

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

Алгоритм измерения и записи координат препятствия

Алгоритм задания положения препятствия типа «стена» и контроля фактического положения оголовка стрелы осуществляется следующим образом.

После установки крана на строительной площадке стрела устанавливается в положение так, чтобы ее проекция на площадку совпадала с перпендикуляром к границе препятствия $00'$, рис.9. Этому положению соответствует сигнал датчика угла поворота платформы ψ . Одновременно производится вычисление расстояния $00' = G$, которое есть не что иное, как вылет $G = R = L_c \sin \alpha$, где α — угол наклона стрелы к вертикали. Значения G и ψ записываются в оперативное запоминающее устройство системы и все дальнейшие измерения производятся относительно этого сигнала (особенность данного способа задания заключается в том, что не требуется определять положение крана относительно препятствия (оси крана относительно плоскости AA)).

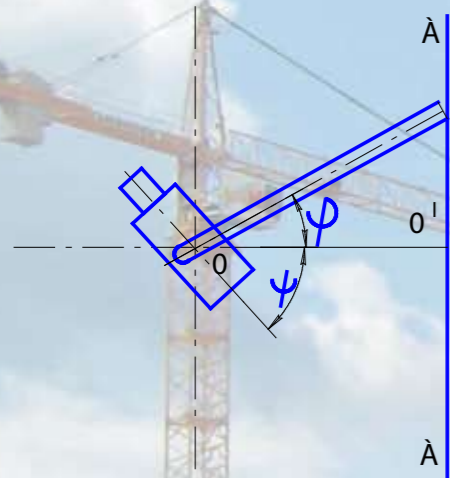


Рис.9

В течение рабочего цикла производится вычисление проекции текущего вылета на перпендикуляр $00'$: $G_\phi = L_c \sin \alpha \cos(\phi - \psi)$, где ϕ — текущий угол поворота платформы крана, и при $G_\phi \geq G$ происходит блокировка движения.

Алгоритм управления подъемом груза с земли, минимизирующий раскачивание груза из-за прогиба стрелы и наклона крана

Измеряемые параметры и вычисляемые показатели и поправки, необходимые для контроля положения груза, могут быть использованы для управления подъемом груза с земли с минимизацией раскачивания груза. Алгоритм предполагает действия, аналогичные тем, которые имеют место при ручном управлении, когда крановщик работает следующим образом.

Крюк подводится к грузу, цепляются расчалочные канаты и положение оголовка стрелы выравнивается относительно слегка натянутых канатов (к сожалению, точность выравнивания в вертикальной плоскости стрелы крановщиком контролируется с трудом, а при больших габаритах груза возможны погрешности 15...20 см). После этого начинается нагружение крана без отрыва груза от земли, что вызывает смещение проекции точки подвеса относительно центра тяжести груза из-за прогиба стрелы и наклона крана (увеличение вылета).

Если увеличение вылета с точки зрения крановщика значительно, он прекращает нагружение, ослабляет канаты и подъемом стрелы производит предварительное уменьшение вылета «на глаз», после чего процедура повторяется до тех пор, пока с точки зрения крановщика проекция оголовка стрелы на момент отрыва груза от земли не совпадает с положением центра тяжести груза.

Эта процедура может быть положена в основу алгоритма автоматического управления подъемом. В основу вводимой поправки на предварительное уменьшение вылета ΔR может быть положена формула $\Delta R = U \sin \alpha$, где U — прогиб стрелы, а α — угол ее наклона к горизонту. Для точного расчета вылета, учитывающего, кроме прогиба стрелы, распределенную нагрузку по стреле, зазоры между опорными элементами, деформации балок выносных опор, опорно-поворотного круга и т.д., следует воспользоваться формулами (2). Однако для последовательной перестановки стрелы с целью уменьшения вылета при подъеме груза достаточно воспользоваться упрощенной формулой для определения $\Delta R = Q g L_c \cos \alpha \sin \alpha$, где масса груза Q , длина стрелы L_c и угол наклона ее к горизонту являются постоянно измеряемыми величинами.

Для выбора уровней показателей, которые будут определять моменты переключения режима подъема на режим корректировки вылета, укажем на следующие возможные алгоритмы:

а) в процессе нагружения крана вычисляется для текущей нагрузки Q (или давления в цилиндре P) поправка R и при $\Delta R = \Delta R_{\text{доп}}$ происходит первое переключение.

В этом случае число переключений при заданной ошибке $\Delta R_{\text{доп}}$ минимально. Ограничение на возможность применения данного алгоритма состоит в том, чтобы время на вычисление ΔR не превышало времени подъема, в течение которого возможно $\Delta R > \Delta R_{\text{доп}}$;

б) проделать те же вычисления, что в п. а), но задать минимальное число переключений. Время вычислений и ошибка ΔR могут быть значительными;

в) величина $\Delta R_{\text{доп}} = \text{var}$, так как при коротких стрелах и тяжелых грузах нежелательно иметь раскачивание на ту же величину $\Delta R_{\text{доп}}$, что и при длинных стрелах и легких грузах. В этом случае табулируется в ПЗУ устройства величина $\Delta R_{\text{доп}} = f(Q, L_c, \sin \alpha)$, которая и разбивается на допустимые уровни и первое переключение производится при

$\Delta R = \Delta R_{\text{доп}}$. Время для определения ΔR в этом случае также меньше, чем в пп. а) и б). Последующие переключения происходят при $\Delta R = 1/n \Delta R_{\text{доп}}$, где $n = 2, 3$ и т.д.

Алгоритм транспортировки груза с гашением раскачивания при разгоне

Попытка теоретически обосновать возможность оптимального управления механизмами грузоподъемных кранов (в соответствии с применяемой на кранах аппаратурой управления здесь рассматривается дискретное релейное управление) в переходных режимах появились сразу [7] вслед за разработкой математической теории оптимальных процессов, носящей в СССР имя академика Л.С.Понтрягина (принцип максимума). В [8] даже сделана более углубленная попытка решить вопрос транспортировки груза приводом поворота крана (создающего наибольшие линейные скорости для оголовка стрелы и груза) с минимизацией раскачивания груза. Но практического воплощения эта работа не получила. Это можно объяснить двумя главными причинами:

— необходимость реализации не явилась безусловной (техническое решение оказалось неустойчивым), из-за наличия крановщика с его возможностью совершать повторные движения, малого влияния длительности цикла на общую производительность крана;

— необходимость обработки довольно большого объема информации, для чего в рассматриваемый период не было удобных технических средств.

Внедрение в процесс управления кранами микропроцессорной техники устраняет вторую причину, а необходимость защиты крана от столкновения с препятствиями (или более широко — необходимость точного позиционирования груза) предопределяет возврат к рассмотрению этого вопроса.

Повторим кратко возможность применения приемов синтеза оптимальных систем для целей перемещения грузов с гашением колебаний.

Критерий оптимальности при проектировании системы управления зависит от назначения системы. В этой связи качественное улучшение переходного процесса при транспортировке груза однозначно связано с сокращением продолжительности переходных процессов при управлении.

При этом следует иметь в виду, что:

1) в оптимальных по быстродействию системах удается реализовать кратчайшие по времени перемещения только при некоторых типовых воздействиях, которые задаются заранее;

2) максимальное быстродействие реальной системы определяется характером ограничений, наложенных на координаты системы, что связано с ограниченной мощностью источников энергии для исполнительных устройств, прочностью конструкции регулятора и объекта регулирования;

3) синтез детерминированных оптимальных релейных систем рассматривается по отношению к тем из них, которые описываются обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Рассматривая кран как объект, его привод и систему управления, можно констатировать о возможности применения методов синтеза релейных систем оптимальных по быстродействию, основа которых определяется следующим.

Если состояние объекта управления в каждый момент времени характеризуется вектором (точкой) $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ в фазовом пространстве X , положение регулирующих органов характеризуется вектором (точкой) I (I_1, I_2, \dots, I_n) в пространстве I , то задача об оптимальном управлении

динамической системой состоит в определении такого допустимого управления I , которое переводит изображающую точку X из заданного начального положения X_0 в конечное положение X_1 , причем для этого управления функционал $J = \int_{t_0}^{t_1} dt = t_1 - t_0 = T_0$ должен принимать экстремальное (минимальное) значение.

Для сформулированной задачи дифференциальные уравнения движения объекта записываются в общем виде, как:

$$\frac{d\delta_j}{dt} = \sum_{k=1}^n a_{jk} \delta_k + \sum_{l=1}^r \dot{a}_{jl} \dot{e}_l; \quad j > 1, 2 \dots n$$

или рассматривая задачу гашения колебаний груза отдельно по каждому движению и только в горизонтальной плоскости при помощи одного регулируемого органа, получим

$$\frac{d\delta}{dt} = a\delta + b\dot{e}.$$

Задача об оптимальном по быстродействию управлении решается на основании принципа максимума при фиксированных начальном и конечном положениях изображающей точки в фазовом пространстве X , при этом найденное оптимальное управление является функцией времени. В том случае, когда конечное положение объекта фиксировано, а начальное может быть произвольным (в момент столкновения с предполагаемым препятствием), оптимальное управление становится не только функцией времени, но и зависит от начального положения изображающей точки X_0 ,

$$\text{то есть для } t = t_0: \dot{E}(t_0, \delta_0) = \dot{E}(\delta_0)$$

$$\text{для произвольного } t: \dot{E}(t_0, \delta_0) = \dot{E}(\delta(t))$$

Таким образом, оптимальное управление с учетом ограничения на перемещение регулирующего органа $|\dot{E}| \leq 1$ должно осуществлять перевод изображений точки в соответствии с (34) из произвольного начального положения в конечное положение, за которое принимаем начало координат фазового пространства X за минимальное время переходного процесса.

Сформулированная задача соответствует возвращению управляемого объекта (груза) в исходное установившееся состояние (на вертикаль, проведенную через оголовок стрелы, который совершает равномерное движение, в том числе, когда скорость оголовка $V_{\text{огр}} = 0$), относительно которого координаты объекта (груза) получили некоторые отклонения под действием приложенных к нему возмущающих сил.

Отметим попутно, что для линейных систем оптимальное управление всегда существует и является единственным, если только существует любое управление, переводящее изображающую точку в заданное конечное положение. Вместе с тем, практически мы будем иметь дело с квазиоптимальными системами, близкими к оптимальным, но в силу ряда не учитываемых внешних обстоятельств, отличающихся от идеальных оптимальных систем.

Процедура синтеза оптимальных релейных систем, вытекающих из принципа максимума, неизбежно [9] приводит к использованию метода фазового пространства, который рассмотрим применительно к перемещению груза под воздействием приводов крана.

Решение системы уравнений (2) для начальных условий: при $t = 0, S = S(0)$ и $\frac{dS}{dt} = \dot{S}(0)$ при постоянном по величине силовом воздействии $f_R(t) = P^*$ имеет вид

$$\dot{S}_1 = \frac{P^*}{m_1 + m_2} \left(t + \frac{m_2}{m_1 \cdot \kappa} \cdot \sin \kappa t \right) - \frac{m_2}{m_1 + m_2} \dot{S}(0)(1 - \cos \kappa t) - S(0) \frac{m_2}{m_1 + m_2} \sin \kappa t + \dot{S}_1(0)$$

$$S = \frac{\dot{S}(0)}{\kappa} \sin \kappa t + \left[S(0) - \frac{P^*}{m_1 \kappa^2} \right] \cdot \cos \kappa t + \frac{P^*}{m_1 \kappa^2}$$

$$\dot{S} = \dot{S}(0) \cos \kappa t - \kappa \left[S(0) - \frac{P^*}{m_1 \kappa^2} \right] \cdot \sin \kappa t, \quad (35)$$

где S_1 — перемещение оголовка стрелы;
 S — перемещение груза относительно оголовка;
 \dot{S}_1, S — соответствующие скорости;
 $S_1(0), S(0), \dot{S}_1(0), \dot{S}(0)$ — значения S_1, S, \dot{S}_1 и \dot{S} при начальных условиях;
 m_1 — приведенные к оголовку массы крана;
 m_2 — масса груза;
 $\kappa = \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right)}$ — частота колебаний груза;
 l — длина каната, на котором подвешен груз;
 g — ускорение силы тяжести;
 t — время.

Для поворота крана

$$\dot{S}_1 = \frac{M}{R \left(\frac{J}{R^2} + m_2 \right)} \left(t + \frac{m_2 R^2}{J \kappa} \sin \kappa t \right) - \frac{m_2}{R^2 + m_2} \dot{S}(0)(1 - \cos \kappa t) - S(0) \frac{m_2}{J} \sin \kappa t + \dot{S}_1(0)$$

$$S = \frac{\dot{S}(0)}{\kappa} \sin \kappa t + \left[S(0) - \frac{mR}{J \kappa^2} \right] \cos \kappa t + \frac{mR}{J \kappa^2}$$

$$\dot{S} = \dot{S}(0) \cos \kappa t - \kappa \left[S(0) - \frac{mR}{J \kappa^2} \right] \cdot \sin \kappa t$$

$$\text{где } \kappa = \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2 R^2}{J} \right)}$$

J — приведенный момент инерции вращающихся частей крана и привода;
 M — избыточный вращающий (тормозящий) момент.

Как следует из [7, 8, 9], для определения моментов переключения исследуемый процесс удобно рассматривать в фазовом пространстве S_1, S и \dot{S} . Из систем (35) и (36) вытекает, что на плоскости S, \dot{S} процесс изображается дугами окружностей

$$\left(S - \frac{P^*}{m_1 \kappa^2} \right)^2 + \frac{(\dot{S})^2}{\kappa^2} = \frac{[\dot{S}(0)]^2}{\kappa^2} + \left[S(0) - \frac{P^*}{m_1 \kappa^2} \right]^2 = R_{ок(р)}$$

или

$$\left(S - \frac{MR}{J \kappa^2} \right)^2 + \frac{(\dot{S})^2}{\kappa^2} = \frac{[\dot{S}(0)]^2}{\kappa^2} + \left[S(0) - \frac{MR}{J \kappa^2} \right]^2 = R_{ок(м)}$$

Центры этих окружностей лежат на оси S и удалены от начала координат на расстояния $\pm \left(\frac{P^*}{m_1 \kappa^2} \right); \pm \left(\frac{MR}{J \kappa^2} \right)$. Радиусы окружностей зависят от величины силовых воздействий, частоты колебаний и значений координат системы в момент переключения силовых воздействий двигателя и тормоза.

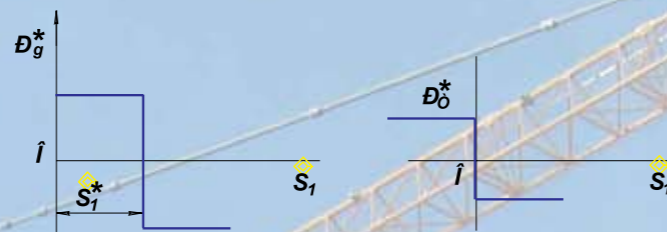


Рис. 10

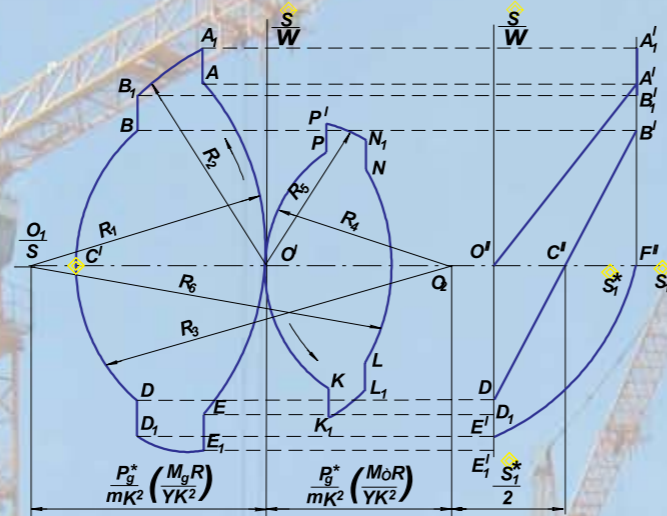


Рис. 11

Фазовый портрет движения оголовка и груза для двигательного $P_g^* (M_g)$ и тормозного $P_t^* (M_t)$ силового воздействия (рис.10) приведен на рис. 11

Для вертикально висящего груза характерна точка 0 в начале координат. Перемещение начинается с разгона привода (участок 0'A), окружность которого проводится радиусом R_1 . Далее, если привод до расчетного момента переключения вышел на установившийся режим, движение происходит по дуге A_1B_1 (радиус R_2) окружности с центром в точке O' , так как нет ускоряющего воздействия. Заметим, что дуга A_1B_1 проводится на большем радиусе, чем дуга AB , так как частота колебания груза при ускоренном движении

$$\kappa = P \sqrt{1 + \frac{m_2}{m_1}}$$

$$\kappa = P \sqrt{1 + \frac{m_2 R^2}{J}}, \quad \text{где } P = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (37)$$

Далее подключается тормоз (дуга окружности с центром O_2 , которой принадлежит текущая точка B) и, если необходимое время торможения больше, чем время действия тормоза, то есть, если некоторое время оголовок неподвижен, то появляется участок DE (дуга окружности O').

Возврат изображающей точки в начало координат O' (условие движения с вертикально подвешенным и неколеблющимся грузом) возможен только по дуге EO' , для чего снова должен быть включен двигатель.

Участки (дуги) соответствующих окружностей есть временные интервалы состояний органов управления (воздействий), а моменты переключения могут быть определены графоаналитически (через график $\frac{S}{\kappa} = f(\dot{S}_1)$).

Для момента торможения построен фазовый портрет $O'KLMNPO'$, включающий в себя участки: торможения

оголовка $O'K$, неподвижного оголовка KL , разгон двигателя оголовка LMN , равномерного движения оголовка NP и снова торможения PO' .

Таков в общем виде принцип релейного управления движением крановых механизмов с неколеблющимся грузом в конце движения, на основе которого рассмотрим соответствующий алгоритм.

Сделаем при этом оговорку о том, что вряд ли в практической реализации этого алгоритма окажется целесообразным ограничиться одним переключением двигателя и тормоза для достижения успокоения груза. При сохранении максимально возможных управляющих воздействий для достижения проектных скоростей перемещения груза это может вызвать нежелательные динамические процессы в конструкции крана. Поэтому может оказаться необходимым снижать уровень воздействий, но при этом увеличить число циклов разгон-торможение (как это делает крановщик), что должно быть выявлено при экспериментах и что вызовет корректировку алгоритма.

Тем не менее на данном этапе работ будет рассмотрен алгоритм с одним циклом гашения колебания груза, для которого примем в качестве известных: параметры силовых воздействий и формулы для расчета временных интервалов для различных участков движений. При этом предполагается, что вычислительные операции применяемые в системе ЭВМ, обеспечивают вычисление частот колебаний «р» и «к», причем для последней необходим датчик длины каната.

Структурная схема алгоритма транспортировки груза с гашением колебаний при разгоне приведена на рис.12. Она включает в себя некое измерительно-вычислительное ядро, предназначенное для управления гашением колебаний груза как при разгоне, так и при торможении приводов. В качестве извлекаемой из ОЗУ системы появляется значение массы груза.

Длина каната, на котором подвешен груз, может быть вычислена по формуле:

$$l = \left(\frac{\alpha}{\alpha_n} \cdot l_{\text{общ}} - L_c \right) \frac{1}{n} \quad (38)$$

где α — угол поворота барабана лебедки (или угол поворота вала датчика угла поворота лебедки);

α_n — общее число оборотов лебедки (или диапазон углового перемещения датчика);

n — число ветвей каната, на которых висит крюковая обойма (груз).

(Примечание. Формула (38) должна быть уточнена с учетом изменения диаметра намотки каната на барабан. Это следует сделать, исходя из требуемой точности, исполнения датчика и способа задания точки отсчета длины «l» в соответствии с технологией работ)

По полученным данным и формулам (37) вычисляются частоты «р» и «к» и период $T = \frac{1}{2pr}$, значение которого необходимо вводить для синхронизации повторных воздействий

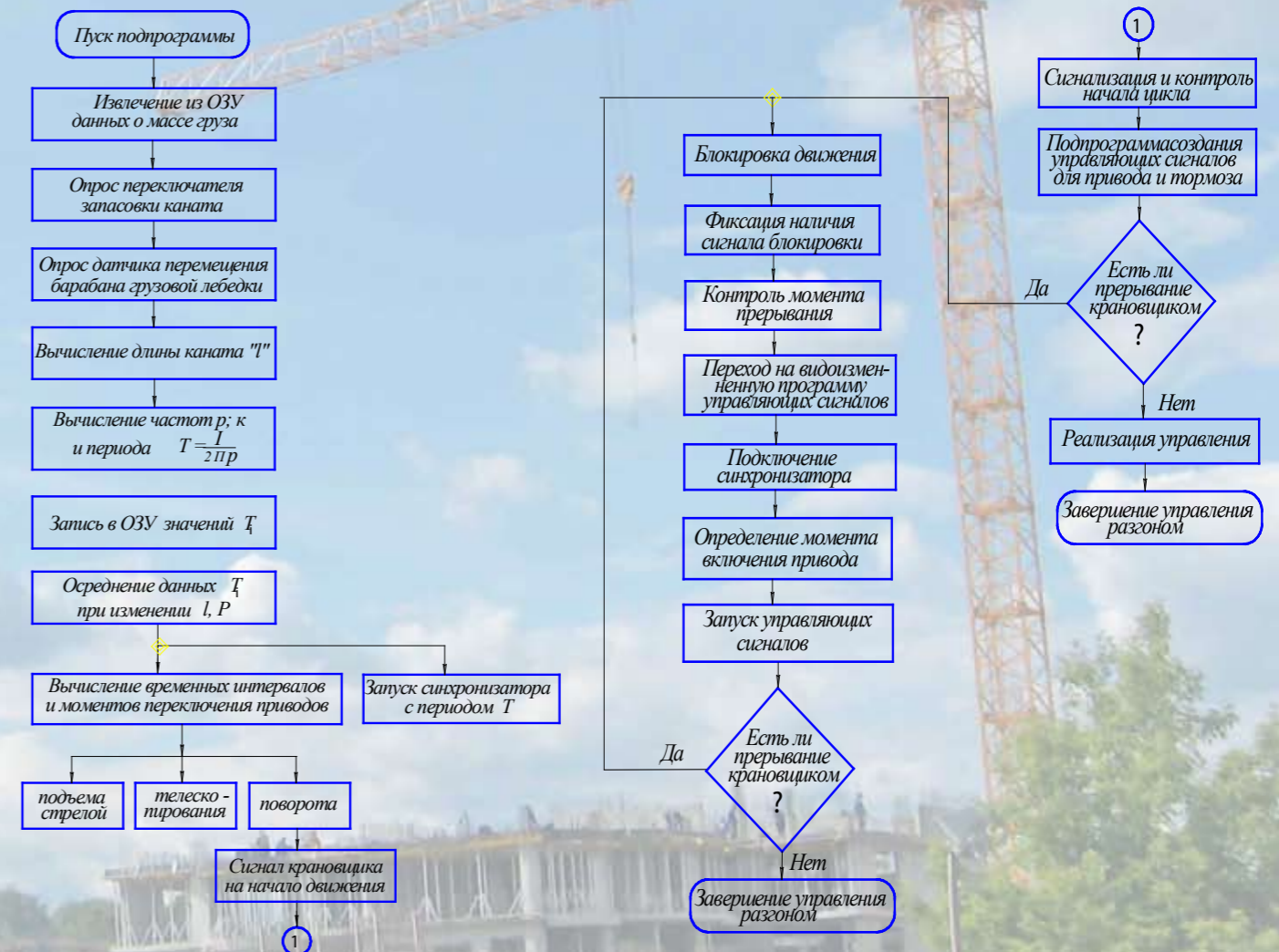


Рис. 12

на привод при уже раскачивающем грузе (система должна содержать программный синхронизатор).

Учитывая, что в процессе транспортировки груза возможен его подъем или опускание, что повлияет на длину «l» и период «T», алгоритм должен содержать программу соединения значения T с корректировкой этого значение в каждом цикле программы опроса данных.

Это производится по каждому движению (повороту, телескопированию, подъему стрелой), по которому признано целесообразным осуществлять такое управление. Описанная часть алгоритма должна быть обеспечена постоянно функционирующей программой подготовки данных.

Далее, по сигналу крановщика (переводу рукоятки на начало движения) производится синхронизация пуска привода (далее рассматривается одно движение) и контроль начала цикла разгона t_0 , после чего на привод и тормоз поступают управляющие сигналы от программного командоаппарата. Если в дальнейшем в процессе разгона вмешательства крановщика не будет, то данная программа осуществит разгон и при неизменном положении рукоятки продолжит транспортирование в установившемся режиме.

Если до завершения разгона по тем или иным причинам произошло вмешательство в процесс крановщика (он изменяет положение рукоятки, переводя ее через нулевое положение (или в нулевое положение), соответствующее наложению тормоза, программа должна заблокировать движение, зафиксировать этот случай с целью обеспечения работы в дальнейшем только по видеоизмененной программе и зафиксировать во времени момент вмешательства крановщика.

В дальнейшем после прекращения вмешательства (рукоятка переведена на движение) производится разгон по видеоизмененной программе «командоаппарата», который, во-первых, синхронизируется с раскачиванием груза, а во-вторых, включает привод в момент $nT = \tau_1$, обеспечивающий гашение колебаний.

Синхронизацию удобно производить при наличии датчика положения канатов относительно вертикали [10].

Аналогично производится корректировка программы, если в процессе разгона еще произошли прерывания.

Алгоритм торможения с гашением раскачивания груза

Структурная схема алгоритма представляет собой вариант алгоритма разгона со следующей особенностью.

С обязательным появлением предварительного сигнала на прекращение транспортирования (например, при приближении к препятствию) из запоминающего устройства системы извлекается усредненное значение периода T, по которому рассчитываются интервалы и моменты включения привода и тормоза и образуется программный командоаппарат торможения. Этой программе придается приоритетное по отношению к крановщику значение, в связи с чем программа не содержит блоков синхронизации и контроля цикла. Крановщик не может вмешиваться в эту программу, он может ее только разрушить (заблокировать) переводом рукоятки управления в положение реверса движения.

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

ЧЕЛЯБИНСКИЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД

Автокраны за 1 день!

454119, г. Челябинск, Копейское шоссе, 38.
Тел.: (351) 259-93-05, (351) 259-93-31
e-mail: sdep@cmz.ru
www.cmz.ru

ПРОИЗВОДСТВО И ПРОДАЖА

КРАНЫ ГУСЕНИЧНЫЕ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

ДЭК-251 (г/н 25 т), ДЭК-321 (г/н 32 т)
ДЭК-361 (г/н 36 т), ДЭК-401 (г/н 40 т)
ДЭК-631А (г/н 63 т)

КРАНЫ АВТОМОБИЛЬНЫЕ

КС-45721 «Челябинец» г/н 25 т на шасси УРАЛ, КАМАЗ, МАЗ
КС-55730 «Челябинец» г/н 32 т на шасси МАЗ-630303 (6x4)
КС-65711 «Челябинец» г/н 40 т на шасси УРАЛ-63685 (6x4)