.

Во всех случаях алгоритм должен содержать блок предварительной остановки (или снижения скорости) и окончательной остановки.

Заметим, что в зависимости от точностных характеристик системы (естественно после экспериментальной проверки) возможно некоторое совершенствование блока алгоритма предварительного отключения на основе следующих рассуждений.

Если окончательная блокировка движений производится в соответствии с допусками на положение препятствия или конечной точки доставки груза, определяемые нормативными документами (например, «Правилами» Ростехнадзора) с достаточно высокой точностью, то допуск на предварительное отключение может быть сделан в виде переменной величины, зависящей от положения оборудования крана, груза, а также массы последнего,

влияющих на точность предварительного сигнала. Если окажется, что этот допуск может изменяться в достаточно больших пределах, то использование такого алгоритма может существенно уменьшить время на доводочную операцию.

Алгоритм управления и защиты, не оказывающий обратного воздействия на технологию работ

Структурная схема этого алгоритма приведена на рис.8. В данном случае рассматривается работа крана с условным препятствием типа «стена», когда остановка движения механизмов должна производиться не целенаправленными действиями крановщика, а автоматически по ситуации на стройплощадке. В соответствии с этим алгоритмом работа крановщика и крана с системой защиты происходит следующим образом.

Первоначально крановщик устанавливает границы препятствия, для чего устанавливает стрелу в направлении реперной точки (кратчайшее расстояние до препятствия) и наводит на реперную точку крюк с целью образования «программного задатчика». После этого он инициирует производство измерения и записи в ОЗУ системы координат препятствия (L_c, α и φ), а также вычисление и запись в ОЗУ значений G_p, G_α, G_L и G_φ.

где G_p — допустимое расстояние от оси крана до препятствия;

G_α, G_L и G_φ — допустимые расстояния по условиям сигнала предварительного отключения при различных движениях: соответственно стрелой по углу α, телескопом по длине L_c и поворотом по углу φ. С целью обеспечения по различным движениям одинаковой точности защиты эти значения приняты различными.

После получения крановщиком информации об окончании записи контролируемых параметров он может приступить к работе.

Перед транспортировкой крановщик инициирует подпрограмму автоматического подъема груза с земли. Цель этой подпрограммы — обеспечить отрыв груза от земли без раскачивания, что может иметь место в результате прогиба стрелы или наклона платформы. (Заметим, что эта подпрограмма не оказывает влияния на работу крана при подъеме «пустого» крюка).

До завершения подъема и появления информации об его окончании все остальные движения блокируются.

После поднятия груза с земли и снятия блокировок крановщик инициирует движение крановых механизмов в соответствии с требуемой траекторией перемещения груза, в результате чего запускается подпрограмма разгона по каждому движению. Эта подпрограмма создается с целью минимизации амплитуды раскачивания груза после выхода крана (точки подвеса груза) в режим установившегося движения.

Подпрограмма разгона должна быть дополнена подпрограммой синхронизации повторного включения, необходимость которой вызывается следующим. В процессе разгона крановщик по тем или причинам может прекратить какое-нибудь движение, что, естественно, система должна обеспечить. Однако, система не должна допускать повторного включения в произвольный момент, так как при этом возможно не гашение раскачивания, а наоборот — усиление раскачивания.

С началом движения система производит измерение параметров L_c, α, φ и вычисление фактического значения величины G_φ = R cos φ ≤ G_p

Далее, алгоритм системы содержит блоки дифференциальной оценки фактического G_φ по отношению к до-

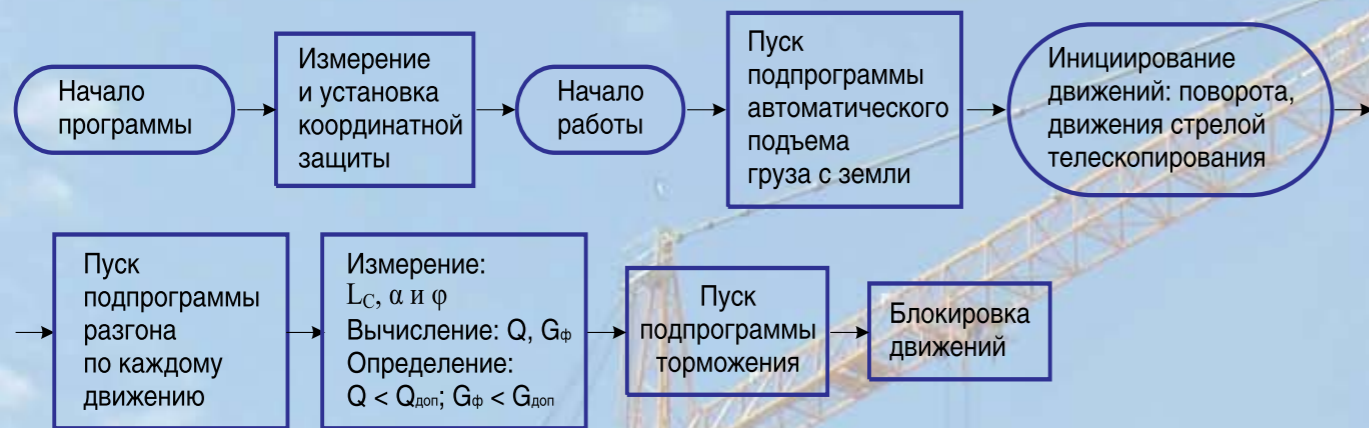


Рис. 8

пустимым значениям G_i^* . Справедливым можно считать предположение, что динамическая ошибка в результате раскачивания от поворота крана должна быть больше, чем в результате опускания стрелой, а последняя в свою очередь больше, чем в результате телескопирования. Поэтому в системе можно положить $G_\phi^* > G_\alpha^* > G_L^*$ и контроль приближения к препятствию производить в последовательности:

- 1) при повороте платформы $G_\phi < G_\phi^*$
- 2) при движении стрелой $G_\alpha < G_\alpha^*$
- 3) при телескопировании $G_L < G_L^*$

Если указанные неравенства выполняются, то система не «вмешивается» в управление крановщиком и движения происходят на заданной им скорости. Если выполняется

хотя бы одно из приведенных неравенств, включается подпрограмма торможения. В принципе эта подпрограмма аналогична подпрограмме разгона, но не содержит подпрограммы запрета повторного включения, что невозможно в связи с созданием блокировки (отключением или значительным снижением скорости).

После выполнения подпрограммы торможения рассматривается неравенство $G_\phi \geq G_{\Pi}$, и при его выполнении происходит полная блокировка движений, а в случае невыполнения — допускается продолжение перемещения груза на малой скорости.

Рассмотрим отдельные блоки общего алгоритма.

Продолжение в следующем номере



Научно-производственное предприятие по электро- и гидрооборудованию строительно-дорожных машин и кранов

ООО НПП «ЭГО»

Системы защиты, приборы и устройства безопасности подъемных сооружений

Проектирование, монтаж, ремонт, пусконаладочные работы, обучение специалистов

- [Стреловые краны]
- [Краны мостового типа]
- [Башенные краны]
- [Краны-трубоукладчики]
- [Краны-манипуляторы]
- [Подъемники (вышки)]

125430, г. Москва, Пятницкое шоссе, д. 23, корп. 2

Тел/факс +7 (495) 759 66 13, +7 (495) 265 01 38, <http://www.nppego.com>, E-mail: nppego@nppego.com

УГЛИЧМАШ
торговый дом

Краны манипуляторы Hiab
монтаж на шасси и бортовые автомобили

Автомобильные краны
и запасные части «Угличмаш»

Тел. (495) 748-01-46, 234-07-30

www.uglichmash.ru