

В. С. Щербаков, д-р техн. наук, проф., зав. каф., sherbakov_vs@sibadi.org,
М. С. Корытов, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры, kms142@mail.ru,
Е. О. Шершнева, аспирант, wolf_eo@sibadi.org,
 Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), г. Омск

Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана

Разработан активный способ гашения остаточных маятниковых колебаний груза после остановки мостового крана путем перемещений точки подвеса груза с помощью гидроцилиндров. Разработанный способ позволяет обеспечить сокращение времени остаточных маятниковых колебаний груза. В результате повышается производительность крана.

Ключевые слова: мостовой кран, ПИД регулирование, скорость, перемещение, груз, гашение колебаний, привод

Введение

Необходимым условием повышения производительности кранов мостового типа (МК) является уменьшение остаточных маятниковых колебаний груза после его перемещения в целевую конечную позицию. Время завершения колебаний груза при отсутствии их гашения может составлять до 20 % от времени цикла МК [1–6].

Формулировка проблемы

Для приводов релейного типа, которыми оснащено большинство используемых в настоящее время МК, целесообразно при сохранении минимального числа включений и выключений обеспечить полное гашение остаточных колебаний груза, поскольку дополнительные пуски электродвигателей привода приводят к появлению больших пусковых токов, уменьшают срок службы электродвигателей [7].

Для этого может быть применена остановка МК с помощью уже имеющегося привода или его торможение в строго определенные периоды времени, однозначно согласованные с фазой колебаний груза в момент торможения [2, 3].

Однако подобный подход обеспечивает устранение колебаний груза с одновременной остановкой точки подвеса только в определенные моменты времени и, соответственно, только в определенных дискретных точках пространства, отстоящих друг от друга на значительные расстояния. В противном случае, т. е. при остановке точки подвеса груза во всех других точках пространства, будут возникать остаточные колебания груза.

Описание метода решения задачи исследования

Для гашения колебаний предлагается использовать гидравлический привод. Усовершенствование конструкции МК выполнено с помощью двух гидроцилиндров, расположенных перпендикулярно в горизонтальной плоскости (рис. 1, точка O_4) [8–10].

Согласно данным Ф. К. Иванченко и др. [11] для исследуемого в настоящей работе МК общего назначения номинальной грузоподъемностью 12,5 т с электроприводами, имеющими релейное управление, будут иметь место значения ускорений при разгоне и торможении моста и грузовой тележки, представленные в таблице.

Максимальные скорости установившегося движения моста и грузовой тележки исследуемого МК составляют: для моста $v_{\text{мост max}} = 1,5$ м/с; для грузовой тележки $v_{\text{тел max}} = 0,7$ м/с [11].

Была сформулирована задача гашения остаточных колебаний груза на гибком канатном подвесе

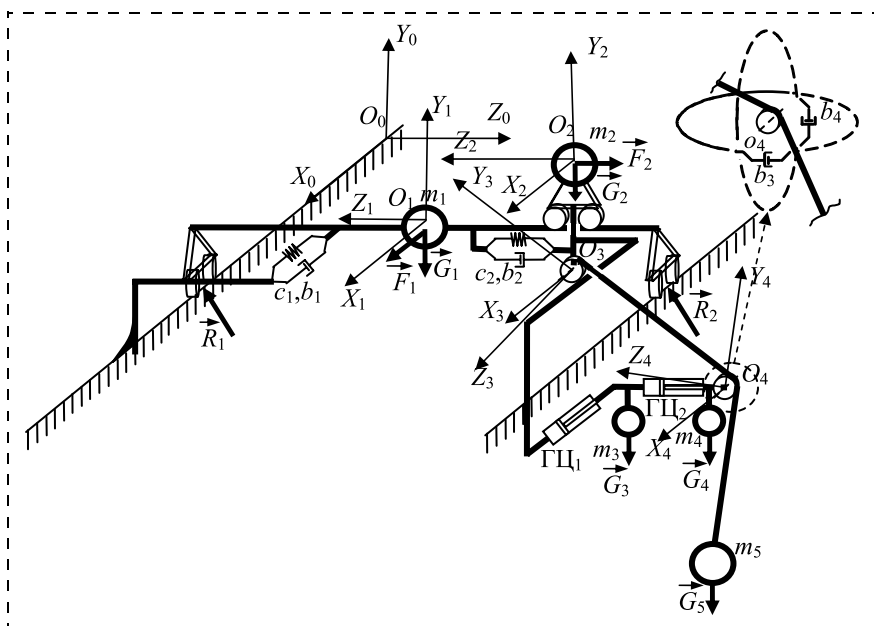


Рис. 1. Расчетная схема мостового крана с двумя гидроцилиндрами перемещения точки подвеса груза

Расчетные значения ускорений разгона и торможения моста и грузовой тележки исследуемого мостового крана

Параметры	Значения			
	0	3125	6250	12 500
$m_{гр}$, кг	0	3125	6250	12 500
$a_{мост\ разг}$, м/с ²	0,4	0,36	0,32	0,25
$a_{мост\ торм}$, м/с ²	0,75	0,66	0,595	0,5
$a_{тел\ разг}$, м/с ²	0,54	0,34	0,23	0,1
$a_{тел\ торм}$, м/с ²	0,67	0,45	0,35	0,25

в одной из вертикальных плоскостей трехмерного пространства после полной остановки моста (либо, как вариант, основной грузовой тележки) МК. Пространственные колебания груза при малых углах отклонений грузового каната от гравитационной вертикали могут быть представлены как суперпозиция колебаний в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях. Поэтому разработанный способ гашения может быть применен и для пространственных остаточных колебаний небольшой амплитуды.

Остаточные колебания в начальный момент времени являются одновременно колебаниями груза в конечный момент полной остановки моста (основной грузовой тележки) МК после окончания его движения к целевой точке.

Исходными численными данными для поставленной задачи выступают: масса перемещаемого груза $m_{гр}$, кг; длина грузового каната от точки подвеса каната (роликов, приводимых в движение гидроцилиндрами) до центра масс груза l , м; коэффициент демпфирования по угловой координате b_r , Н · м/(рад/с); начальное значение угла отклонения грузового каната от гравитационной вертикали q_0 , °; начальное значение скорости изменения угла отклонения грузового каната \dot{q}_0 , °/с.

При проведении вычислительных экспериментов по гашению остаточных колебаний груза были приняты следующие дополнительные допущения: 1) распределение фазы остаточных колебаний относительно момента полной остановки точки подвеса имеет равномерный случайный характер; 2) направляющие ролики устройства гашения дополнительной тележки (точка подвеса груза) в момент остановки моста (основной грузовой тележки) МК находятся в срединном положении по запасу хода штока гидроцилиндра устройства гашения (координата $x = 0$); 3) при достижении поршнем гидроцилиндра жестких упоров (ограничителей хода) в его крайних положениях происходит скачкообразное торможение поршня и точки подвеса до нулевой скорости; 4) масса груза сосредоточена в одной точке; 5) грузовой канат описан абсолютно жестким нерастяжимым стержнем; 6) длина подвеса при гашении колебаний постоянна; 7) активное га-

шение колебаний с помощью гидроцилиндров начинается в момент достижения максимального угла отклонения каната от вертикали q_{max} , ближайший к моменту полной остановки моста (основной грузовой тележки).

Последнее допущение обусловлено тем, что предварительные исследования показали: активное гашение остаточных колебаний, начатое с того момента, когда угол каната достигнет q_{max} , позволяет сократить время гашения колебаний при одновременном уменьшении остаточного смещения нижней точки подвеса (роликов) после гашения относительно среднего (первоначального) положения.

Допущения № 1 и № 7 вызывают увеличение времени цикла МК на незначительную величину, в среднем всего на 1...1,75 с.

Увеличение времени цикла на 1...1,75 с, учитывая среднюю продолжительность цикла МК в несколько сотен секунд (ориентировочно 200...500 с, зависит от конкретных условий эксплуатации) и одновременное сокращение времени цикла за счет гашения остаточных колебаний, которые занимают около 20 % цикла, принято допустимым и несущественным.

Масса груза принимала фиксированное значение $m_{гр} = 100$ кг (масса крюковой обоймы без полезного груза). Данный параметр имел наиболее неблагоприятное значение с позиции максимальных ускорений разгона и торможения, вызывающих остаточные колебания с максимальной амплитудой (см. таблицу).

Дополнительными исследованиями было установлено, что изменение массы перемещаемого груза при одних и тех же значениях длины подвеса l само по себе не оказывает влияния на период колебаний, амплитуду и декремент затухания колебаний, т. е. на геометрические показатели колебательного процесса, при условии, что коэффициент демпфирования по угловой координате b_r при этом также изменяется пропорционально массе груза:

$$b_r = k_b m_{гр},$$

где k_b — коэффициент пропорциональности.

Влияние на геометрические показатели колебательного процесса имеет лишь значение коэффициента пропорциональности k_b .

Данный коэффициент оказывает существенное влияние на время гашения остаточных колебаний $t_{кон. кол}$ (рис. 2).

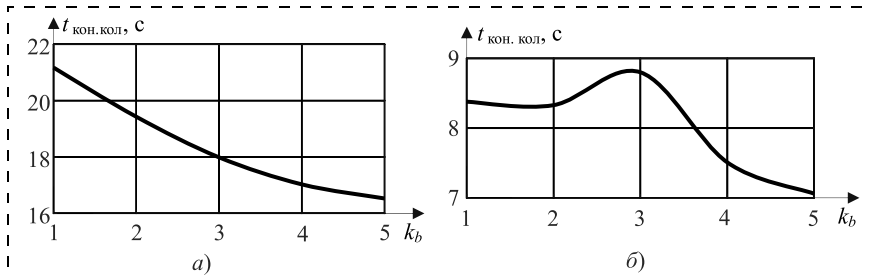


Рис. 2. Зависимости времени гашения остаточных колебаний $t_{кон. кол}$ от значений коэффициента пропорциональности k_b (примеры)

На рис. 2, а приведена зависимость $t_{\text{кон. кол}}$ от k_b при длине грузового каната $l = 12$ м, амплитуде отклонения каната $q_{\text{max}} = 20^\circ$, максимальном ускорении штока гидроцилиндра $a_{\text{п max}} = 1,5$ м/с², максимальной скорости штока гидроцилиндра $v_{\text{п max}} = 1,5$ м/с, максимальном ходе штока гидроцилиндра $l_{\text{п max}} = 1,5$ м. На рис. 2, б приведена аналогичная зависимость при длине грузового каната $l = 4$ м, амплитуде отклонения каната $q_{\text{max}} = 4^\circ$, максимальном ускорении штока гидроцилиндра $a_{\text{п max}} = 0,5$ м/с², максимальной скорости штока гидроцилиндра $v_{\text{п max}} = 0,5$ м/с, максимальном ходе штока гидроцилиндра $l_{\text{п max}} = 0,5$ м. В среднем при увеличении k_b диссипация энергии в системе возрастает, поэтому время гашения колебаний уменьшается, хотя и не всегда монотонно (рис. 2, б).

По результатам натуральных наблюдений за работой различных МК было установлено, что значение k_b находится в пределах $k_b \in [0,5; 5]$.

При проведении вычислительного эксперимента по гашению остаточных колебаний груза значение коэффициента k_b было заморожено и принимало фиксированное значение $k_b = 1$.

Описание способа гашения остаточных колебаний груза

Способ гашения остаточных колебаний груза [10] заключается в синтезе с помощью имитационной модели МК с ПИД регулятором функции ускорения перемещения точки подвеса вдоль оси X_0 .

Расчетная схема механизма гашения остаточных колебаний груза в одной плоскости приведена на рис. 3. Данная расчетная схема является фрагментом пространственной расчетной схемы МК с двумя тележками (см. рис. 1). Упрощение заключается в том, что мост и основная тележка полностью неподвижны и считаются присоединенными к звену стойки. Рассматривается перемещение только одного гидроцилиндра с одной дополнительной тележкой.

Масса штока гидроцилиндра с приведенной к штоку массой дополнительной тележки обозначена $m_{\text{п}}$. На движение точки подвеса (штока гидроцилиндра с приведенной массой $m_{\text{п}}$) наложены ограничения в виде характеристик гидропривода: максимального развиваемого штоком ускорения $a_{\text{п max}}$, максимальной развиваемой скорости $v_{\text{п max}}$

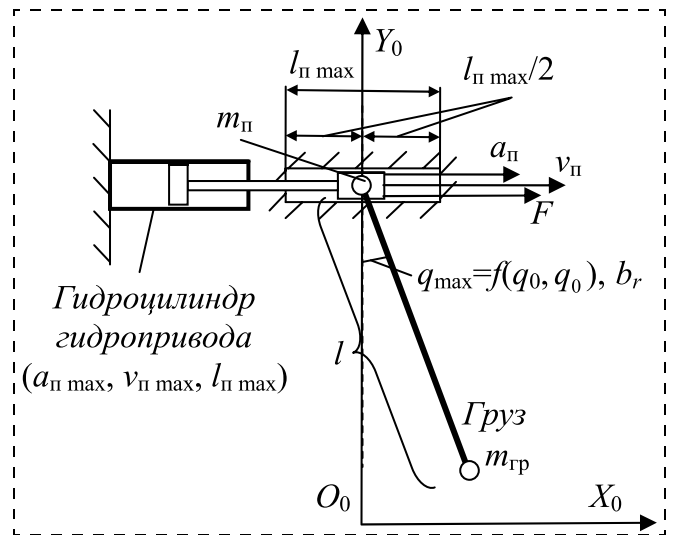


Рис. 3. Расчетная схема механизма гашения остаточных колебаний груза в одной плоскости

и максимального хода штока $l_{\text{п max}}$. На гидроцилиндр воздействует осевая сила сопротивления F .

Согласно предложенной схеме связей (рис. 4), с использованием блоков пакета математического моделирования механических систем SimMechanics Second Generation MATLAB была разработана модель механической системы мостового крана с ПИД регулятором, позволяющая изучать различные режимы гашения остаточных колебаний груза на стадии проектирования МК (рис. 5) [12–14].

В качестве основных варьируемых параметров при проведении вычислительного эксперимента могут выступать:

- 1) длина грузового каната (подвеса груза) от осей роликов, приводимых в движение штоком гидроцилиндра, до центра масс груза l , м;
- 2) максимальное отклонение (амплитуда остаточных колебаний) грузового каната МК от вертикали после полной остановки моста (основной грузовой тележки) q_{max} , °;
- 3) максимальное развиваемое ускорение штока гидроцилиндра вспомогательной тележки $a_{\text{п max}}$, м/с²;
- 4) максимальная развиваемая скорость штока гидроцилиндра вспомогательной тележки $v_{\text{п max}}$, м/с;
- 5) максимальный ход штока гидроцилиндра вспомогательной тележки $l_{\text{п max}}$, м.

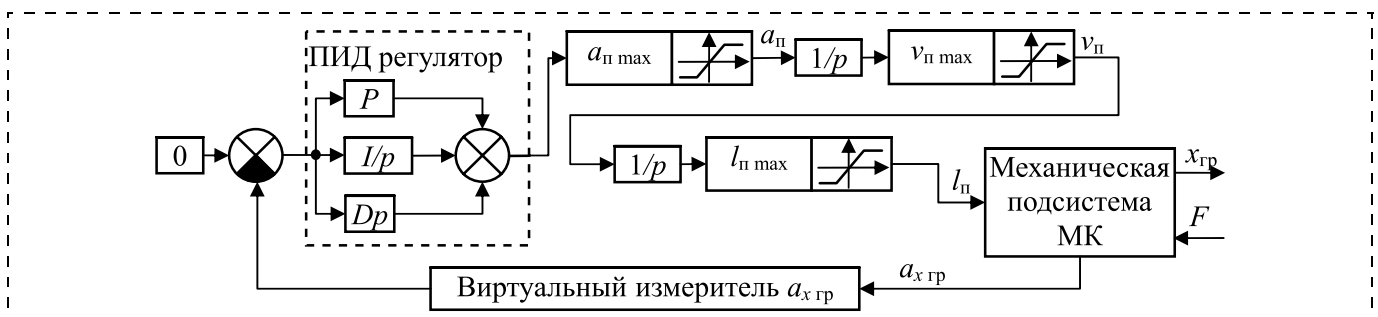


Рис. 4. Схема связей модели механической подсистемы мостового крана с ПИД регулятором для гашения остаточных колебаний груза с помощью гидропривода

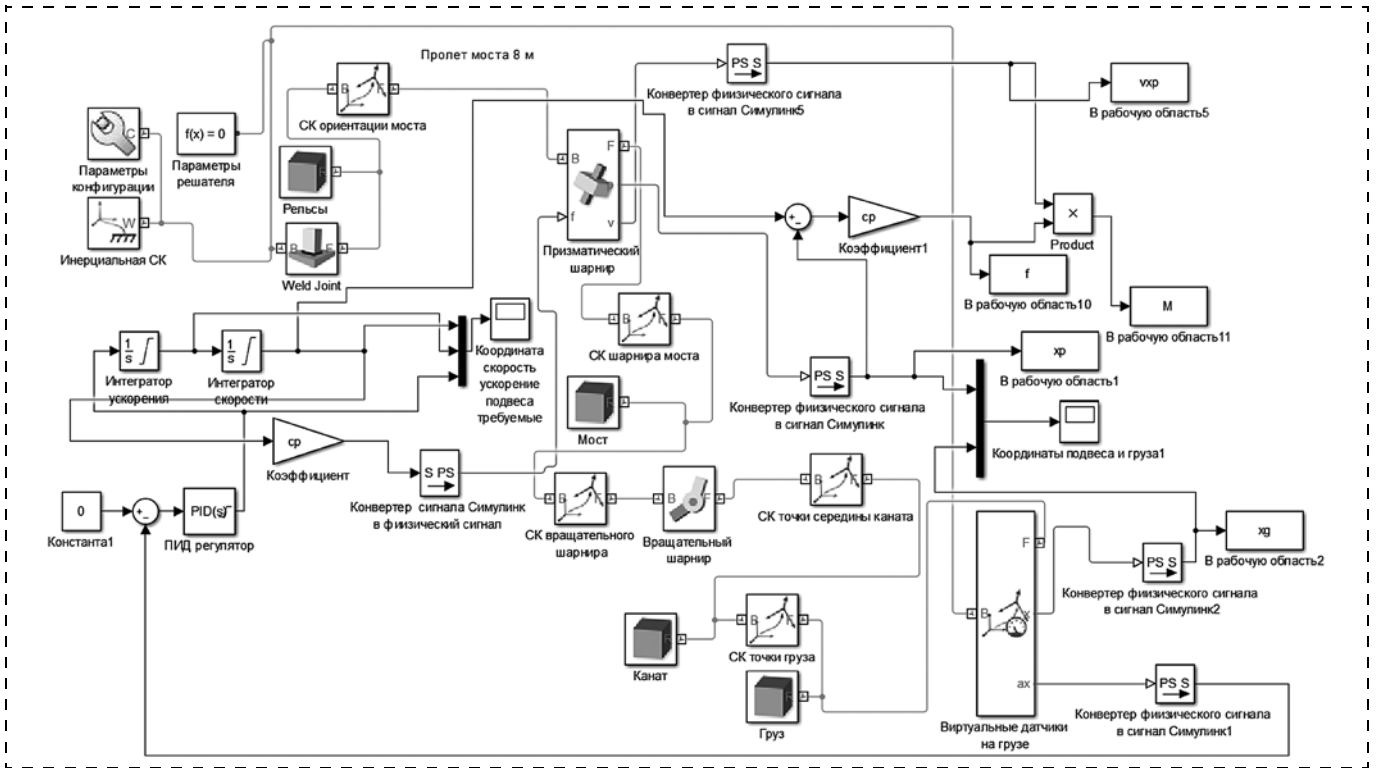


Рис. 5. Имитационная модель процесса гашения остаточных колебаний груза мостового крана с ПИД регулятором в обозначениях SimMechanics Second Generation и Simulink

Средняя продолжительность моделирования процесса гашения колебаний (получения одного отклика) на ПК средней производительности (AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 5600+ 2.90 GHz) составила около 10 с.

Для группы параметров МК и его системы управления в эксперименте по гашению остаточных колебаний груза были приняты фиксированные значения:

- 1) масса груза $m_{гр} = 100$ кг;
- 2) масса штока гидроцилиндра с приведенной к штоку массой дополнительной тележки $m_{п} = 100$ кг;
- 3) коэффициент пропорциональности для вычисления коэффициента демпфирования по угловой координате $k_b = 1$. Связанный с ним коэффициент демпфирования по угловой координате $b_r = k_b m_{гр} = 100$ Н·м/(рад/с);
- 4) параметры ПИД регулятора: пропорциональный коэффициент, интегральная и дифференциальная постоянные времени: $P = 20$; $I = 5$; $D = 5$ соответственно.

Гашение остаточных колебаний груза считалось полностью завершенным в момент времени $t_{кон. кол}$ при выполнении условия необратимого снижения скорости точки подвеса ниже порогового значения 0,01 м/с:

$$v_{п}(t) \leq 0,01 \text{ м/с } \forall t > t_{кон. кол}$$

Прикладная интерпретация и иллюстрация полученных результатов исследования

В результате выполнения отдельного запуска имитационной модели МК с ПИД регулятором с определенными значениями факторов — переменных l , q_{max} , $a_{п max}$, $v_{п max}$, $l_{п max}$ генерируются временные зависимости перемещения $l_{п}(t)$, скорости $v_{п}(t)$ и ускорения $a_{п}(t)$ точки подвеса, временные зависимости $x_{гр}(t)$ горизонтальной координаты и ускорения $a_{x гр}(t)$ перемещения груза вдоль оси O_0X_0 .

Примеры временных зависимостей $x_{гр}(t)$ и $l_{п}(t)$ для двух различных сочетаний $a_{п max}$, $v_{п max}$, $l_{п max}$ при одних и тех же значениях $l = 12$ м, $q_{max} = 16^\circ$ приведены на рис. 6.

Приведенные примеры показывают, что изменение сочетания значений $a_{п max}$, $v_{п max}$, $l_{п max}$ позволяет гасить одни и те же остаточные колебания с существенно различной эффективностью, выражаемой временем гашения $t_{кон. кол}$. Время гашения при этом может изменяться в несколько раз.

В то же время любой исследованный вариант гашения колебаний, даже самый худший вариант с наибольшим временем, все равно сокращает время колебаний по сравнению с полным отсутствием гашения как минимум в 2...3 раза.

Процесс гашения с использованием разработанного способа в настоящей работе оценивался критерием эффективности — временем гашения остаточных колебаний $t_{кон. кол}$. Целевая функция

$$t_{кон. кол} \rightarrow \min$$

при ограничениях вида

$$a_{\text{п}} \leq a_{\text{п max}}; v_{\text{п}} \leq v_{\text{п max}}; l_{\text{п}} \leq l_{\text{п max}}.$$

Кроме динамических параметров гидропривода разработанная математическая модель позволяет накладывать ограничения на другие параметры, характеризующие процесс гашения колебаний. Например, ограничения могут накладываться: на максимальное усилие на штоке гидроцилиндра; максимальную мощность гидропривода, полную работу гидропривода, остаточное смещение $l_{\text{п.ост}}$ штока гидроцилиндра и точки подвеса груза отно-

сительно среднего положения $x_{\text{гр}} = 0$. Последний параметр при указанном выше максимальном ограничении хода штока $l_{\text{п max}} = 1,5$ м в самом худшем случае не будет превышать значения $l_{\text{п.ост}} = l_{\text{п max}}/2 = 0,75$ м.

Исследования показали, что наибольшее влияние на время гашения $t_{\text{кон. кол}}$ оказывают: длина грузового каната l и начальная амплитуда колебаний q_{max} . Этим подтверждается известный физический смысл данных параметров и известный характер их влияния на продолжительность маятниковых колебаний груза.

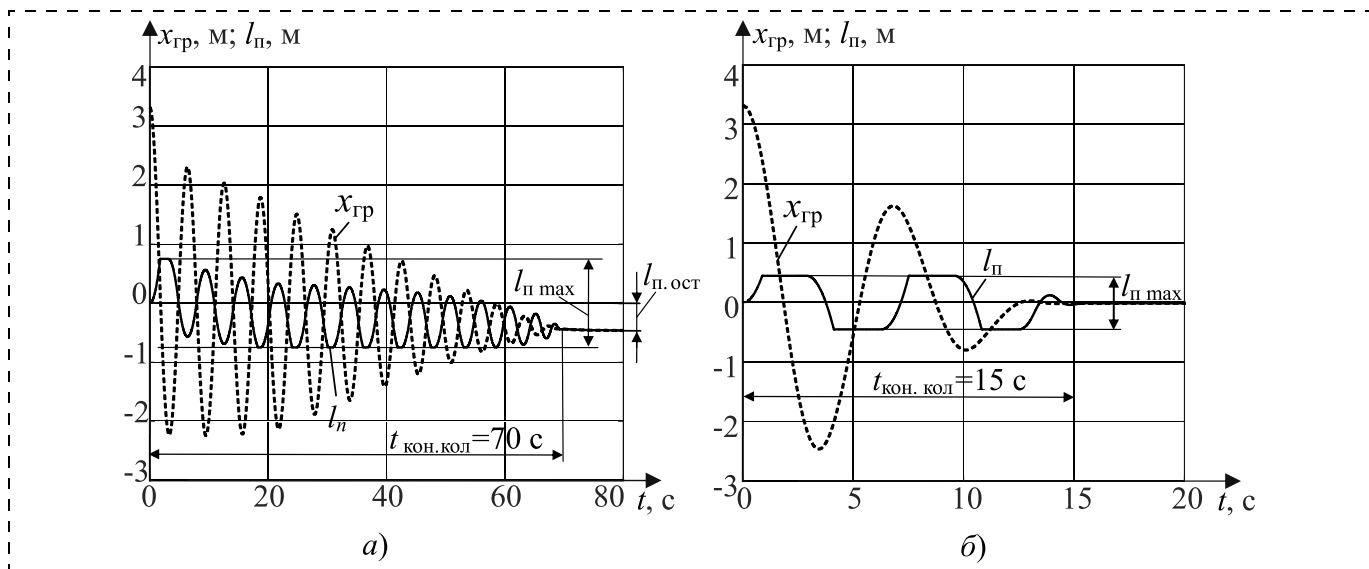


Рис. 6. Временные зависимости перемещений подвеса $l_{\text{п}}(t)$ и груза $x_{\text{гр}}(t)$ при гашении остаточных колебаний амплитудой $q_{\text{max}} = 16^\circ$ при длине грузового каната $l = 12$ м:

а — при $a_{\text{п max}} = 0,5$ м/с², $v_{\text{п max}} = 0,8$ м/с, $l_{\text{п max}} = 1,5$ м; б — при $a_{\text{п max}} = 1,2$ м/с², $v_{\text{п max}} = 1,4$ м/с, $l_{\text{п max}} = 0,9$ м

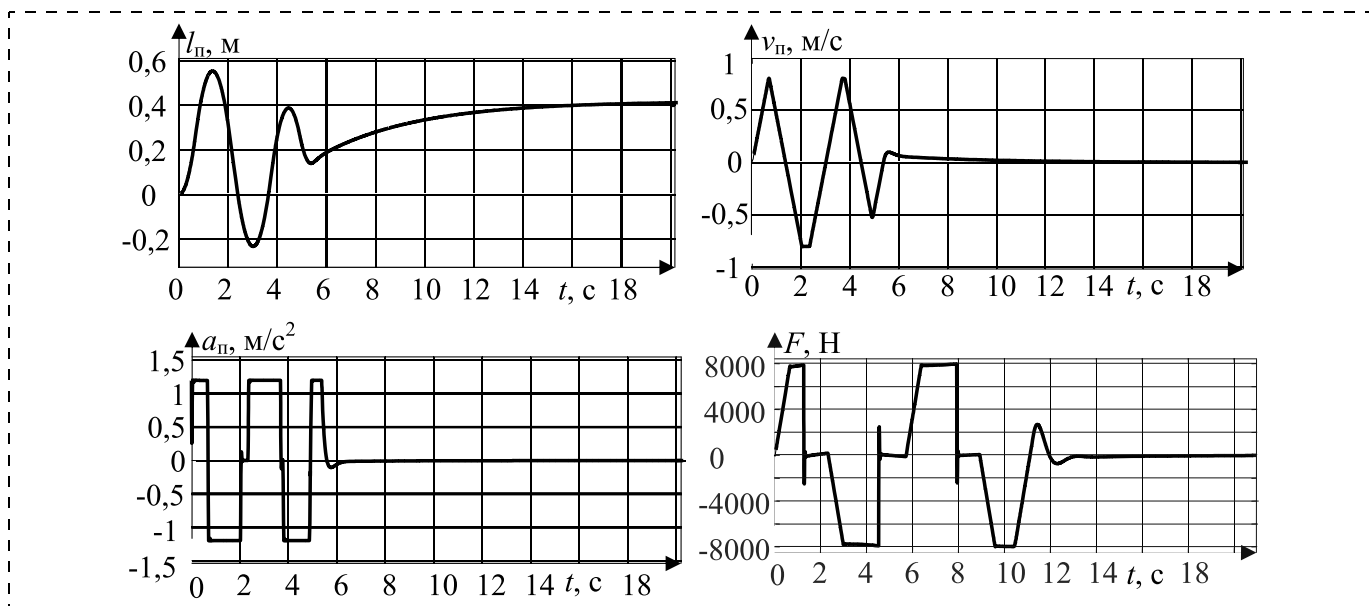


Рис. 7. Временные зависимости перемещения, скорости, ускорения штока гидроцилиндра и силы сопротивления, действующей на шток гидроцилиндра в процессе гашения колебаний с начальными условиями $l = 12$ м, $q_{\text{max}} = 20^\circ$, при значениях динамических параметров гидропривода $a_{\text{п max}} = 1,2$ м/с², $v_{\text{п max}} = 0,8$ м/с, $l_{\text{п max}} = 1,5$ м (пример)

Длина грузового каната l регламентируется технологией работ и расположением места доставки груза. Целесообразно ее уменьшение. Максимальная амплитуда колебаний носит случайный характер.

Из факторов динамических ограничений гидропривода, которые в наибольшей степени поддаются коррекции, самое большое влияние на среднее время гашения колебаний оказывает максимальное ускорение штока: увеличение $a_{п\max}$ в 3 раза (с 0,5 до 1,5 м/с²) вызывает уменьшение времени гашения колебаний в среднем на 38 %.

Для каждого сочетания значений параметров l , q_{\max} , характеризующих какие-либо текущие остаточные колебания, с помощью имитационной модели МК с заложенными в нее значениями динамических параметров гидропривода $a_{п\max}$, $v_{п\max}$, $l_{п\max}$ могут быть синтезированы временные зависимости перемещения, скорости и ускорения штока гидроцилиндра, а также силы F , действующей на шток гидроцилиндра в процессе гашения колебаний (рис. 7).

Заключение

Разработанный способ позволяет эффективно гасить остаточные маятниковые колебания груза на гибком канатном подвесе посредством перемещений точки подвеса с помощью гидроцилиндров, обеспечивая сокращение времени остаточных колебаний до 10...25 с, т. е. почти в 10 раз. В результате среднее время цикла мостового крана может быть сокращено не менее чем на 10 %. Разработанный способ целесообразно использовать при модернизации существующих и создании новых мостовых кранов.

Список литературы

1. Щедринов А. В., Сериков С. А., Колмыков В. В. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 8. С. 13–17.
2. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenu V., Lawrence J. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics // Journal of Vibration and Control. 2010. N. 16. P. 477–501.

3. Толочко О. И. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана // Электромашиностроение и электрооборудование. 2010. № 75. С. 22–28.
4. Omar H. M. Control of gantry and tower cranes: Ph. D. Dissertation. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
5. Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N. Dynamics and control of cranes: a review // Journal of Vibration and Control. 2003. N. 9. P. 863–908.
6. Fang Y., Dixon W. E., Dawson D. M., Zergeroglu E. Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. 2003. Vol. 8, N. 3. P. 418–423.
7. Москаленко В. В. Электрический привод. М.: Академия, 2007. 368 с.
8. Патент 146374 Российская Федерация, МПК В66С13/04. Мостовой кран / Щербаков В. С., Кorytov М. С., Вольф Е. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2014120325/11; заявл. 20.05.14; опубл. 10.10.14. Бюл. № 28. 2 с.
9. Патент 146002 Российская Федерация, МПК В66С13/04. Мостовой кран / Щербаков В. С., Кorytov М. С., Вольф Е. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2014117419/11; заявл. 29.04.14; опубл. 27.09.14. Бюл. № 27. 2 с.
10. Патент 2564560 Российская Федерация, МПК В66С13/18. Способ повышения точности и скорости перемещения груза по требуемой траектории грузоподъемным краном мостового типа / Щербаков В. С., Кorytov М. С., Вольф Е. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2014118376/11; заявл. 06.05.14; опубл. 10.10.15, Бюл. № 28. 9 с.
11. Иванченко Ф. К. Расчеты грузоподъемных и транспортных машин. Киев: Вища школа, 1978. 576 с.
12. Shcherbakov V., Korytov M., Sukharev R., Volf E. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 701–702. P. 715–720. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.701-702.715.
13. Shcherbakov V., Korytov M., Volf E., Breus I. The Reduction of Errors of Bridge Crane Loads Movments by Means of Optimization of the Spatial Trajectory Size // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 811. P. 99–103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.811.99.
14. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Volf E. O. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes // International Journal of Mechanics and Control. 2015. Vol. 16, N. 02. P. 3–8.

Active Way of Clearing of Fluctuations of Freight after a Stop of the Bridge Crane

V. S. Scherbakov, sherbakov_vs@sibadi.org, M. S. Korytov, kms142@mail.ru✉,
E. O. Shershneva, wolf_eo@sibadi.org,
Siberian State Automobile and Road Academy (SIBADI), Omsk, 644092, Russian Federation

Corresponding author: Korytov Mikhail S., D. Sc., Associate Professor,
Professor of the department "Cars, Constructional Materials and Technologies",
Siberian State Automobile and Road Academy (SIBADI), Omsk, 644092, Russian Federation, e-mail: kms142@mail.ru

Received on February 02, 2016
Accepted on February 12, 2016

Necessary condition of increase of productivity of cranes of bridge type is reduction of residual pendular fluctuations of freight on a flexible rope suspension after its moving to a target final position. For clearing of residual fluctuations of freight it is offered to use the hydraulic drive. Improvement of a design is executed by means of two hydraulic cylinders located perpendicularly in the horizontal plane. The problem of clearing of residual fluctuations of freight on a flexible rope suspension in one of the vertical planes of three-dimensional space after a full stop of the bridge was formulated (or as version of the main cargo cart) the bridge crane. Spatial fluctuations of freight at small corners of deviations of a cargo rope from a gravitational vertical can be presented as superposition of fluctuations in two mutually perpendicular vertical planes. Therefore the developed active way of clearing can be applied also to spatial residual fluctuations of small amplitude. The active way of clearing of residual fluctuations of freight consists in synthesis by means of imitating model of the bridge crane with proportional-integral-differential the regulator of function of acceleration of movement of a point of a suspension along a horizontal axis. On the movement of a point of a suspension, i.e. hydraulic cylinder rod with the specified weight, restrictions in the form of characteristics of a hydraulic actuator are imposed: the maximum acceleration developed by a rod, the maximum gathered speed, and the maximum course of a rod. The hydraulic cylinder is influenced by the axial force of resistance. According to the offered scheme of communications, with use of blocks of a package of mathematical modeling of the mechanical SimMechanics Second Generation MATLAB systems, the model of mechanical system of the bridge crane with proportional-integral-differential regulation, allowing to study various modes of clearing of residual fluctuations of freight at a design stage of the bridge crane was developed. The developed way allows to provide reduction of time of residual pendular fluctuations of freight. As a result crane productivity increases.

Keywords: bridge crane, PID-regulation, speed, movement, freight, clearing of fluctuations, drive

For citation:

Scherbakov V. S., Korytov M. S., Shershneva E. O. Active Way of Clearing of Fluctuations of Freight after a Stop of the Bridge Crane, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 368–374.

DOI: 10.17587/mau.17.368-374

References

- Shhedrinov A. V., Serikov S. A., Kolmykov V. V.** *Avtomaticheskaja sistema uspokoenija kolebanij gruza dlja mostovogo krana* (Automatic soothing vibrations of the bridge crane to load), *Pribery i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2007, no. 8, pp. 13–17 (in Russian).
- Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenu V., Lawrence J.** Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics, *Journal of Vibration and Control*, 2010, no. 16, pp. 477–501.
- Tolochko O. I., Bazhutin D. V.** *Sravnitel'nyj analiz metodov gashenija kolebanij gruza, podveshennogo k mehanizmu postupatel'nogo dvizhenija mostovogo krana* (A comparative analysis of methods of damping cargo-being revisited under the mechanism of translational motion of overhead crane), *Jelektromashinostroenie i Jelektrooborudovanie*, 2010, no. 75, pp. 22–28 (in Russian).
- Omar H. M.** Control of gantry and tower cranes: Ph. D. Dissertation, Blacksburg, Virginia, Publishing house of Polytechnic Institute and State University, 2003.
- Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N.** Dynamics and control of cranes: a review, *Journal of Vibration and Control*, 2003, no. 9, pp. 863–908.
- Fang Y., Dixon W. E., Dawson D. M., Zergeroglu E.** Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 2003, vol. 8, no. 3, pp. 418–423.
- Moskalenko V. V.** *Jelektricheskij privod* (Electric drive), Moscow, Akademija, 2007, 368 p. (in Russian).
- Patent** 146374 Rossijskaja Federacija, MPK B66C13/04. Mostovoj kran / Shherbakov V. S., Korytov M. S., Vol'f E. O.; zajavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobirno-dorozhnaja akademija (SibADI)" (RU); № 2014120325/11; zajavl. 20.05.14; opubl. 10.10.14. Bjul. № 28. 2 p. (Patent 146374 Russian Federation, B66C13/04. B. C. bridge crane / Scherbakov, Korytov M. S., Wolf E. O.; applicant and patent holder Federal public budgetary educational institution of higher education "Siberian state automobile and road academy (SIBADI)" (RU); No. 2014120325/11; 20.05.14 is declared; 10.10.14 is published. Byullyuten No. 28. 2 p.)
- Patent** 146002 Rossijskaja Federacija, MPK B66C13/04. Mostovoj kran / Shherbakov V. S., Korytov M. S., Vol'f E. O.; zajavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija (SibADI)" (RU); № 2014117419/11; zajavl. 29.04.14; opubl. 27.09.14. Bjul. № 27. 2 p. (Patent 146002 Russian Federation, B66C13/04. B.C. bridge crane / Scherbakov, Korytov M. S., Wolf E. O.; applicant and patent holder Federal public budgetary educational institution of higher education "Siberian state automobile and road academy (SIBADI)" (RU); No. 2014117419/11; 29.04.14 is declared; 27.09.14 is published. Bulletin No. 27. 2 p.)
- Patent** 2564560 Rossijskaja Federacija, MPK B66C 13/18. Sposob povyshenija tochnosti i skorosti peremeshhenija gruza po trebuemoj traektorii gruzopod'emnym kranom mostovogo tipa / Shherbakov V. S., Korytov M. S., Vol'f E. O.; zajavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija (SibADI)" (RU); № 2014118376/11; zajavl. 06.05.14; opubl. 10.10.15. Bjul. № 28. 9 p. (Patent 2564560 Russian Federation, B66C 13/18. A way of increase of accuracy and speed of movement of freight on the required trajectory the load-lifting crane of bridge type / Scherbakov V. S., Korytov M. S., Wolf E. O.; applicant and patent holder Federal public budgetary educational institution of higher education "Siberian state automobile and road academy (SIBADI)" (RU); No. 2014118376/11; 06.05.14 is declared; it is published 10.10.15, the Bulletin No. 28. 9 p.)
- Ivanchenko F. K.** *Raschety gruzopod'emnyh i transportirujushih mashin* (Calculations of the load-lifting and transporting cars), Kiev, Vishha shkola, 1978, 576 p. (in Ukrainian).
- Shcherbakov V., Korytov M., Sukharev R., Volf E.** Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 701–702, pp. 715–720. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.701–702.715.
- Shcherbakov V., Korytov M., Volf E., Breus I.** The Reduction of Errors of Bridge Crane Loads Movments by Means of Optimization of the Spatial Trajectory Size, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 811, pp. 99–103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.811.99.
- Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Volf E. O.** Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes, *International Journal of Mechanics and Control*, 2015, vol. 16, no. 02, pp. 3–8.