

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI: 10.12737/22089

Корытов М.С., д-р техн. наук, доц.,
Щербаков В.С., д-р техн. наук, проф.,
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАШЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО СМЕЩЕНИЯ ТОЧКИ ПОДВЕСА

kms142@mail.ru

Активный способ гашения остаточных маятниковых колебаний груза после остановки мостового крана путем перемещений точки подвеса груза при помощи гидроцилиндров может быть усовершенствован путем уменьшения неуправляемого смещения точки подвеса и обеспечения требуемого смещения точки подвеса в процессе гашения. Чтобы устранить неуправляемые смещения точки подвеса и одновременно обеспечить требуемое смещение точки подвеса в процессе гашения остаточных колебаний груза, схема связей модели механической подсистемы мостового крана с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором для гашения остаточных колебаний груза была дополнена блоками последовательно соединенных источника непрерывно нарастающего сигнала и ограничителя. Приведены примеры временных зависимостей перемещений подвеса и груза при гашении остаточных колебаний при отсутствии коррекции и по усовершенствованной схеме. Коррекция остаточного смещения точки подвеса возможна в пределах половины хода штока гидроцилиндра устройства гашения. Усовершенствованный способ гашения обеспечивает смещение точки подвеса и груза в требуемое положение с максимальной абсолютной погрешностью не более 0,04 м, которая может считаться незначительной при перемещении грузов.

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

Введение. Повышение производительности кранов мостового типа (МК) возможно за счет уменьшения остаточных маятниковых колебаний груза после его доставки в целевую позицию. Продолжительность завершения колебаний груза при отсутствии гашения может составлять до 20 % времени цикла МК [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Для гашения колебаний груза после остановки грузовой тележки может быть использован гидравлический привод. Задачу позволяет решить усовершенствование конструкции МК с помощью двух гидроцилиндров, гильзы которых ориентированы взаимно перпендикулярно в горизонтальной плоскости (рис. 1, точка O_4) [7, 8].

Способ гашения остаточных колебаний груза [8] заключается в синтезе при помощи имитационной модели МК с ПИД-регулятором (рис. 2) функции ускорения перемещения точки подвеса вдоль оси X_0 (в одной плоскости из двух).

Описание усовершенствования. Способ гашения остаточных колебаний после остановки точки подвеса, схема которого представлена на рис. 2, может быть усовершенствован путем уменьшения неуправляемого смещения точки

подвеса и обеспечения требуемого смещения точки подвеса в процессе гашения.

Необходимость в этом может возникнуть, если остановка моста или основной грузовой тележки МК была произведена не точно. Повторный пуск основного электропривода моста в этом случае будет менее предпочтительным, чем доводка точки подвеса на небольшое расстояние при помощи дополнительной тележки с гидроприводом. Для коррекции на малые расстояния в пределах хода штока гидроцилиндра, пуск основного электропривода не рационален, т.к. в этом случае потребуются выключение привода через доли секунды после включения.

Чтобы устранить неуправляемые смещения точки подвеса и одновременно обеспечить требуемое смещение точки подвеса в процессе гашения остаточных колебаний груза, схема связей модели механической подсистемы МК с ПИД-регулятором для гашения остаточных колебаний груза (см. рис. 2) была дополнена двумя блоками (рис. 3).

Это последовательно соединенные источник непрерывно нарастающего сигнала и ограничитель. Сигнал от этих двух блоков суммируется с

сигналом на выходе последнего интегратора, т.е. к требуемому перемещению точки подвеса, синтезируемому вторым интегратором, добавляется

корректирующая поправка перемещений точки подвеса $\Delta l_{корр}$, величина которой является параметром дополнительного блока ограничителя.

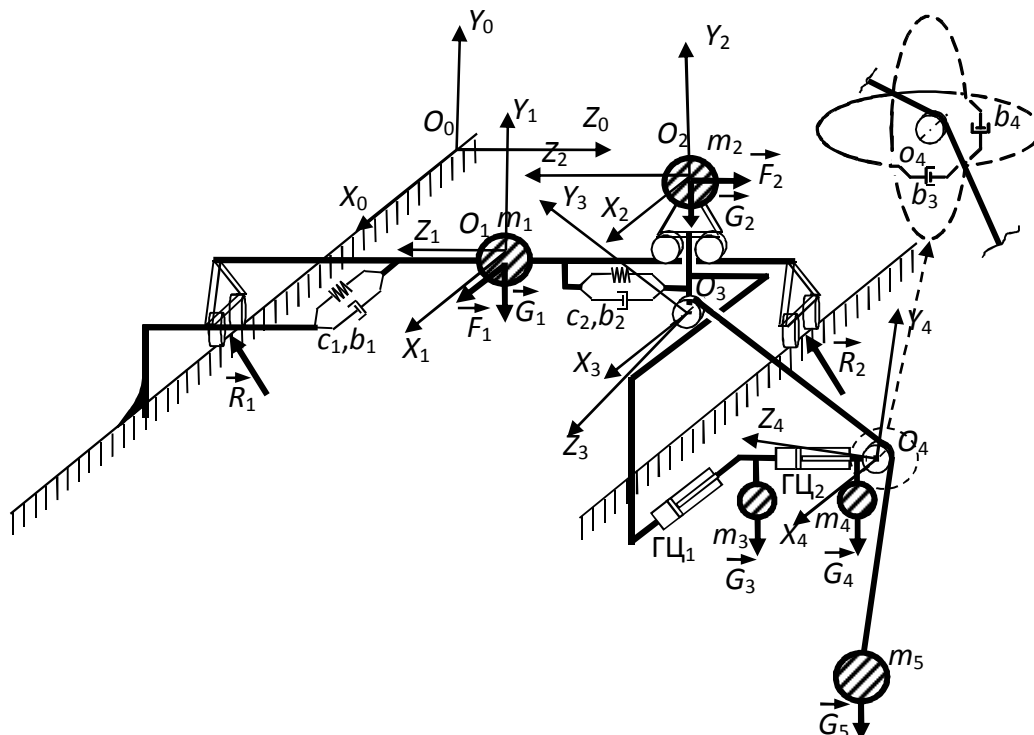


Рис. 1. Расчетная схема мостового крана с двумя гидроцилиндрами перемещения точки подвеса груза

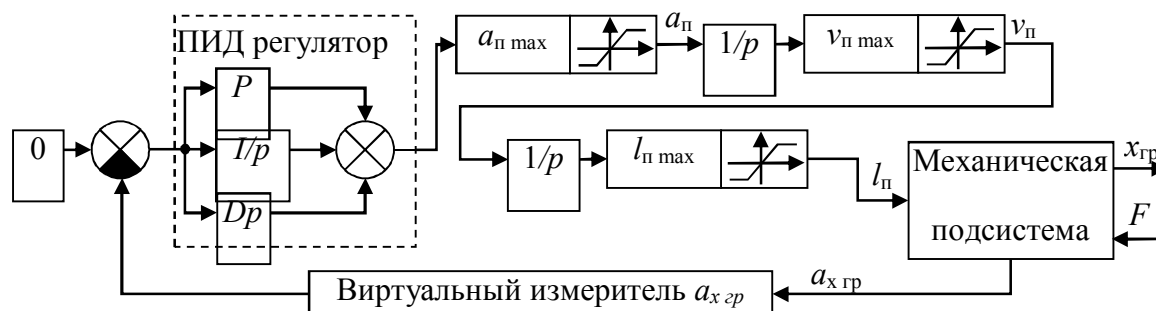


Рис. 2. Схема связей модели механической подсистемы мостового крана с ПИД-регулятором для гашения остаточных колебаний груза при помощи гидропривода

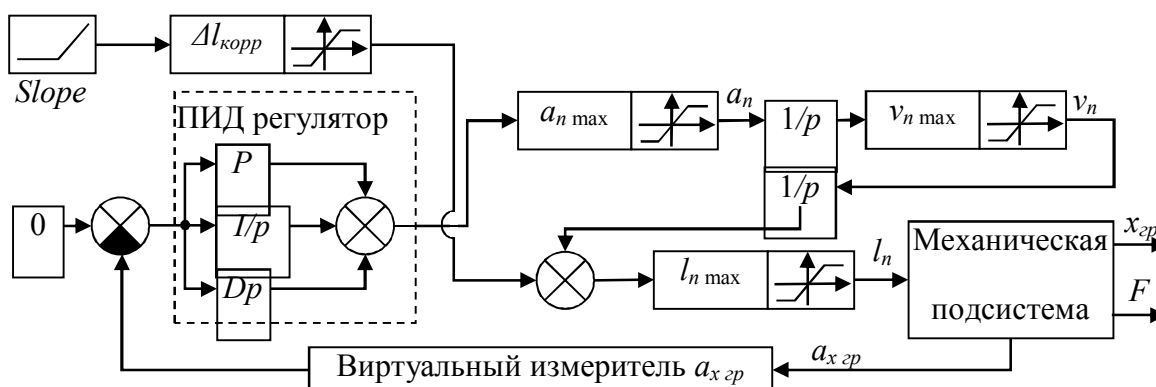


Рис. 3. Усовершенствованная схема связей модели механической подсистемы мостового крана с ПИД-регулятором для гашения остаточных колебаний груза при помощи гидропривода

Источником непрерывно нарастающего сигнала характеризуется значением скорости *Slope*

нарастания сигнала поправки (угловым коэффициентом временной зависимости):

$$\text{Slope} = \Delta l_{\text{корр}} / 5, [\text{м/с}]. \quad (1)$$

Время начала нарастания сигнала принято равным нулю, т.е. совпадает с началом гашения остаточных колебаний груза.

В результате сигнал на выходе двух блоков последовательно соединенных источника непре-

рывно нарастающего сигнала и ограничителя достигает значения $\Delta l_{\text{корр}}$ за 5 с, что укладывается в промежуток времени гашения колебаний во всем диапазоне исследованных параметров.

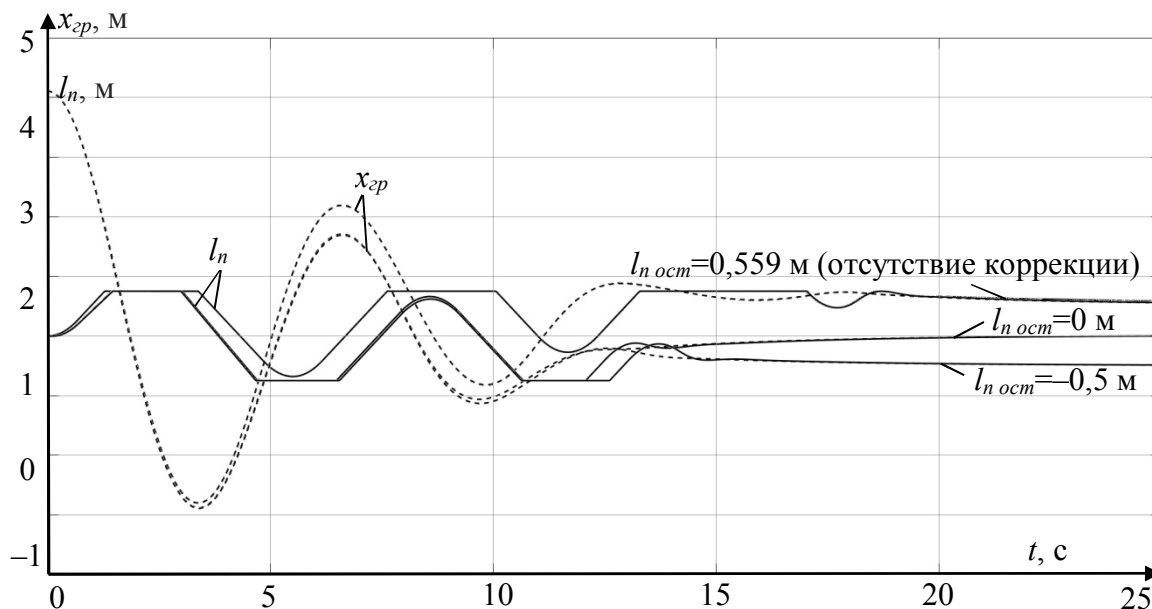


Рис. 4. Временные зависимости перемещений подвеса $l_n(t)$ и груза $x_{zp}(t)$ при гашении остаточных колебаний амплитудой $q_{\text{max}}=20$ град при длине грузового каната $l=12$ м: при отсутствии коррекции, при $l_{n \text{ осм}}=0$ м и при $l_{n \text{ осм}}=-0,5$ м (примеры)

Очевидной и достаточной простой аналитической зависимости между величинами $l_{n \text{ осм}}$ и $\Delta l_{\text{корр}}$ не наблюдается. В то же время было установлено, что подбором, т.е. оптимизацией значения $\Delta l_{\text{корр}}$, можно добиться требуемого значения остаточного смещения точки подвеса после завершения процесса гашения колебаний $l_{n \text{ осм}}$.

Использование усовершенствованной схемы. На рис. 4 приведены примеры временных зависимостей перемещений подвеса $l_n(t)$ и груза $x_{zp}(t)$ при гашении остаточных колебаний амплитудой $q_{\text{max}}=20$ град при длине грузового каната $l=12$ м: при отсутствии коррекции (гашение по схеме без усовершенствования), при $l_{n \text{ осм}}=0$ м и при $l_{n \text{ осм}}=-0,5$ м. При гашении колебаний по схеме без усовершенствования остаточное смещение на рис. 2 составило 0,559 м.

При гашении по усовершенствованной схеме фактическое остаточное смещение $(l_{n \text{ осм}})_{\text{факт}}$ приближается к требуемому $(l_{n \text{ осм}})_{\text{треб}}$, которое может быть назначено в пределах половины хода штока гидроцилиндра устройства гашения. Абсолютная погрешность не превышает 0,04 м для всех расчетных случаев (исследованных ранее сочетаний параметров длины подвеса l , начальной амплитуды остаточных колебаний

груза q_{max} , предельных ускорения скорости и хода штока гидроцилиндра $a_{n \text{ max}}, v_{n \text{ max}}, l_{n \text{ max}}$).

Оптимизация значения $\Delta l_{\text{корр}}$ выполнялась путем поиска значения аргумента неявно заданной нелинейной функции y одной переменной $\Delta l_{\text{корр}}$ (при фиксированных значениях всех прочих параметров), при котором значение функции y равно нулю.

Значение функции y в процессе численной оптимизации вычислялось по зависимости:

$$y = f(\Delta l_{\text{корр}}) = (l_{n \text{ осм}})_{\text{треб}} - (l_{n \text{ осм}})_{\text{факт}}. \quad (2)$$

Для оптимизации численными методами (поскольку целевая функция задана неявно) использовалась функция *fzero* языка программирования системы MATLAB, в которой применяются несколько известных численных методов поиска нуля функции: деление отрезка пополам, секущей и обратной квадратичной интерполяции [9, 10, 11, 12, 13, 14].

При своем выполнении функция *fzero* производит многократный (от нескольких десятков до нескольких сотен раз) запуск имитационной модели SimMechanics Second Generation и Simulink для гашения остаточных колебаний груза мостового крана с ПИД-регулятором по усовершенствованной схеме (рис. 5).

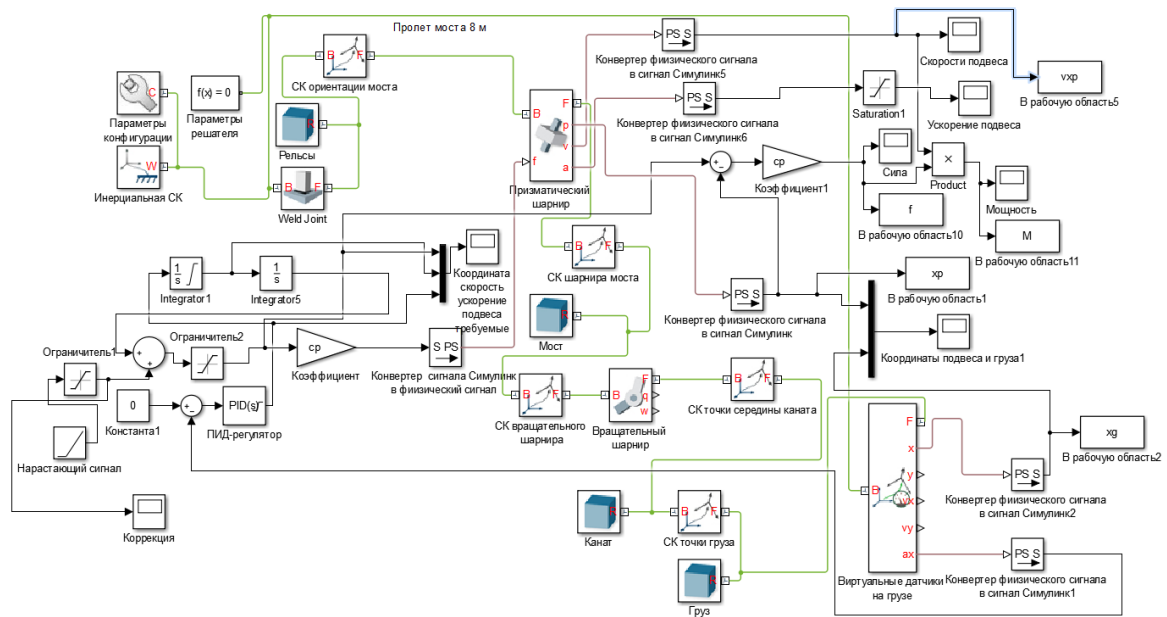


Рис. 5. Имитационная модель гашения остаточных колебаний груза мостового крана с ПИД-регулятором по усовершенствованной схеме в обозначениях SimMechanics Second Generation и Simulink

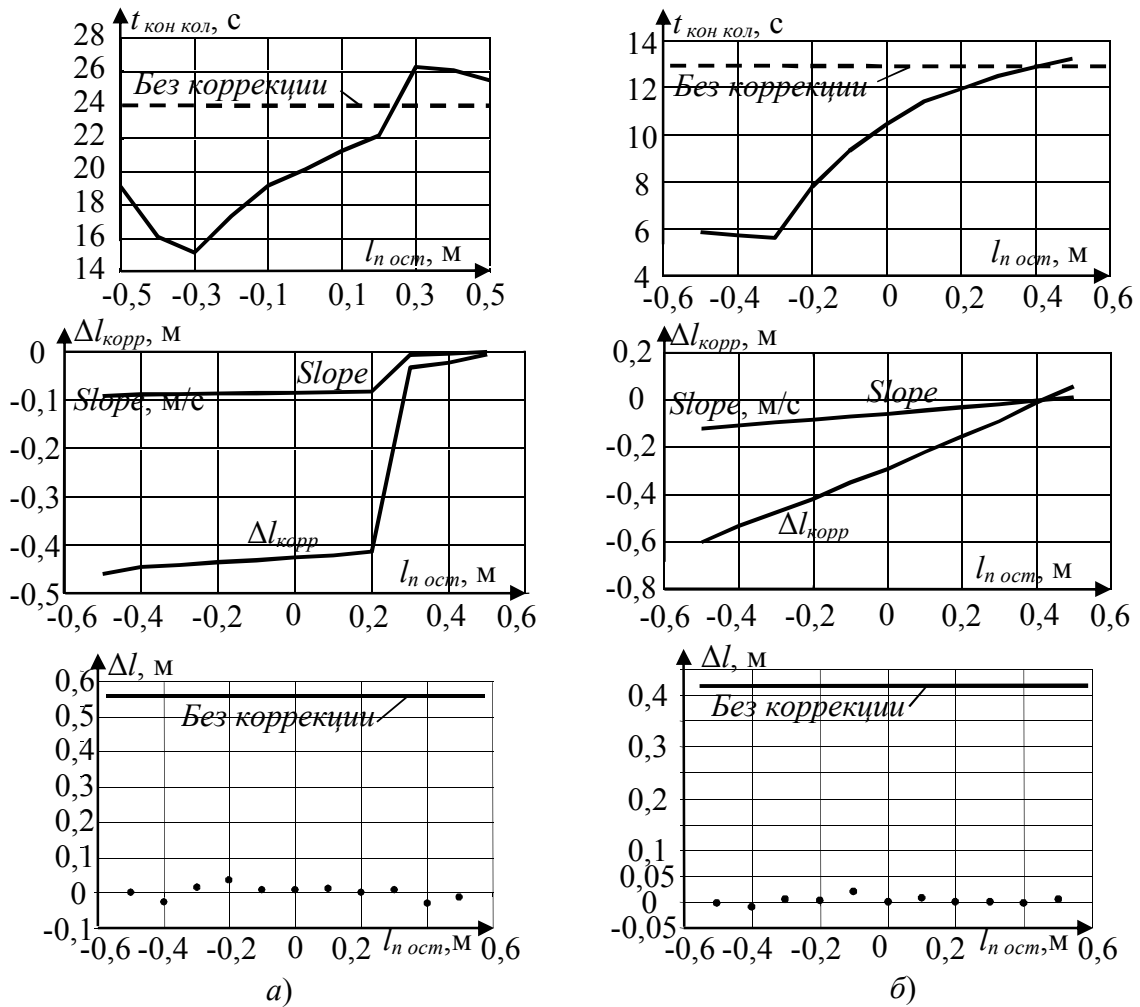


Рис. 6. Зависимости времени гашения остаточных колебаний $t_{кон кол}$, корректирующей поправки перемещений точки подвеса $\Delta l_{корр}$, скорости нарастания сигнала поправки $Slope$, абсолютной погрешности остаточного смещения подвеса и груза Δl от требуемого значения остаточного смещения $l_{n ост}$: а) при $l=12$ м, $q_{max}=20$ град, $a_{n max}=1,2$ м/с², $v_{n max}=0,8$ м/с, $l_{n max}=1,5$ м; б) при $l=4$ м, $q_{max}=20$ град, $a_{n max}=1,2$ м/с², $v_{n max}=0,8$ м/с, $l_{n max}=1,5$ м (примеры)

На рис. 6 приведены результаты оптимизации значений коррекции перемещения точки подвеса $\Delta l_{корр}$ при варьировании требуемой величины остаточного смещения груза и подвеса $l_{ост}$ в пределах $\Delta l_{корр} \in [-0,5; 0,5]$ м с шагом 0,1 м. В качестве примера приведены результаты для двух сочетаний параметров, характеризующих колебательную систему МК с гидроприводом и сам процесс колебаний: 1) $l=12$ м, $q_{max}=20$ град, $a_{n\ max}=1,2$ м/с², $v_{n\ max}=0,8$ м/с, $l_{n\ max}=1,5$ м; 2) $l=4$ м, $q_{max}=20$ град, $a_{n\ max}=1,2$ м/с², $v_{n\ max}=0,8$ м/с, $l_{n\ max}=1,5$ м.

То есть, во втором расчетном случае менялась только длина подвеса l с 12 до 4 м.

Выводы. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- возможна коррекция остаточного смещения точки подвеса в пределах половины хода штока гидроцилиндра устройства гашения;

- время гашения колебаний при большинстве значений требуемого остаточного смещения точки подвеса уменьшается, хотя возможно и его незначительное увеличение (до 10 % по сравнению с отсутствием коррекции);

- время моделирования (вычислительного синтеза траектории движения точки подвеса) увеличивается на порядок по сравнению с отсутствием коррекции и составляет в среднем 3-5 минут для отдельного расчетного случая на ПК средней производительности (AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 5600+ 2.90 GHz);

- снижение времени гашения колебаний может достигать 55 % и более (см. рис. 6, б), т.е. время гашения для отдельных заданных смещений точки подвеса может быть уменьшено более чем в 2 раза;

- зависимости оптимальных значений параметров блоков непрерывно нарастающего сигнала и следующего за ним ограничителя от величины требуемого остаточного смещения точки подвеса имеют разрывы (см. рис. 6, а), поэтому их регрессия затруднена;

- усовершенствованный способ гашения обеспечивает смещение точки подвеса и груза в требуемое положение с максимальной абсолютной погрешностью не более 0,04 м, которая может считаться незначительной при перемещении грузов МК;

- возможно использование усовершенствованного способа гашения колебаний с доводкой точки подвеса путем составления и использования массива готовых решений для различных сочетаний параметров, изменяемых с достаточно малыми шагами: длины грузового каната, угла начальной амплитуды остаточных колебаний и требуемого остаточного смещения точки подвеса. При этом динамические параметры

гидропривода устройства гашения целесообразно зафиксировать.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. 1317.

2. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Partrangenaru V., Lawrence J. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics // Journal of Vibration and Control. 2010. № 16. pp. 477–501.

2. Толочко О.И., Бажутин Д.В. 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 : PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003. 100 p.

5. Abdel-Rahman E.M., Nayfeh A.H., Masoud Z.N. Dynamics and control of cranes : a review. Journal of Vibration and Control. 2003. № 9. pp. 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. № 3. pp. 418–423.

7. Пат. 146374 Российская Федерация, МПК В66С13/04. Мостовой кран / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Вольф; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «СибАДИ». – № 2014120325/11, заявл. 20.05.14; опубл. 10.10.14, Бюл. № 28. – 2 с.

8. Пат. 2564560 Российская Федерация, МПК В66С 13/18. Способ повышения точности и скорости перемещения груза по требуемой траектории грузоподъемным краном мостового типа / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Вольф; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «СибАДИ». – № 2014118376/11. заявл. 06.05.14; опубл. 10.10.15, Бюл. № 28. – 9 с.

9. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

10. Мэтьюз Джон, Г., Численные методы. Использование MATLAB: пер. с англ. / Д. Финк, Куртис, Г. Джон, Мэтьюз. М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. 720 с.

11. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л.. Численные методы. М.: Физматлит, 2004. 400 с.

12. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1988. 552 с.

13. Гилл Ф. Численные методы условной оптимизации: пер. с англ. / Ф. Гилл, У. Мюррей. М.: Мир, 1977. 296 с.

14. Турчак Л.И. Основы численных методов: учеб. пособие. М.: Наука, 1987. 320 с.

Korytov M.S., Scherbakov V.S.

IMPROVEMENT OF RESIDUAL VIBRATIONS SHIPPING SLAKED BY REDUCING THE BIAS POINT UNCONTROLLED SUSPENSION

Active way of suppression of residual vibrations of the pendulum load after stopping the bridge crane by moving the point of suspension of cargo by means of hydraulic cylinders can be improved by reducing the uncontrolled displacement of the suspension point and provide the required displacement of the suspension point in the process of extinction. To eliminate uncontrolled displacement of the point of suspension and at the same time provide the required displacement of the suspension point in the process of clearing the residual oscillation of the load, the circuit connections model the mechanical subsystem of the bridge crane c proportional-integral-differential regulator for suppressing the residual oscillation of the load has been added blocks serially connected power continuously rising signal and limiter. Examples of the time dependences of the suspension displacement and load in the quench residual oscillations in the absence of correction and improved scheme. Correction of the residual displacement of the suspension point can be within half a stroke damping rod cylinder device. The improved method provides a damping suspension displacement and load point to the desired position with a maximum absolute error of not more than 0,04 m, which can be considered negligible when moving cargo.

Key words: Bridge Crane, PID, velocity, displacement, load, vibration damping, drive.

Корытов Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии».

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия.

Адрес: Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5.

E-mail: kms142@mail.ru

Щербаков Виталий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов и электротехника».

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия.

Адрес: Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5.

E-mail: sherbakov_vs@sibadi.org