

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

КООРДИНАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКИ МОСТОВОГО КРАНА И ПОДВИЖНОЙ ТОЧКИ ПОДВЕСА ГРУЗА В ЗАДАЧЕ ГАШЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕБАНИЙ

kms142@mail.ru

Описан способ координации двух траекторий грузовой тележки мостового крана и подвижной точки подвеса груза по критерию минимального отклонения между точками, двигающимися по двум траекториям при выполнении условия гашения маятниковых пространственных колебаний груза. В режиме гашения колебаний точка подвеса груза должна двигаться по криволинейной траектории, синтезированной по заданной сигмоидальной траектории перемещения груза при помощи пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов. Электрический привод моста и грузовой тележки мостового крана с релейным управлением не позволяет обеспечить движение моста и грузовой тележки крана, а следовательно, верхней точки маятниковой системы свободного канатного подвеса груза, по траектории, необходимой для гашения колебаний. Возможно лишь максимальное приближение траектории грузовой тележки к требуемой для гашения колебаний траектории подвижной точки подвеса груза. Окончательно решить проблему может применение гидравлического привода, перемещающего точку подвеса груза относительно грузовой тележки и реализующего таким образом требуемую для гашения колебаний траекторию. Показано, что оптимизация позволяет в несколько раз уменьшить хода штоков и размеры гидроцилиндров, используемых для быстрого перемещения точки подвеса груза и устранения его неуправляемых пространственных маятниковых колебаний.

Ключевые слова: мостовой кран, ПИД-регулирование, сигмоидальная, траектория, гашение колебаний, груз

Введение. Груз, перемещаемый краном мостового типа (МК) на гибком канатном подвесе, совершает маятниковые пространственные колебания, которые увеличивают время цикла на величину до 20 % и затрудняют использование МК в стесненных условиях и при наличии различных препятствий в виде посторонних объектов (оборудования, сооружений, материалов, заготовок производства и т.п.) в рабочей зоне перемещений. При этом возможны столкновения груза с препятствиями и повреждение как груза и МК в целом, так и посторонних объектов. Для предотвращения указанных аварийных ситуаций траектория перемещения груза планируется на значительных расстояниях от препятствий при их наличии, что еще более увеличивает время цикла МК [1, 2].

Известны различные способы гашения неуправляемых колебаний груза [3, 4, 5, 6, 7]. В настоящей работе использовался способ приближения фактической пространственной траектории перемещения груза МК к требуемой с одновременным гашением неуправляемых колебаний груза, когда требуемая траектория задана при помощи сигмоидальных функций [4].

Он заключается в формировании в режиме реального времени оптимальной траектории движения верхней подвижной точки подвеса груза на грузовых канатах при помощи ПИД-регуляторов с целью максимального приближе-

ния фактической траектории движения груза к требуемой. В результате синтезируется такая заданная траектория точки подвеса, при движении по которой груз будет двигаться по траектории, незначительно отличающейся от заданной сигмоидальными функциями [4].

Особенностью сигмоидальных функций является плавное нарастание первой и второй производных такой функции по времени от нуля до максимального значения и последующий плавный их спад до нуля. Вследствие этого заданная траектория точки подвеса характеризуется сравнительно небольшими ускорениями и скоростями одного порядка с требуемыми ускорениями и скоростями груза на сигмоидальной траектории [4].

Описание проблемы. Сложность реализации заданной траектории точки подвеса, обеспечивающей гашение неуправляемых колебаний груза на реальном МК заключается в том, что мост и грузовая тележка оснащаются, в подавляющем большинстве конструкций МК, электрическими приводами в виде электродвигателей переменного тока с релейным управлением. Для таких приводов целесообразно использовать минимальное число включений и выключений, поскольку дополнительные пуски приводят к появлению больших пусковых токов и уменьшают срок службы электродвигателей [8].

В то же время большая инерционность моста и грузовой тележки с грузом не позволяют обеспечить движения моста и грузовой тележки МК, а следовательно, верхней точки маятниковой системы свободного канатного подвеса гру-

за, с большими ускорениями, в связи с наличием конструктивных ограничений по сцеплению приводных колес моста и грузовой тележки с рельсами, по которым они передвигаются.

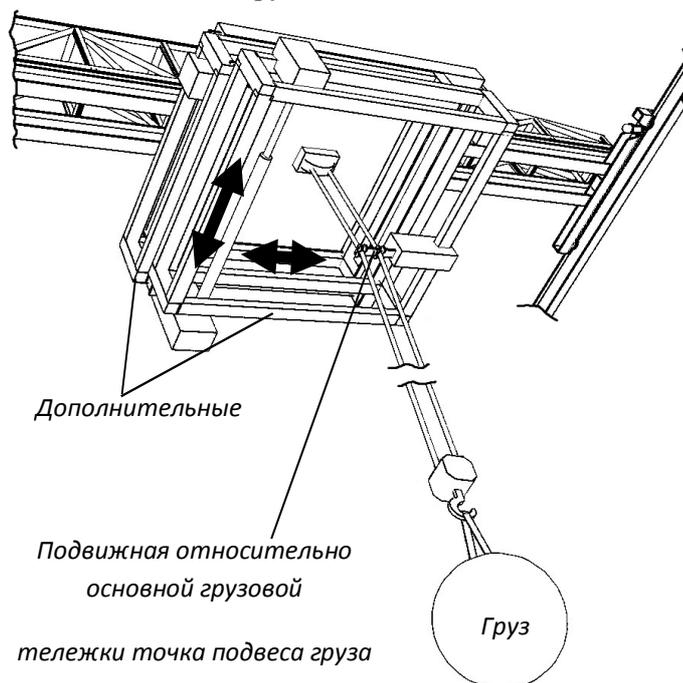


Рис. 1. Разработанная конструкция мостового крана с двумя дополнительными тележками для быстрого перемещения точки подвеса и гашения неуправляемых колебаний груза

Для решения данной проблемы авторами были разработаны конструкции МК с дополнительными механическими элементами для быстрых перемещений точки подвеса груза [9]. В конструкции МК с двумя дополнительными тележками, в виде рам снизу основной грузовой тележки (рис. 1). Перемещение двух дополнительных тележек двумя гидроцилиндрами в горизонтальной плоскости в двух перпендикулярных направлениях приводит к созданию подвижной точки подвеса относительно основной грузовой тележки. Высокое быстродействие гидропривода, способность обеспечивать большие скорости и ускорения по сравнению с электроприводами моста и основной грузовой тележки МК, малая масса штоков гидроцилиндров и роликов подвижной точки подвеса способны компенсировать перечисленные выше недостатки электроприводов и большую инерцию масс моста и основной грузовой тележки.

В то же время все гидроцилиндры имеют достаточно ограниченный ход штока. Это требует решения оптимизационной задачи координации двух траекторий: точки, связанной с основной грузовой тележкой мостового крана, и подвижной точки подвеса груза на нижней дополнительной тележке в задаче гашения неуправляемых колебаний.

Задача оптимизация целевой функции. В качестве целевой функции выступает наибольшее значение Δ_{\max} одного из двух максимальных (на временном отрезке реализации заданной траектории точки подвеса груза) отклонений положений штоков каждого из двух гидроцилиндров дополнительных тележек $\Delta X(t)$ и $\Delta Z(t)$ от собственного срединного положения по запасам ходов штоков на выдвигание и втягивание.

Целевую функцию необходимо минимизировать ($\Delta_{\max} \rightarrow \min$), т.к. это позволит использовать в конструкции МК гидроцилиндры меньших габаритных размеров с меньшими значениями предельных ходов штоков.

В качестве примера, имеющего важное практическое значение, рассматривалась заданная траектория перемещения груза в виде дуги для обхода грузом единичного препятствия. При реализации данной траектории колебания приобретают сложный пространственный характер. Для их гашения необходимо задействовать оба рабочих движения МК, т.е. перемещения точки подвеса в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.

Значение целевой функции при исследованиях было получено путем обработки (получения разностей) временных зависимостей значений горизонтальных координат двух точек, дви-

гающихся одновременно по двум траекториям: 1) траектории подвижной точки подвеса груза полученной при помощи ПИД-регуляторов (далее траектории № 1), обеспечивающей устранение неуправляемых колебаний груза путем отработки заданной траектории груза, когда последняя описана при помощи сигмоидальных функций; 2) траектории основной грузовой тележки мостового крана в горизонтальной плоскости (далее траектории № 2), полученной путем разгонов и торможений моста и основной грузовой тележки штатными электроприводами со сравнительно малыми постоянными ускорениями.

$$X_{TP}(t, a, c) = l_x / (1 + e^{-a \cdot (t-c)}); \quad (1)$$

$$Z_{TP}(t, a_1, c_1, a_2, c_2) = (s_x \cdot k_{sx}) / ((1 + e^{-a_1 \cdot (t-c_1)}) \cdot (1 + e^{-a_2 \cdot (t-c_2)})); \quad (2)$$

$$Y_{TP} = \text{const}, \quad (3)$$

где t – время; X_{TP} , Z_{TP} – требуемые горизонтальные координаты груза в момент t ; Y_{TP} – вертикальная координата груза; a , c , a_1 , c_1 , a_2 , c_2 – параметры сигмоидальных функций; l_x – заданная длина перемещения груза вдоль оси O_0X_0 (начальная и конечная точки имеют нулевую координату $Z=0$); s_x – размер наибольшего заданного смещения дуги требуемой траектории груза вдоль оси O_0Z_0 (для обхода препятствия); k_{sx} – коэффициент коррекции наибольшего значения смещения груза вбок.

$$k_{sx} = (1 + e^{-a_1 \cdot (c-c_1)}) \cdot (1 + e^{-a_2 \cdot (c-c_2)}). \quad (4)$$

Функция (2) является произведением двух функций вида (1) – нарастающей и ниспадающей, с отличным друг от друга временем точек перегиба. Параметры c , c_1 , c_2 задают время точек перегиба сигмоидальных функций. Параметрами a , a_1 , a_2 определяются скорости изменения (роста или спада) функций.

Для изменения формы траектории груза используется коэффициент k_{ud} характеризующий относительное удаление друг от друга двух, перемножаемых в выражении (2), простых сигмоидальных функций.

Условное время перемещения точки подвеса груза T_{TP} по результатам проведенных исследований входит в пределы $T_{TP}=1,33333 \cdot T_{TP}$, где T_{TP} – условное время перемещения груза.

При использовании порогового значения сигмоидальной функции $P=0,999$, при достижении которого заданное перемещение груза считалось завершённым, параметры сигмоидальной функции (1) определялись выражениями [4]:

$$a = \ln(1/P - 1) / (-T_{TP}/2); \quad c = 2 \cdot T_{TP}/2, \quad (5)$$

Описанное выше срединное положение штоков гидроцилиндров при решении оптимизационной задачи принято соответствующим совпадению координат точек на траекториях № 1 и № 2.

Требуемая траектория перемещения груза, используемая для синтеза траектории № 1, формируется при помощи двух сигмоидальных (логистических) временных функций отдельно по каждой горизонтальной координате X_0 , Z_0 пространства в неподвижной декартовой системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$. Координаты общей траектории в виде дуги для обхода грузом единичного препятствия задаются следующими временными зависимостями [4]:

где $T_{TP}=0,75 \cdot T_{TP}$.

Параметры функции (2) задавались следующими зависимостями [4]:

$$a_1=a; \quad a_2=-a; \quad c_1=c-k_{ud} \cdot T_{TP}; \quad c_2=c+k_{ud} \cdot T_{TP}. \quad (6)$$

В результате в декартовой системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ формируется траектория груза $X_{TP}(t)$, $Z_{TP}(t)$ в виде дуги.

Траектория № 1 перемещения подвижной точки подвеса груза $X_{TP}(t)$, $Z_{TP}(t)$ (ниже точки подвеса груз свободно раскачивается на грузовых канатах) формируется по траектории груза при помощи ПИД-регуляторов согласно схеме связей, представленной на рис. 2 [4].

Траектория № 1 описана временной зависимостью с дискретным постоянным шагом времени, поскольку получение ее аналитического выражения затруднено. На рис. 3 приведен пример требуемой траектории груза при значениях параметров $T_{TP}=21$ с, $l_x=12$ м, $s_x=6$ м, $k_{ud}=0,35$, и сформированной по ней требуемой траектории подвеса (траектории № 1). Длина подвеса груза (расстояние от подвижной точки подвеса до центра масс груза) составляла $L=12$ м. Масса груза $m_{TP}=100$ кг. Коэффициент демпфирования по угловой координате отклонения грузового каната от вертикали $b=100$ Н·м/(рад/с).

Траектория № 2 $X_M(t)$, $Z_T(t)$ также формировалась путем дискретного представления временных зависимостей ускорений, скоростей и перемещений $X_M(t)$ моста и основной грузовой тележки $Z_T(t)$, приводимых в движение штатными электроприводами МК. Было принято допущение о постоянных значениях ускорений при разгонах и торможениях моста и основной гру-

зовой тележки МК. Значение скорости вычислялось путем численного интегрирования ускорения. Значение перемещения в свою очередь – путем численного интегрирования скорости. Максимальные скорости установившегося дви-

жения моста и основной грузовой тележки исследуемого МК составляют: для моста $v_{мост\ max}=1,5$ м/с; для грузовой тележки $v_{тел\ max}=0,7$ м/с [10].

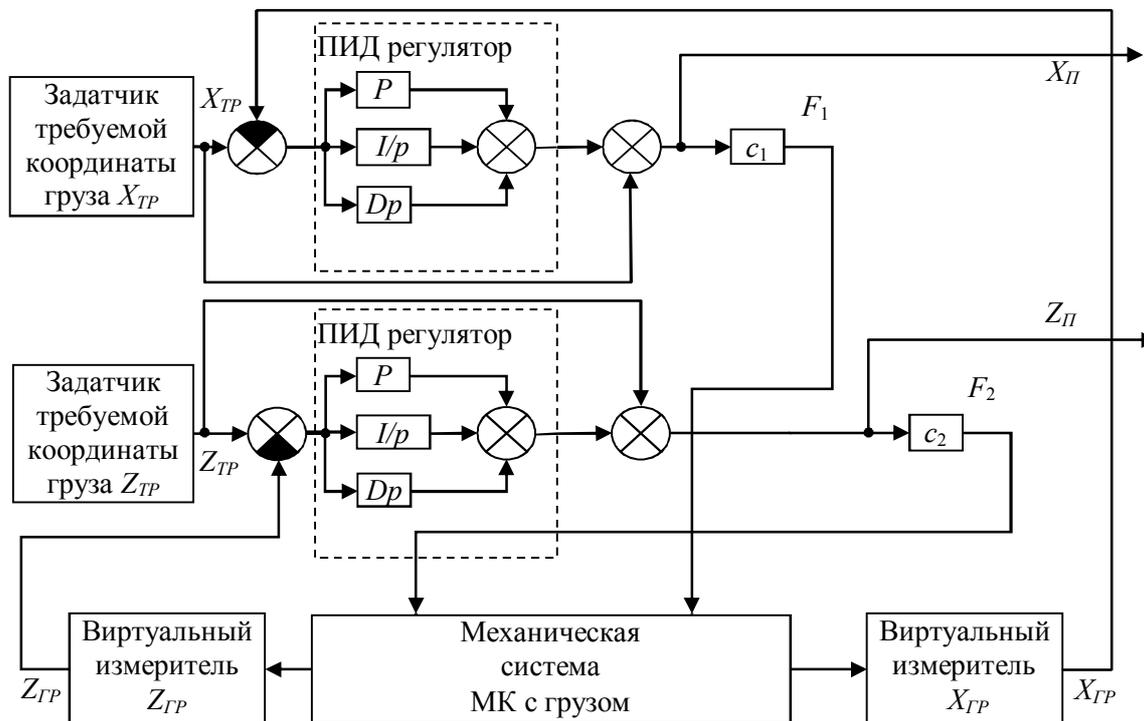


Рис. 2. Схема связей для построения модели механической системы мостового крана с ПИД-регуляторами, подвижная точка подвеса груза которого гасит неуправляемые колебания груза

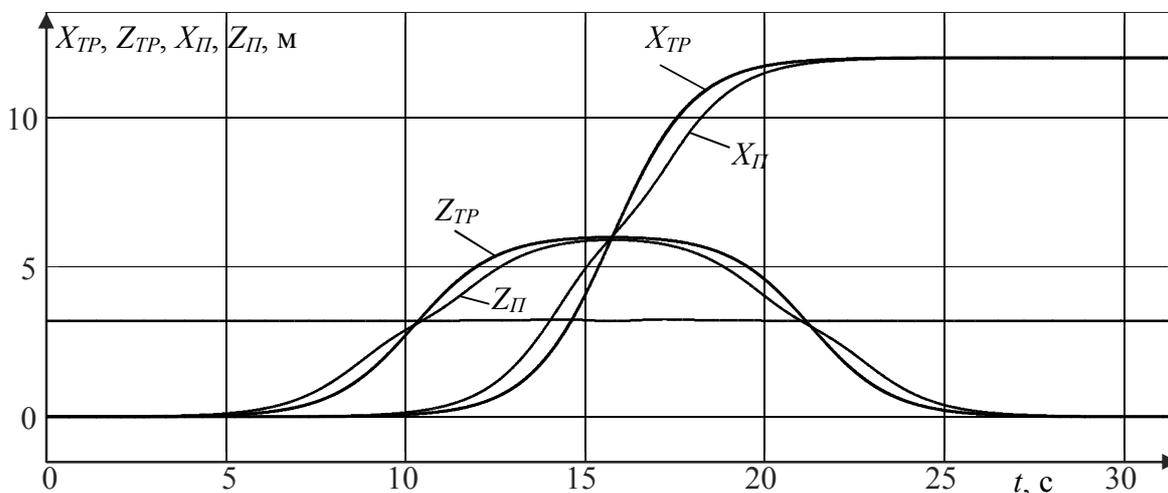


Рис. 3. Требуемая траектория перемещения груза и сформированная траектория перемещения точки подвеса (пример для $l_x=12$ м, $s_x=6$ м, $k_{уд}=0,35$)

Моделировались перемещения моста и основной грузовой тележки исследуемого МК по следующей траектории: 1) для моста – разгон от нулевой скорости до $v_{мост\ max}$ с ускорением $a_{мост\ разг}$, затем движение в установившемся режиме ($v_{мост\ max}=1,5$ м/с), затем полная остановка моста с ускорением торможения $a_{мост\ торм}$; 2) для грузовой тележки – комбинация из двух последовательно выполняемых перемещений на одно и то же расстояние, аналогичных перемещениям моста (п. 1) в прямом, а затем в обратном направ-

лениях с паузой (остановкой продолжительностью $t_{мел\ ост}$) между ними. $a_{мел\ разг}$, $a_{мел\ торм}$ обозначены ускорения разгона и торможения основной грузовой тележки соответственно.

Заданное перемещение основной грузовой тележки s_{x0} вдоль оси O_0Z_0 было представлено как сумма заданного бокового смещения груза s_x и величины коррекции бокового смещения ds_x :

$$s_{x0}=s_x+ds_x. \tag{7}$$

Полное общее время перемещения моста с грузовой тележкой $t_{полн}$ определялось как максимальное из двух значений полного времени перемещения моста и полного времени перемещения основной грузовой тележки. Запаздывание $t_{зан}$ момента начала перемещения того подвижного элемента МК (моста или основной грузовой тележки), время перемещения которого наименьшее, относительно момента начала перемещения подвижного элемента, время перемещения которого наибольшее, определялось по следующей зависимости:

$$t_{зан} = |(t_{мост\ полн} - t_{тел\ полн})| \cdot Part, \quad (8)$$

где $Part \in [0; 1]$ – безразмерный долевого коэффициент, характеризующий смещение момента начала перемещения одного подвижного элемента относительно момента начала перемещения второго подвижного элемента МК; $t_{мост\ полн}$, $t_{тел\ полн}$ – полного времени перемещения моста и основной грузовой тележки соответственно.

Все перечисленные выше независимые параметры, характеризующие процессы синтеза и координации (совмещения) траектории № 1 и траектории № 2, могут быть разделены на 3 группы: 1) Параметры, характеризующие траекторию, по которой требуется переместить груз:

$$\Delta_{max} = \max(\{|X_{II}(t) - X_M(t)\}; \{|Z_{II}(t) - Z_T(t)\}), t \in [0; T_{кон}], \quad (9)$$

где

$$T_{кон} = \max(t_{полн}; T_{II}). \quad (10)$$

Запаздывание $t_{зан}$ момента начала реализации той траектории (№ 1 или № 2), время реализации которой наименьшее, относительно момента начала реализации той траектории, время реализации которой наибольшее, определялось по следующей зависимости:

$$t_{зан0} = |(t_{полн} - T_{II})| \cdot 0,5. \quad (11)$$

Пример оптимизации. Оптимальные значения T_{II} , $k_{уд}$, $Part$, $t_{мел\ ост}$ и s_{x0} находились Симплекс-методом [11, 12] по условию минимизации значений Δ_{max} при начальных условиях

$$T_{II} = 30 \text{ с}; k_{уд} = 0,3; Part = 0,5; t_{мел\ ост} = 1 \text{ с}; s_{x0} = s_x. \quad (12)$$

Для сведения задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации, для решения которой применим симплекс-метод, использовался метод добавления к основной функции (9) штрафных функций при выходе параметров за диапазоны варьирования [11, 12]:

$$T_{II} \in [18; \infty]; k_{уд} \in [0,1; 0,5]; Part \in [0,1; 0,9]; \\ t_{мел\ ост} \in [0,1; \infty]; s_{x0} \in [0,1; \infty]. \quad (13)$$

T_{II} , l_x , s_x , $k_{уд}$; 2) Параметры, характеризующие механическую систему МК: L , $m_{ГР}$, b ; 3) Параметры, характеризующие траекторию перемещения основной грузовой тележки в горизонтальной плоскости (траекторию № 2): l_x , s_{x0} , $Part$, $t_{мел\ ост}$, $a_{мост\ разг}$, $a_{мост\ торм}$, $v_{мост\ max}$, $a_{тел\ разг}$, $a_{тел\ торм}$, $v_{тел\ max}$.

Параметры размеров требуемой траектории груза l_x , s_x при решении описываемой задачи считались заданными исходными данными и не оптимизировались. В то же время характеризующие траекторию, по которой требуется переместить груз, параметры T_{II} и $k_{уд}$ могут быть скорректированы без изменения габаритных размеров требуемой траектории груза l_x , s_x .

Параметры ускорений и максимальных скоростей движения моста и основной грузовой тележки также при решении задачи были фиксированными.

Из 15 перечисленных независимых параметров 10 будут заданными: l_x , s_x , L , $m_{ГР}$, b , $a_{мост\ разг}$, $a_{мост\ торм}$, $v_{мост\ max}$, $a_{тел\ разг}$, $a_{тел\ торм}$, $v_{тел\ max}$, и только оставшиеся 5 могут быть оптимизированы: T_{II} , $k_{уд}$, $Part$, $t_{мел\ ост}$, s_{x0} .

Значение целевой функции определялось выражением

В качестве примера, на рис. 4 приведены временные зависимости координат траекторий № 1 и № 2, по координатных отклонений двух указанных траекторий друг от друга (необходимых для реализации траектории № 1 подвеса отклонений положений штоков каждого из двух гидроцилиндров дополнительных тележек $\Delta X(t)$ и $\Delta Z(t)$ от собственного срединного положения по запасам ходов штока на выдвигание и втягивание) и виды в плане двух траекторий.

Фиксированные заданные параметры принимали значения $l_x = 12$ м; $s_x = 6$ м; $L = 12$ м; $m_{ГР} = 100$ кг; $b = 100$ Н·м/(рад/с); $a_{мост\ разг} = 0,4$ м/с²; $a_{мост\ торм} = 0,75$ м/с²; $v_{мост\ max} = 1,5$ м/с; $a_{тел\ разг} = 0,54$ м/с²; $a_{тел\ торм} = 0,67$ м/с²; $v_{тел\ max} = 0,7$ м/с.

На рис. 4, а (левый ряд) зависимости соответствуют начальным условиям (12), а на рис. 4, б (правый ряд) – оптимальным значениям переменных факторов:

$$T_{II} = 21,06 \text{ с}; k_{уд} = 0,34983; Part = 0,4635; \\ t_{мел\ ост} = 1,0317 \text{ с}; s_{x0} = 0,1559. \quad (14)$$

Значения целевой функции Δ_{max} до и после оптимизации переменных факторов составили 1,098 и 0,313 м соответственно.

То есть, для реализации исследованной траектории с габаритными размерами $l_x = 12$ м, $s_x = 6$ м без оптимизации, должны быть использованы

гидроцилиндры с максимальными значениями ходов штоков $1,098 \cdot 2 = 2,196$ м, а после оптимизации – с максимальными значениями ходов штоков $0,313 \cdot 2 = 0,626$ м.

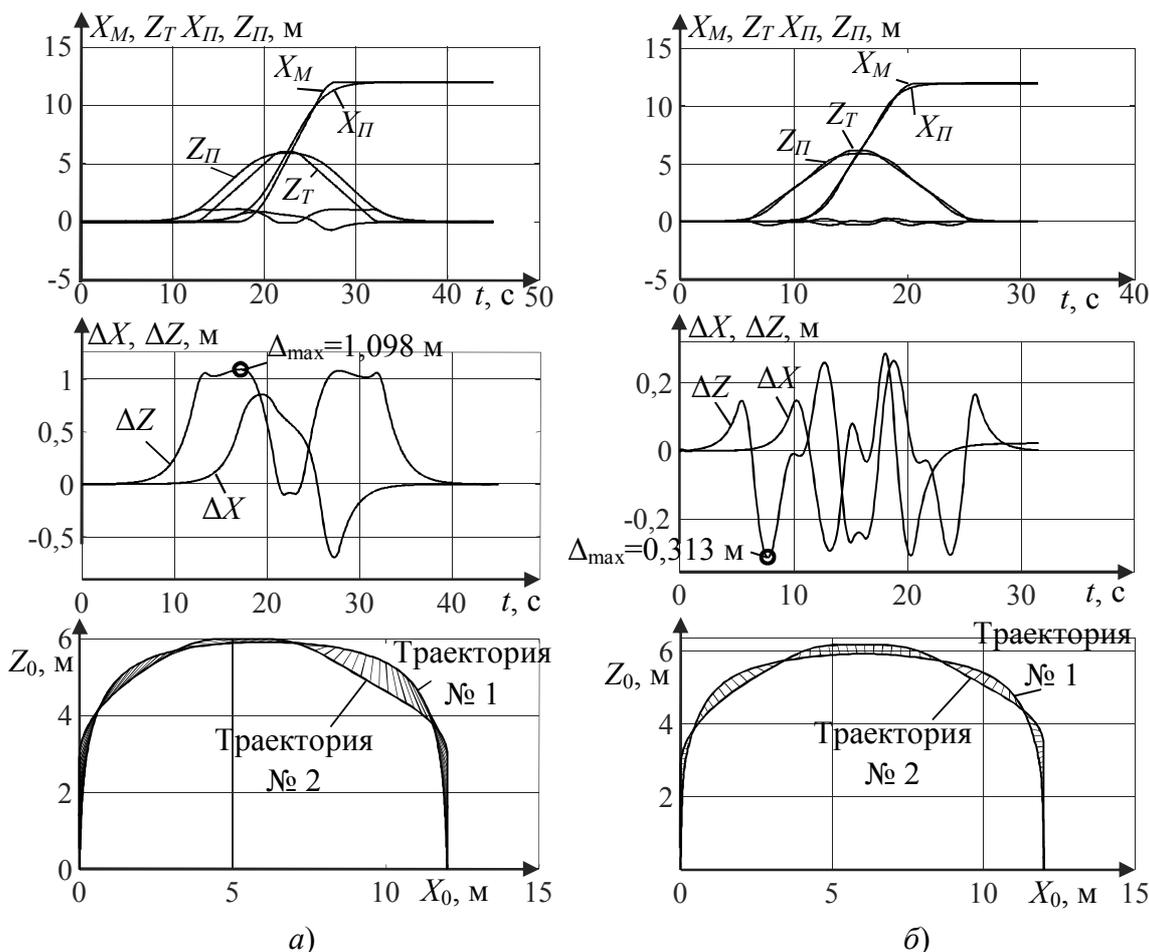


Рис. 4. Временные зависимости координат траекторий № 1 и № 2, покоординатных отклонений двух указанных траекторий друг от друга и виды в плане двух траекторий

Выводы. Проведенные исследования показали, что значение целевой функции Δ_{\max} при оптимизации ряда параметров без изменения габаритных размеров требуемой траектории груза может быть уменьшено более чем в 3 раза. Это позволит уменьшить хода штоков и размеры гидроцилиндров, используемых для быстрого перемещения точки подвеса груза и устранения его неуправляемых пространственных маятниковых колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Щедрин 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.
- 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.

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

- 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. № 2. pp. 3–8.

- Omar H.M. Control of gantry and tower cranes : PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003. 100 p.

- 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.

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

8. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Академия, 2007. 368 с.

9. Патент РФ № 2014120325/11, 20.05.2014. Щербаков В.С., Корытов М.С., Вольф Е.О. Мо-

стовый кран // Патент России № 146374. 2014. Бюл. № 28.

10. Иванченко Ф.К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. Киев: Вища школа. 1978. 576 с.

11. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М.: Факториал Пресс, 2002. 824 с.

12. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: пер. с англ. М.: Радио и связь. 1988. 128 с.

Korytov M.S., Scherbakov V.S.

COORDINATION OF TRAJECTORIES OF THE CARGO CART OF THE BRIDGE CRANE AND MOBILE POINT OF THE SUSPENSION OF FREIGHT IN THE PROBLEM OF CLEARING OF UNCONTROLLABLE FLUCTUATIONS

The way of coordination of two trajectories of the cargo cart of the bridge crane and mobile point of a suspension of freight by criterion of the minimum deviation between the points moving on two trajectories when performing a condition of clearing of pendulum spatial fluctuations of freight is described. In the mode of clearing of fluctuations the point of a suspension of freight has to move on the curvilinear trajectory synthesized on the set sigmoidal trajectory of movement of freight with the help пропорционально-интегрально-дифференциальных regulators. The electric drive of the bridge and the cargo cart of the bridge crane with relay management does not allow to provide the movement of the bridge and the cargo cart of the crane and consequently, the top point of pendulum system of a free rope suspension of freight, on the trajectory necessary for clearing of fluctuations. Perhaps only the maximum approach of a trajectory of the cargo cart to the trajectory of a mobile point of a suspension of freight demanded for clearing of fluctuations. Use of the hydraulic drive moving a point of a suspension of freight of rather cargo cart and realizing thus the trajectory demanded for clearing of fluctuations can finally solve a problem. It is shown that optimization allows to reduce several times the course of rods and the sizes of the hydraulic cylinders used for fast movement of a point of a suspension of freight and elimination of its uncontrollable spatial pendulum fluctuations.

Key words: bridge crane, PID-regulation, sigmoidal, trajectory, clearing of fluctuations, load

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