

*Stikhanovsky Boris Nikolaevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of Omsk state university of means of communication (644046, Omsk, Karl Marx Avenue, 35, e-mail:bstish@mail.ru).*

*Stikhanovskaya Lyubov Mikhaelovna (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical sciences, associate professor The Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI) (644080 Omsk, Mira Ave. 5, e-mail:dekanat\_isu@sibadi.org).*

УДК 621.86

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МОСТОВОГО КРАНА С РЕЛЕЙНЫМИ ПРИВОДАМИ МОСТА И ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКИ

В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Шершнева  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация.** Приводится алгоритм моделирования рабочего процесса мостового крана с учетом динамических параметров приводов моста и грузовой тележки, имеющих управления релейного типа. Приводятся результаты исследования влияния параметров приводов мостового крана на точность перемещения груза по заданной траектории в трехмерном пространстве, конечную линейную скорость движения груза, число включений приводов. Полученные математические модели открывают возможность синтеза параметров приводов мостового крана по заданным предельным значениям точности перемещений, числа включений приводов и др.

**Ключевые слова:** мостовой кран, привод, управление релейного типа, точность, число включений, груз, гашение колебаний.

#### Введение

Для мостового крана (МК) с канатным нежестким подвесом груза существенной проблемой являются возникающие пространственные неуправляемые колебания груза, которые снижают производительность и точность работ, выполняемых МК. Одним из эффективных способов устранения данной проблемы без использования дополнительных механических устройств и без усложнения конструкции МК является оптимизация процесса управления механизмами приводов моста и тележки [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Для синтеза квазиоптимальной траектории перемещения точки подвеса груза на грузовой тележке, обеспечивающей движение груза по заданной траектории без раскачивания, может быть использовано пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) управление независимо по двум управляемым координатам груза в горизонтальной плоскости  $X_{ГР}$  и  $Z_{ГР}$  моста и грузовой тележки [7, 8, 9, 10].

**Алгоритм моделирования рабочего процесса мостового крана с учетом динамических параметров приводов моста и грузовой тележки, имеющих управления релейного типа**

Укрупненная блок-схема алгоритма моделирования рабочего процесса МК с

учетом динамических параметров приводов моста и грузовой тележки, имеющих управления релейного типа, состоящая из трех вычислительных этапов, приведена на рисунке 1.

Были приняты допущения о том, что: 1) влияние массы груза на ускорения точки подвеса пренебрежимо мало; 2) ускорения моста и грузовой тележки при разгоне, движении с постоянной скоростью и торможении МК с приводами, имеющими управления релейного типа (при моделировании рабочего процесса реального МК), в каждый момент времени принимали дискретные значения из рядов  $[a_1; 0; -a_1]$  для моста и  $[a_2; 0; -a_2]$  для грузовой тележки соответственно; 3) переключения реле приводов моста и грузовой тележки происходили по логическим сигналам  $i_{упр1}$ ,  $i_{упр2}$  (принимая значения  $[1; 0; -1]$ , соответствующие командам на движение в прямом направлении, остановку и движение в обратном направлении соответственно) мгновенно и без запаздывания.

Значения скоростей движения моста и грузовой тележки МК при этом непрерывно бесступенчато изменялись в пределах  $[V_{max1}; -V_{max1}]$  для моста и  $[V_{max2}; -V_{max2}]$  для грузовой тележки соответственно.

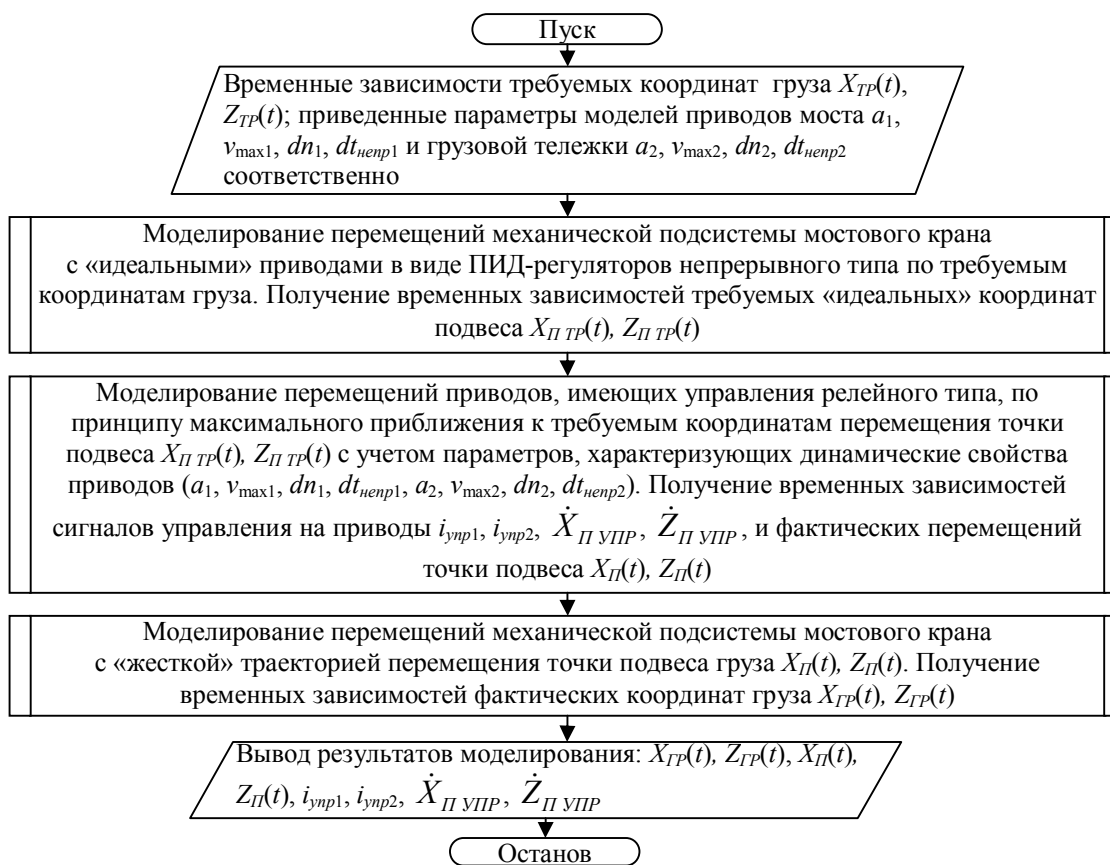


Рис. 1. Блок-схема алгоритма моделирования рабочего процесса мостового крана с учетом динамических параметров приводов, имеющих управления релейного типа

Согласно принятым допущениям с использованием блоков пакета SimMechanics Second Generation системы MATLAB была разработана Simulink-модель механической системы мостового крана с «идеальными» бесступенчатыми приводами без учета динамических свойств реальных приводов, имеющих управления релейного типа. Данная Simulink-модель с ПИД-регуляторами непрерывного типа позволяет на первом этапе моделирования получить «идеальные», требуемые для максимально точного обеспечения заданного перемещения груза, перемещения точки подвеса ( $X_{П TP}$ ,  $Z_{П TP}$ ) [8, 9, 10].

Указанные параметры сохраняются в рабочей области MATLAB в виде временных зависимостей  $X_{П TP}(t)$ ,  $Z_{П TP}(t)$ .

Моделировался, в качестве примера, имеющего широкое практическое применение, процесс обхода грузом единичного препятствия типа «стена» по сглаженной траектории, задаваемой по горизонтальным координатам  $X_0$ ,  $Z_0$  пространства в неподвижной декартовой системе координат  $O_0X_0Y_0Z_0$  сигмоидальными

(логистическими) временными функциями [8, 9, 10, 11].

Условное время перемещения точки подвеса груза  $t_{П}$ , которое входит в пределы  $t_{П}=1,33333 \cdot t_{ГР}$ , где  $t_{ГР}$  – условное время перемещения груза, при проведении серии описываемых экспериментов принимало фиксированное значение  $t_{П}=30$  с. При этом имеет место обратная зависимость  $t_{ГР}=0,75 \cdot t_{П}$ .

Пропорциональный коэффициент, интегральная и дифференциальная постоянные времени ПИД-регуляторов системы управления приводами перемещения моста и тележки в рассматриваемой серии экспериментов принимали значения:  $P=20$ ;  $I=5$ ;  $D=5$  соответственно.

Прочие значимые параметры рабочего процесса и МК принимали значения: приведенные коэффициенты демпфирования по угловым координатам отклонений грузового каната от вертикали в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях – 100 Н·м·с/рад; длина грузового каната МК 12 м; величина требуемого перемещения груза

вдоль оси  $O_0X_0$  – 10 м; величина бокового смещения для обхода препятствия вдоль оси  $O_0Z_0$  – 5 м; масса моста МК – 3500 кг; масса грузовой тележки МК – 1250 кг; масса перемещаемого груза – 100 кг.

На втором этапе моделирования для учета динамических свойств приводов моста и грузовой тележки МК, для определения их влияния на точность перемещения точки подвеса и груза, а также для определения зависимостей входных управляющих сигналов, поступающих на приводы, выполнялся синтез таких управляющих

воздействий на приводы, которые обеспечивали бы максимальное приближение траектории перемещения точки подвеса к требуемой  $X_{ПТР}(t)$ ,  $Z_{ПТР}(t)$ . Для этого использовалась разработанная имитационная модель автоматической обработки заданной сглаженной траектории релейными приводами МК (рис. 2), позволяющая изучать разгон подвижных звеньев МК до максимальных скоростей с постоянными ускорениями а также их торможения (рис. 3).

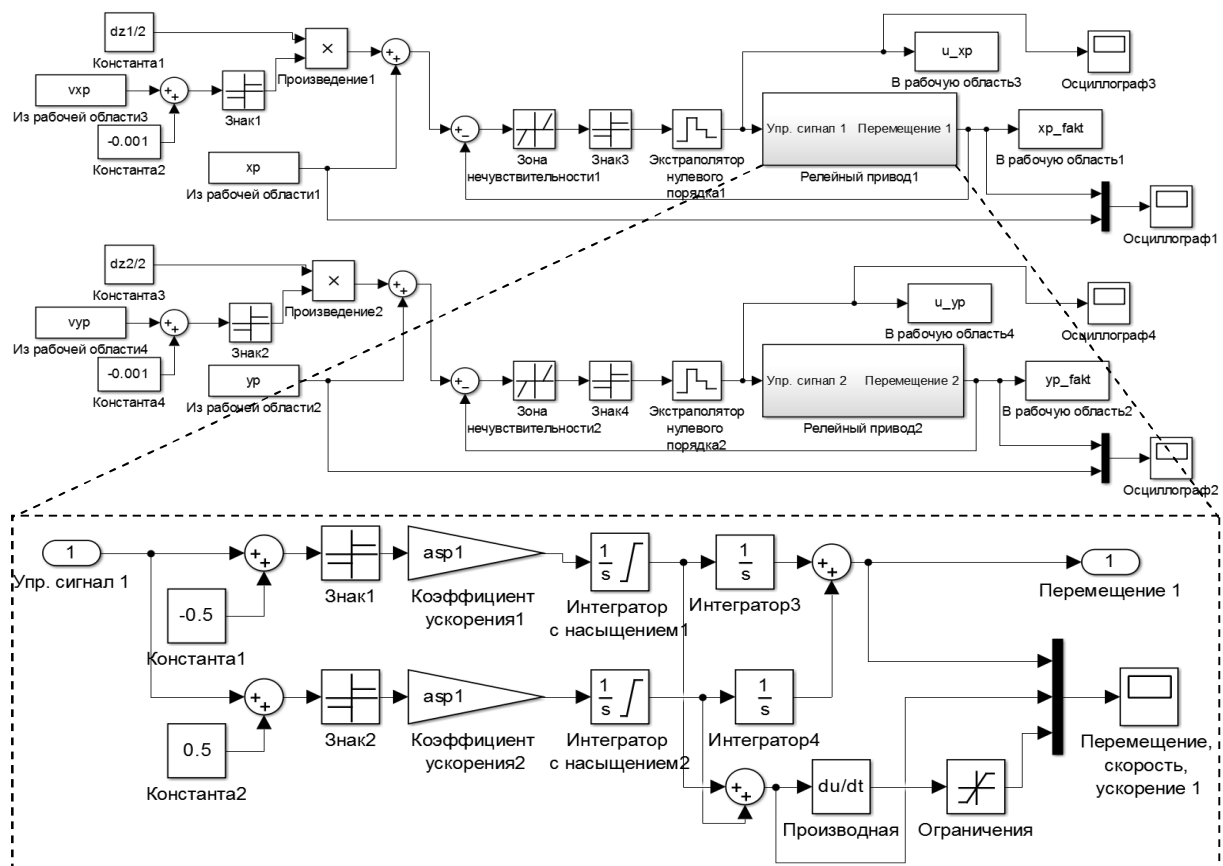


Рис. 2. Имитационная модель автоматической обработки заданной траектории релейными приводами мостового крана в обозначениях Simulink (2 этап моделирования)

В качестве параметров данной модели, характеризующих динамические свойства приводов, выступали:  $a_1$ ,  $a_2$  – постоянные ускорения разгона и торможения моста и грузовой тележки соответственно;  $V_{max1}$ ,  $V_{max2}$  – максимальные скорости движения моста и грузовой тележки соответственно;  $dn_1$ ,  $dn_2$  – значения ширины зон нечувствительности по координатам движения моста и грузовой тележки соответственно;  $dt_{непр1}$ ,  $dt_{непр2}$  – минимальное время неизменного положения реле приводов моста и грузовой тележки соответственно (минимальное время

постоянных, неизменяемых значений управляющего логического сигнала  $i_{упр}$ ).

Использование указанных параметров позволяет с достаточной для практических целей степенью приближения описать реальный привод.

Особенностью релейного привода является дискретность управляющего (логического) сигнала, соответствующего положениям (включениям) релейного элемента на перемещение звена в положительном направлении, на перемещение звена в

отрицательном направлении и на остановку звена.

Согласно принятым допущениям, уравнения, описывающие алгоритм автоматической отработки заданной сглаженной траектории релейными приводами МК, будут иметь вид, приведенный ниже.

Сигналы на входе блоков зон нечувствительности (см. рис. 2) по координатам  $X$  и  $Z$  будут определяться согласно зависимостям:

$$U_X(t) = \text{sgn}(\dot{X}_{\text{ПТР}}(t)) \cdot d_{n1}/2 + X_{\text{ПТР}}(t) - X_{\text{П}}(t); \quad (1)$$

$$U_Z(t) = \text{sgn}(\dot{Z}_{\text{ПТР}}(t)) \cdot d_{n2}/2 + Z_{\text{ПТР}}(t) - Z_{\text{П}}(t), \quad (2)$$

где  $X_{\text{ПТР}}(t)$ ,  $Z_{\text{ПТР}}(t)$  – требуемые значения координат подвеса  $X$  и  $Z$ , полученные на первом этапе моделирования;  $\dot{X}_{\text{ПТР}}$ ,  $\dot{Z}_{\text{ПТР}}$  – требуемые значения скоростей подвеса, полученные на первом этапе моделирования;  $d_{n1}$ ,  $d_{n2}$  – значения ширины зон нечувствительности по координатам соответствия моста и грузовой тележки соответственно;  $X_{\text{П}}(t)$ ,  $Z_{\text{П}}(t)$  – фактические значения координат подвеса по  $X$  и  $Z$ , полученные в момент времени  $t$  измерением виртуальными осциллографами на втором этапе моделирования.

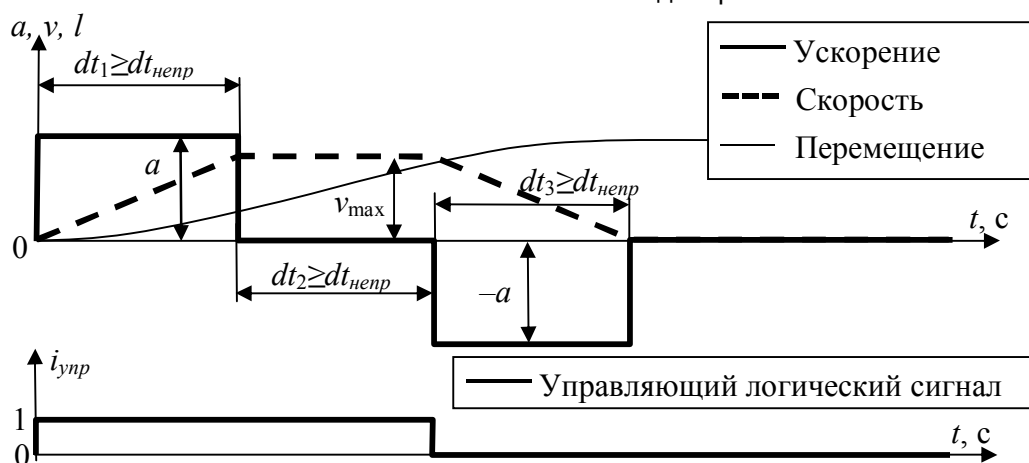


Рис. 3. Пример траектории, полученной при разгоне и торможении подвижного звена мостового крана до максимальной скорости  $v_{\text{max}}$  с постоянным ускорением  $a$

Блоки зон нечувствительности по координатам дают на выходе линейную зависимость выходного сигнала от входного

(с вычетом соответствующего порога) везде, за исключением зоны нечувствительности (мертвой зоны):

$$DZ_{\text{OutX}} = \begin{cases} 0 & \text{при } (U_X \geq -dn_1/2) \wedge (U_X \leq dn_1/2); \\ U_X - dn_1/2 & \text{при } (U_X > dn_1/2); \\ U_X + dn_1/2 & \text{при } (U_X < -dn_1/2); \end{cases} \quad (3)$$

$$DZ_{\text{OutZ}} = \begin{cases} 0 & \text{при } (U_Z \geq -dn_2/2) \wedge (U_Z \leq dn_2/2); \\ U_Z - dn_2/2 & \text{при } (U_Z > dn_2/2); \\ U_Z + dn_2/2 & \text{при } (U_Z < -dn_2/2). \end{cases} \quad (4)$$

Далее значения знаков величин  $DZ_{\text{OutX}}$  и  $DZ_{\text{OutZ}}$ :

$$U_{\text{ZohX}} = \text{sgn}(DZ_{\text{OutX}}); U_{\text{ZohZ}} = \text{sgn}(DZ_{\text{OutZ}}), \quad (5)$$

полученных по (3), (4), подаются на входы блоков экстраполяторов нулевого порядка (Zero-Order Hold) Simulink, значения

эталонного времени которых равны  $dt_{\text{непр1}}$  и  $dt_{\text{непр2}}$  соответственно.

Блоки Zero-Order Hold задерживают выходной сигнал на заданный промежуток времени  $dt_{\text{непр1}}$  или  $dt_{\text{непр2}}$  и оставляют неизменными значения выходного сигнала на каждом такте дискретизации:

$$i_{y_{np1}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_{ZohX}(n \cdot dt_{неп1}) \cdot \text{rect} \left( \frac{t - n \cdot dt_{неп1}}{dt_{неп1}} - \frac{1}{2} \right); \quad (6)$$

$$i_{y_{np2}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_{ZohZ}(n \cdot dt_{неп2}) \cdot \text{rect} \left( \frac{t - n \cdot dt_{неп2}}{dt_{неп2}} - \frac{1}{2} \right), \quad (7)$$

где  $\text{rect}$  – прямоугольная функция.

В результате, по (6), (7) на выходах блоков Zero-Order Hold формируются значения управляющих (логических) сигналов приводов  $i_{y_{np1}}$ ,  $i_{y_{np2}}$ .

**Описание модели привода**

Перемещение приводов описывается системой кинематических уравнений. Движение в соответствии с принятыми допущениями делится на три различных участка согласно значениям ускорения и скорости. Для каждого из трех участков характерны собственные уравнения ускорений  $a$ , скоростей  $v$  и координат перемещений  $X$  и  $Z$ :

1. Движение с положительным/отрицательным постоянным ускорением и переменной скоростью (два участка):

$$a_1(t) = \pm a_1; \quad v_1(t) = v_{10} \pm a_1 \cdot t;$$

$$X_{II}(t) = X_{II0} + v_{10} \cdot t \pm \frac{1}{2} a_1 \cdot t^2; \quad (8)$$

$$a_2(t) = \pm a_2; \quad v_2(t) = v_{20} \pm a_2 \cdot t;$$

$$Z_{II}(t) = Z_{II0} + v_{20} \cdot t \pm \frac{1}{2} a_2 \cdot t^2, \quad (9)$$

$$\text{Integr}_{OutX1} = \begin{cases} v_{\max 1} & npu \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) - 0,5) \cdot a_1) dt \right) > v_{\max 1}; \\ \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) - 0,5) \cdot a_1) dt & npu \ 0 \leq \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) - 0,5) \cdot a_1) dt \right) \leq v_{\max 1}; \\ 0 & npu \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) - 0,5) \cdot a_1) dt \right) < 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Integr}_{OutX2} = \begin{cases} 0 & npu \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) + 0,5) \cdot a_1) dt \right) > 0; \\ \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) + 0,5) \cdot a_1) dt & npu \ -v_{\max 1} \leq \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) + 0,5) \cdot a_1) dt \right) \leq 0; \\ -v_{\max 1} & npu \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np1}}(t) + 0,5) \cdot a_1) dt \right) < -v_{\max 1}. \end{cases} \quad (15)$$

На выходах двух расположенных параллельно блоков интеграторов с

$$\text{Integr}_{OutZ1} = \begin{cases} v_{\max 2} & npu \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np2}}(t) - 0,5) \cdot a_2) dt \right) > v_{\max 2}; \\ \int (\text{sgn}(i_{y_{np2}}(t) - 0,5) \cdot a_2) dt & npu \ 0 \leq \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np2}}(t) - 0,5) \cdot a_2) dt \right) \leq v_{\max 2}; \\ 0 & npu \left( \int (\text{sgn}(i_{y_{np2}}(t) - 0,5) \cdot a_2) dt \right) < 0; \end{cases} \quad (16)$$

где  $v_{10}$ ,  $v_{20}$ ,  $X_{II0}$ ,  $Z_{II0}$  – скорости и координаты на участке движения в начальный момент времени.

2. Движение с нулевым ускорением и постоянной скоростью (один участок):

$$a_1(t) = 0; \quad v_1(t) = \pm v_{\max 1};$$

$$X_{II}(t) = X_{II0} \pm v_{\max 1} \cdot t; \quad (10)$$

$$a_2(t) = 0; \quad v_2(t) = \pm v_{\max 2};$$

$$Z_{II}(t) = Z_{II0} \pm v_{\max 2} \cdot t. \quad (11)$$

Переход от уравнений (8), (9) к уравнениям (10), (11), осуществляется по условиям

$$\left( (v_1(t) \geq v_{\max 1}) \wedge (i_{y_{np1}} > 0) \right) \vee \left( (v_1(t) \leq -v_{\max 1}) \wedge (i_{y_{np1}} < 0) \right); \quad (12)$$

$$\left( (v_2(t) \geq v_{\max 2}) \wedge (i_{y_{np2}} > 0) \right) \vee \left( (v_2(t) \leq -v_{\max 2}) \wedge (i_{y_{np2}} < 0) \right). \quad (13)$$

Значения сигналов на выходах двух расположенных параллельно блоков интеграторов с насыщением (интеграторов с верхним и нижним уровнями ограничения выходного сигнала) для привода моста МК (координаты  $X$ ) будут определяться выражениями

насыщением для привода грузовой тележки МК (координаты  $Z$ ):

$$Integr_{OutZ2} = \begin{cases} 0 & npu \left( \int (\operatorname{sgn}(i_{ynp2}(t)+0,5) \cdot a_2) dt \right) > 0; \\ \int (\operatorname{sgn}(i_{ynp2}(t)+0,5) \cdot a_2) dt & npu -v_{\max 2} \leq \left( \int (\operatorname{sgn}(i_{ynp2}(t)+0,5) \cdot a_2) dt \right) \leq 0; \\ -v_{\max 2} & npu \left( \int (\operatorname{sgn}(i_{ynp2}(t)+0,5) \cdot a_2) dt \right) < -v_{\max 2}. \end{cases} \quad (17)$$

Далее в модели каждого из двух приводов значения сигналов  $Integr_{OutX1}$ ,  $Integr_{OutX2}$ ,  $Integr_{OutZ1}$ ,  $Integr_{OutZ2}$ , повторно интегрируются каждый по отдельности, а затем попарно суммируются. В результате формируются искомые действительные (фактические) значения координат приводов:

$$X_{II}(t) = \int (Integr_{OutX1}(t)) dt + \int (Integr_{OutX2}(t)) dt; \quad (18)$$

$$Z_{II}(t) = \int (Integr_{OutZ1}(t)) dt + \int (Integr_{OutZ2}(t)) dt. \quad (19)$$

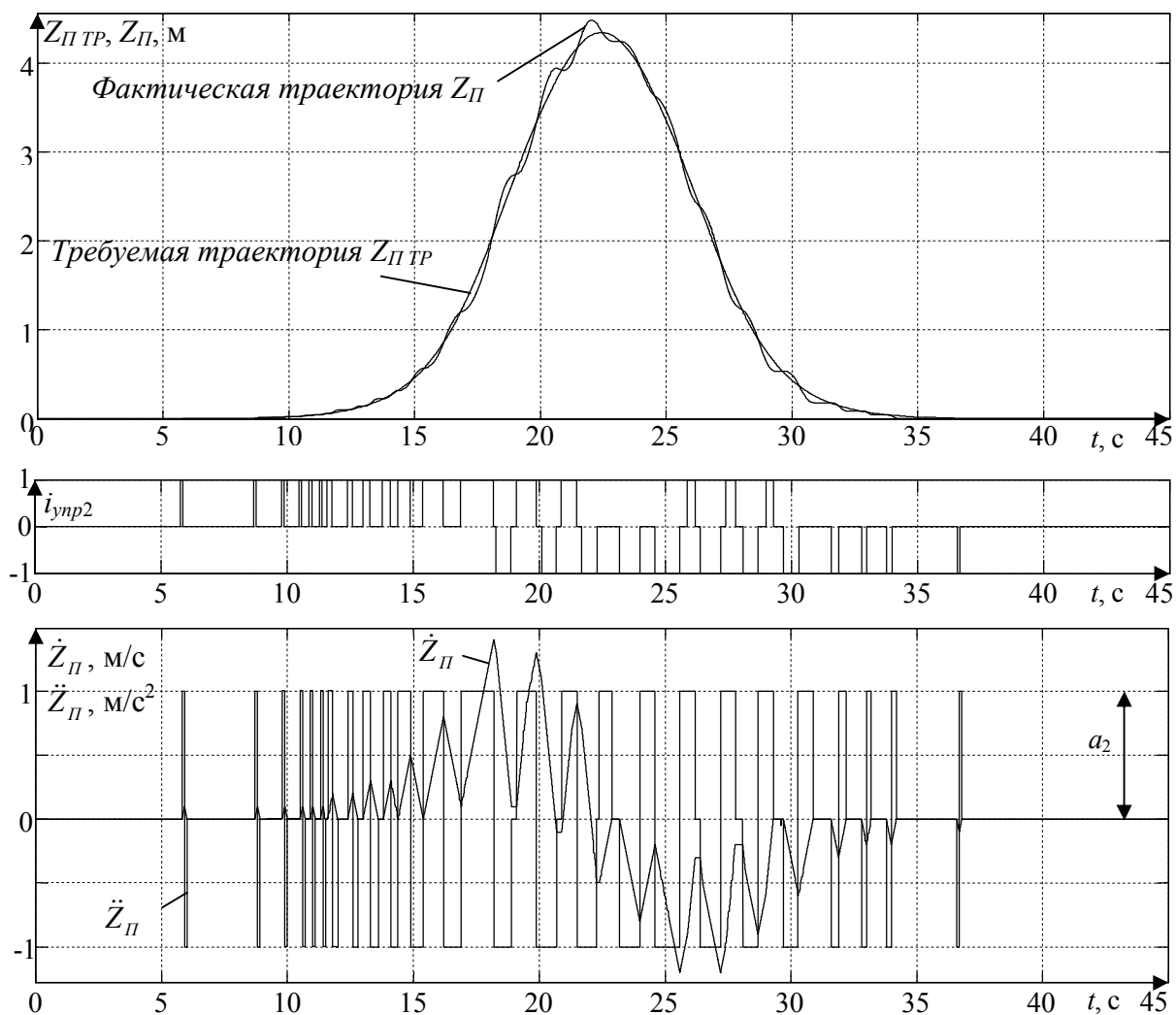


Рис. 4. Временные зависимости заданной  $Z_{II TP}$  и фактической  $Z_{II}$  координат перемещения грузовой тележки, синтезированного управляющего сигнала на привод грузовой тележки  $i_{ynp2}$ , а также ускорений и скоростей тележки  $\dot{Z}_{II}$ ,  $\ddot{Z}_{II}$  при отработке заданной траектории (пример)

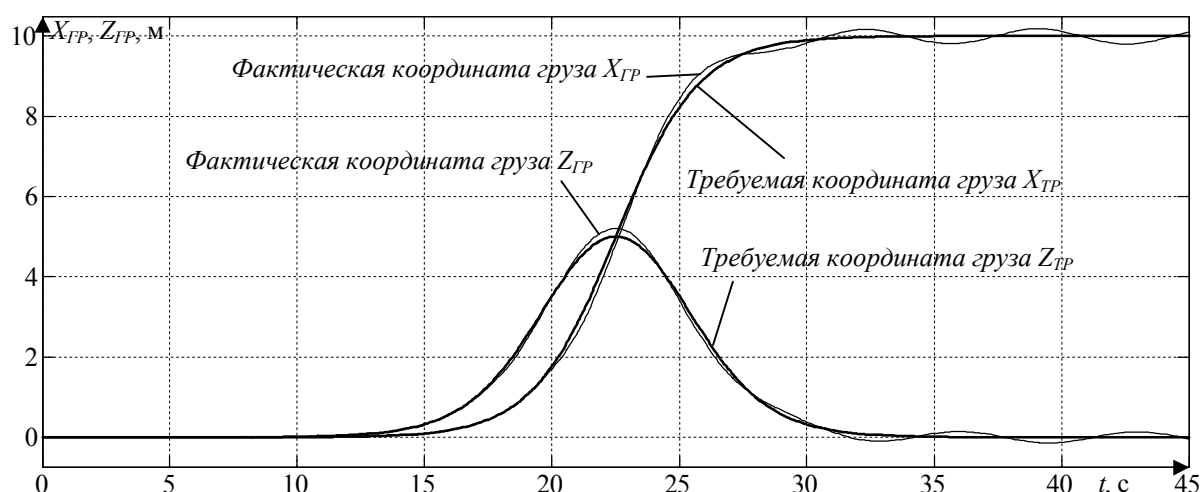


Рис. 5. Требуемые и фактические координаты перемещения груза (пример)

На основании текущих значений действительных координат приводов  $X_{П}(t)$ ,  $Z_{П}(t)$ , а также требуемых координат  $X_{П\ TR}(t)$ ,  $Z_{П\ TR}(t)$ , формируются управляющие воздействия для автоматической отработки заданной сглаженной траектории релейными приводами МК по (1)-(7).

Для требуемой траектории подвеса  $\{Z_{П\ TR}\}$  в качестве примера на рис. 4 приведены временные зависимости заданных и фактических координат перемещений грузовой тележки, управляющих сигналов на привод грузовой тележки, а также ускорений и скоростей движения грузовой тележки при отработке заданной траектории.

Графики получены при значениях параметров моделей формирования управляющих сигналов  $dn_1=0,1$  м,  $dt_{непр1}=0,1$  с,  $dn_2=0,1$  м,  $dt_{непр2}=0,1$  с, и моделей приводов моста  $a_1=1$  м/с<sup>2</sup>,  $v_{max1}=1,5$  м/с и грузовой тележки  $a_2=1$  м/с<sup>2</sup>,  $v_{max2}=1,5$  м/с.

На рис. 5 приводятся фактические координаты перемещения груза для рассматриваемого примера.

#### Выводы

Изменение параметров моделей приводов моста  $a_1$ ,  $v_{max1}$ ,  $dn_1$ ,  $dt_{непр1}$  и грузовой тележки  $a_2$ ,  $v_{max2}$ ,  $dn_2$ ,  $dt_{непр2}$  существенно влияет на показатели, характеризующие процесс перемещения груза мостовым краном.

Так, например, увеличение в цикле  $i$  из 4-х итераций параметров ширин зон нечувствительности  $dn_1=dn_2=[0,05; 0,1; 0,15; 0,2]$  с одновременным увеличением времени неизменного положения реле приводов моста и грузовой тележки  $dt_{непр1}=dt_{непр2}=[0,05; 0,1; 0,15; 0,2]$  ( $i=[1;4]$ ) приводит к уменьшению

числа включений приводов  $n_{вкл1}$  с 42 до 12 и  $n_{вкл2}$  с 51 до 20. Остальные параметры математических моделей при изменении  $dn_1=dn_2=dt_{непр1}=dt_{непр2}$  принимали фиксированные приведенные выше значения.

При увеличении ширин зон нечувствительности с одновременным увеличением времени неизменного положения реле приводов погрешность реализации траектории и конечная линейная скорость движения груза существенно, в несколько раз, возрастают.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что изменение параметров релейных приводов мостового крана оказывает существенное влияние на точность перемещения груза по заданной траектории в трехмерном пространстве, конечную линейную скорость движения груза, число включений приводов. Полученные математические модели открывают возможность синтеза параметров приводов мостового крана по заданным предельным значениям точности перемещений, числу включений приводов и др.

#### Библиографический список

1. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenaru V., Lawrence J. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics // Journal of Vibration and Control. – 2010. – № 16. – pp. 477-501.
2. Щедринов, А.В. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана / А.В. Щедринов, С.А. Сериков, В.В. Колмыков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 8. – С. 13-17.
3. Толочко, О.И. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин //

Электромашиностроение и электрооборудование. – 2010. – № 75. – С. 22-28.

4. Omar, H.M. Control of gantry and tower cranes: PhD Dissertation / H.M. Omar. – Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003.

5. Abdel-Rahman, E.M., Nayfeh, A.H., Masoud, Z.N. Dynamics and control of cranes: a review. *Journal of Vibration and Control*. – № 9. – 2003. – pp. 863-908.

6. Fang Y., Dixon W.E., Dawson D.M. and E. Zergeroglu. Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 8, No. 3, 2003. – pp. 418-423.

7. Денисенко, В.В. Разновидности ПИД-регуляторов / В.В. Денисенко // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 6. – С. 45-50.

8. Shcherbakov, V. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, M. Korytov, R. Sukharev, E. Volf // *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 701-702 (2015). pp. 715-720.

9. 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*, ISSN: 1590-8844, Vol. 16, No. 02, 2015, pp. 3-8.

10. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Volf E.O., «Reduction of the drive acceleration of bridge cranes through judicious choice of the load trajectory moving», *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, ISSN: 1820-6530, Vol. 9, No.1, 2015, pp. 57-64.

11. Mitchell, Tom M. *Machine Learning*. – WCB/McGraw-Hill, 1997. – 414 p.

### MATHEMATICAL MODELLING OF WORKING PROCESS OF THE BRIDGE CRANE WITH RELAY DRIVES OF THE BRIDGE AND CARGO CART

V.S. Scherbakov, M. S. Korytov, E.O. Shershneva

**Abstract.** The algorithm of modelling of working process of the bridge crane taking into account dynamic parameters of drives of the bridge and the cargo cart, having managements of relay type is resulted. Results of research of influence of parameters of drives of the bridge crane on accuracy of moving of cargo on the set trajectory in three-dimensional space, final linear speed of movement of cargo, number of inclusions of drives are resulted. The received mathematical models open possibility of synthesis of parameters of drives of the bridge crane on the set limiting values of accuracy of movings, numbers of inclusions of drives, etc.

**Keywords:** The bridge crane, drive, management of relay type, accuracy, number of inclusions, cargo, clearing of fluctuations.

### References

1. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenaru V., Lawrence J. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics. *Journal of Vibration and Control*. 2010. no 16. pp. 477-501.

2. Shhedrinov A.V., Serikov S.A., Kolmykov V.V. Avtomaticheskaja sistema uspokoenija kolebanij gruza dlja mostovogo krana [An automatic system of load's oscillation damping for the bridge crane]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2007, no 8. pp. 13-17.

3. Tolochko O.I., Bazhutin D.V. Sravnitel'nyj analiz metodov gashenija kolebanij gruzha, podveshennogo k mehanizmu postupatel'nogo dvizhenija mostovogo krana [A comparative analysis of methods of damping the load suspended from the mechanism of translational motion of overhead crane]. *Jelektromashinostroenie i jelektrooborudovanie*, 2010, no 75. pp. 22-28.

4. Omar, H.M. Control of gantry and tower cranes: PhD Dissertation / H.M. Omar. – Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003.

5. Abdel-Rahman, E.M., Nayfeh, A.H., Masoud, Z.N. Dynamics and control of cranes: a review. *Journal of Vibration and Control*. no 9. 2003. pp. 863-908.

6. Fang Y., Dixon W.E., Dawson D.M. and E. Zergeroglu. Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 8, No. 3, 2003. pp. 418-423.

7. Denisenko, V.V. Raznovidnosti PID-reguljatorov [Varieties of PID-regulators, Automation in the industry]. *Avtomatizacija v promyshlennosti*, 2007, no 6. pp. 45-50.

8. Shcherbakov, V. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, M. Korytov, R. Sukharev, E. Volf // *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 701-702 (2015). pp. 715-720.

9. 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*, ISSN: 1590-8844, Vol. 16, No. 02, 2015, pp. 3-8.

10. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Volf E.O., «Reduction of the drive acceleration of bridge cranes through judicious choice of the load trajectory moving», *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, ISSN: 1820-6530, Vol. 9, No.1, 2015, pp. 57-64.

11. Mitchell, Tom M. *Machine Learning*. – WCB/McGraw-Hill, 1997. 414 p.



*Щербakov Виталий Сергеевич (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org).*

*Корытов Михаил Сергеевич (Россия, Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: kms142@mail.ru).*

*Шершнева Елена Олеговна (Россия, г. Омск) – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: wolf\_eo@sibadi.org).*

*Sherbakov Vitaliy Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of The Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org).*

*Korytov Mikhail Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of the Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: kms142@mail.ru).*

*Shershneva Elena Olegovna (Russian Federation, Omsk) – graduate student of the department «Computer-aided manufacturing and electrical engineering», The Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: wolf\_eo@sibadi.org).*