

УДК 621.86

Система компенсации угла уклона подтележечного рельсового пути мостового крана

Заярный С. Л.,
Павлов И. Д. *

* slepцова0330@gmail.com

Калужский филиал МГТУ имени
Н.Э. Баумана (Москва, Россия)

В работе рассмотрены способы компенсации угла уклона подтележечного рельсового пути, вызванного упругими деформациями пролетного строения мостового крана. Предложена механическая адаптивная система в качестве альтернативы строительному подъему, как способу компенсации угла уклона. Показаны возможности использования адаптивной механической системы, а также приведен вариант ее конструктивного исполнения.

Ключевые слова: Мостовой кран, пролетное строение, грузовая тележка, упругие деформации, угол уклона, рельсовый путь.

Введение

Кран мостовой представляет собой грузоподъемное оборудование, которое активно используется на производственных предприятиях, складах, строительных площадках. Транспортировка материалов выполняется за счёт перемещения их по подкрановому пути. В промышленности применяются модели с широким диапазоном характеристик. Выбор определяется особенностями сферы использования и параметрами грузов.

Важная особенность кранов мостового типа – работа в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Груз может подниматься, двигается отдельно тележка или вся несущая конструкция.

Пролетное строение мостового крана упруго прогибается под воздействием собственного веса и веса тележки с грузом. Величина прогиба регламентируется исходя из эксплуатационных и конструктивных требований. Согласно одному из них прогиб пролетного строения не должен препятствовать движению грузовой тележки по рельсовому пути. Для этого металлоконструкциям мостового крана придают высокую жесткость с применением высоколегированной стали.

Жесткость металлической конструкции крана должна быть такой, чтобы упругие деформации конструкции не препятствовали движению и торможению тележки при любой рабочей нагрузке.

Вместе с тем, как указано автором работы [1], «...требование контроля упругого прогиба в настоящее время в значительной степени определяется традицией и приводит к недоиспользованию материала по напряжениям. Существующие ограничения прогиба во многих случаях могут являться прямым препятствием для применения низколегированных сталей и легких металлов».

Применение низколегированных сталей и легких сплавов позволило бы значительно снизить затраты на изготовление мостовых кранов. Однако в этом случае необходима компенсация увеличенного упругого прогиба пролетного строения крана. Поэтому исследование данного вопроса представляется актуальной научной задачей.

Основная часть

В результате прогиба пролетного строения крана возникает уклон подтележечного рельса, который необходимо учитывать при проектировании механизма перемещения грузовой тележки [2,3].

Результирующее значение уклона подтележечного рельса вычисляется по формуле

$$\theta = \theta_0 + \theta_s, \quad (1)$$

где $\theta_0(\chi) = \theta_G(\chi) + \theta_b(\chi) < 0$ – уклон, возникающий в результате упругого прогиба металлической конструкции и рельсового пути от веса тележки с грузом, массой, равной номинальной грузоподъемности $\theta_G(\chi)$, и от собственного веса пролетного строения, с размещенным на нем оборудованием $\theta_b(\chi)$;

$\theta_s(\chi) > 0$ угол уклона, создаваемый формой строительного подъема y_s .

Здесь [4]:

$$\theta_G(\chi) = -\frac{GL^2}{3EI_y} \chi(1-\chi)(1-2\chi); \quad (2)$$

$$\theta_b(\chi) = -\frac{G_b L^2}{24EI_y} (1-6\chi^2+4\chi^3), \quad (3)$$

где $\chi = \frac{x}{L}$; G_b – вес пролетного строения с оборудованием;

$G = (G_Q + G_T)$ – временная нагрузка;

G_T – вес грузовой тележки;

G_Q – вес груза;

E, I_y – модуль упругости и момент инерции пролетного строения.

С учетом (1), (2), (3) угол уклона θ_0 достигает своего максимального абсолютного значения при положении центра грузовой тележки на расстоянии $x = (0,15 \dots 0,21)L$ от края балки пролетом L (меньшие значения принимаются для кранов больших пролетов и малой грузоподъемности, ГОСТ 34589 -2019), и составляет [4]:

$$\theta_0(\chi = 0,21) = -1,55(1 + \beta) \frac{y_0}{L}, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{G_b}{G}$;

$y_0 = \frac{GL^3}{48EI_y}$ – стрела прогиба от временной номинальной нагрузки, расположенной по

середине пролетного строения.

Строительным подъемом y_s является конструктивная величина, для назначения которой требуется выполнение обоснованных условий. Так, согласно [1], величина строительного подъема назначается из условия, позволяющего «обеспечить крановой балке при порожнем кране такой же выгиб вверх, какой выгиб вниз она имеет при максимальном грузе». Для этого, «строительный подъем y_s при изготовлении назначается равным сумме прогибов от постоянной (собственный вес) y_{G_b} и половины временной (тележка с номинальным грузом) y_G нагрузок», т.е. $y_s = y_{G_b} + y_G/2$.

С учетом этих соображений и формулы (4), угол уклона, вызванный строительным подъемом, при экстремальном значении $\theta_0(\chi = 0,21)$, составит

$$\theta_s(\chi = 0,21) = 1,55(2 + \beta) \frac{y_0}{2L}. \quad (5)$$

В случае реализации строительного подъема y_s в форме синусоиды изменение угла уклона по длине балки определяется как $\theta_s(\chi) = \frac{y_{s,max}}{L} \pi \cos(\pi\chi)$, а его значение при $\chi = 0,21$, составляет $\theta_s(\chi = 0,21) = 0,78\pi \frac{y_{s,max}}{L}$.

Однако реализация строительного подъема в форме синусоиды, хотя и является рациональной, но сложной технологической задачей. Поэтому строительный подъем проще создать в виде ломаной линии: $\theta_s(\chi) = y_s/(0,25 \dots 0,3)L$ при $0 < \chi < 0,25 \dots 0,3$; $\theta_s(\chi) = 0$ при $0,25 \dots 0,3 < \chi < 0,5$.

Для определения обобщенных характеристик изменения углов уклона подтележечного рельсового пути, возникающих в результате упругого прогиба пролетного строения крана, представим соотношения (2), (3), в иных видах.

Соотношение (2) для определения угла уклона от временной нагрузки G представим в виде:

$$\theta_G(\chi) = G_i L^2 \nu_\alpha \phi_G(\chi), \quad (7)$$

где $\nu_\alpha = \frac{1}{3EI_y}$ – изгибная податливость пролетного строения;

$\phi_G(\chi) = -(\chi - 3\chi^2 + 2\chi^3)$ – линия влияния (функция формы) угла наклона упругой линии пролетного строения;

$G_i = (2 - i)G_Q + G_T$ – вес груза при i - м нагрузочном режиме работы крана.

Соотношение (3) для определения угла уклона в зависимости от постоянной нагрузки G_b представим в виде:

$$\theta_b(\chi) = \beta_i G_i L^2 \nu_\alpha \phi_b(\chi), \quad (8)$$

где $\phi_b(\chi) = -\frac{1}{8}(1 - 6\chi^2 + 4\chi^3)$ – функция формы угла наклона упругой линии пролетного строения, при постоянной (распределенной) нагрузке;

$G_i = (2 - i)G_Q + G_T$ – вес груза при i - м нагрузочном режиме работы крана.

С учетом (7) и (8) соотношение $\theta_0(\chi) = \theta_G(\chi) + \theta_b(\chi)$, для различных нагрузочных режимов работы крана, примет вид:

$$\theta_{i,\Sigma}(\chi) = G_i L^2 \nu_\alpha \psi_i(\chi), \quad (9)$$

где G_i – вес груза при i - м нагрузочном режиме работы крана;

$\psi_i(\chi) = \beta_i \phi_b(\chi) + \phi_G(\chi)$ – функциональная зависимость, определяющая качественную характеристику изменения углов уклона рельсового пути, при " i "-тых нагрузочных режимах работы крана;

$\beta_i = \frac{G_b}{(2-i)G_Q + G_T}$ – нагрузочный коэффициент режима работы крана;

$i = 1$ – рабочий режим с максимальным грузом;

$i = 2$ – холостой режим;

$1 < i < 2$ – рабочий режим с неполной нагрузкой.

В качестве примера на рис. 1 представлены графики функциональных зависимостей $\psi_1(\chi), \psi_{1,5}(\chi), \psi_2(\chi)$. Очевидно, что ту же форму будут иметь и функции $\theta_{i,\Sigma}(\chi)$, определяющие характеристику изменения углов уклона рельсового пути при различных нагрузочных режимах работы крана (9).

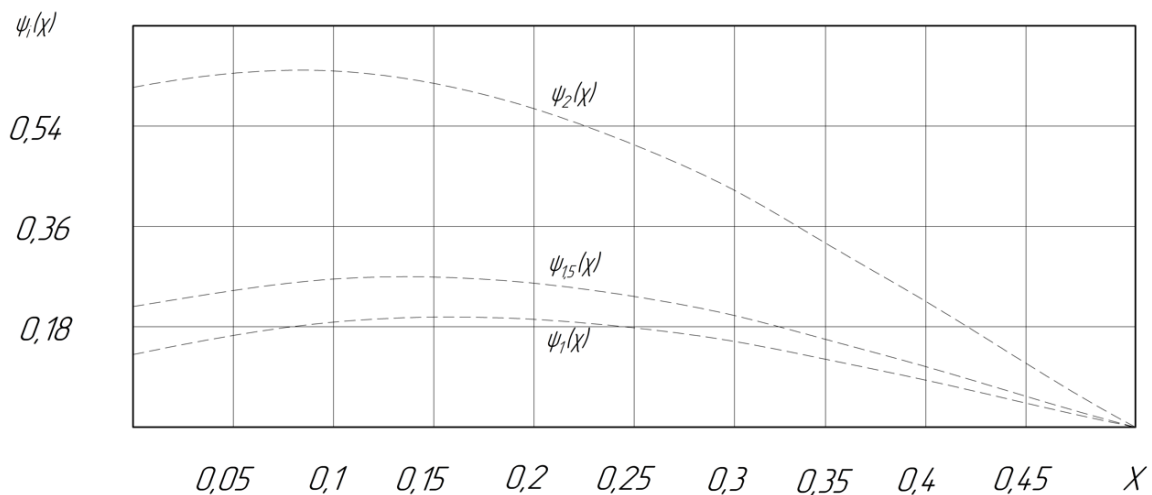


Рис.1. Функциональные зависимости характеристик изменения углов уклона рельсового пути, при характерных нагрузочных режимах работы крана: $\psi_1(\chi)$, $\beta_1 = 1$ (это для случая, когда вес балки G_b равен весу временной нагрузки $G = (G_Q + G_T)$); $\psi_{1,5}(\chi)$, $\beta_{1,5} = 1,66$; $\psi_2(\chi)$, $\beta_2 = 4,85$.

Реализация характерных особенностей изменения функций $\theta_{i,\Sigma}(\chi)$, в адаптивной механической системе, позволит обеспечить формирование компенсирующих уклонов $\theta_{i,\kappa}(\chi)$ рельсового пути грузовой тележки мостового крана, исключая влияние уклонов подтележечного рельсового пути, возникающих в результате упругого прогиба пролетного строения крана, на сопротивление передвижению грузовой тележки [5]:

$$\theta_{i,\kappa}(\chi) = -\theta_{i,\Sigma}(\chi). \quad (10)$$

Решение этой задачи является особенно актуальной для металлоконструкций мостовых кранов, выполненных из низколегированных сталей, которые обладают значительной вертикальной податливостью [6].

Из рассмотрения графиков изменения функции $\psi_i(\chi)$ (рис. 1) видно, что они могут быть аппроксимированы тремя участками кусочно-линейных функций: возрастающая функция; стационарная функция; убывающая функция. Эти особенности, очевидно, будут присущи и функциям $\theta_{i,\Sigma}(\chi)$ и $\theta_{i,\kappa}(\chi)$.

Одним из вариантов адаптивной системы с характеристиками (10), является система, имеющая кинематическую подвижность в вертикальной плоскости [5], которая может быть обеспечена установкой пролетного строения на упругие опоры [7]. В этом случае, величины компенсирующих уклонов должны находиться в нелинейной функциональной зависимости от текущего положения грузовой тележки, а условие (10), заменяется условием минимизации результирующего значения уклона подтележечного рельса, определяемого как

$$\theta(\chi) = \theta_0(\chi) + \theta_k(\chi) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $\theta_k(\chi) > 0$ – кинематический уклон, возникающий в результате перемещения упругих опор.

На рис. 2 показана принципиальная схема варианта такой системы в случае установки пролетного строения мостового крана на упругие опоры с необходимыми характеристиками.

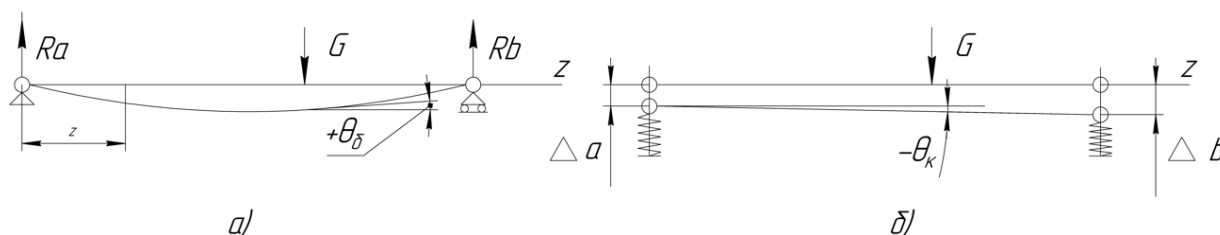


Рис 2. Схема компенсации уклонов рельсового пути грузовой тележки при установке моста крана на упругие опоры: а) схема формирования уклона при упругом деформировании пролетного строения мостового крана; б) схема компенсации уклона при упругом деформировании опор пролетного строения, пропорционально изменению положения грузовой тележки.

G – временная нагрузка; R_a, R_b – реакции связи; θ_δ – угол уклона в случае деформирования пролетного строения; θ_k – угол уклона в случае компенсации уклонов; $\Delta a, \Delta b$ – упругая деформация опор пролетного строения.

Величина кинематического уклона, согласно рис. 2 б), определяется из соотношения

$$\theta_k(\chi) = \frac{1}{L} (\Delta_b - \Delta_a), \quad (12)$$

где $\Delta_{a(b)} = R_{A(B)} * \mu(\Delta)$ – перемещение опор под нагрузками $R_{A(B)}$;

$\mu(\Delta)$ – характеристика нелинейной жесткости упругой опоры.

Как видно на рис. 1, эффективность упругой опоры, для компенсации упругих деформаций пролетного строения крана, обеспечивается в случае ее нелинейной механической характеристики, с выраженными участками возрастающей жесткости, при перемещении грузовой тележки в пределах $0,1 \dots 0,15 < \chi < 0,5$. Такая характеристика может быть обеспечена конструктивным исполнением упругой опоры, в частности в виде телескопического гидравлического цилиндра с пневмогидравлическим аккумулятором, конструкция и механическая характеристика которой представлена на рис. 3.

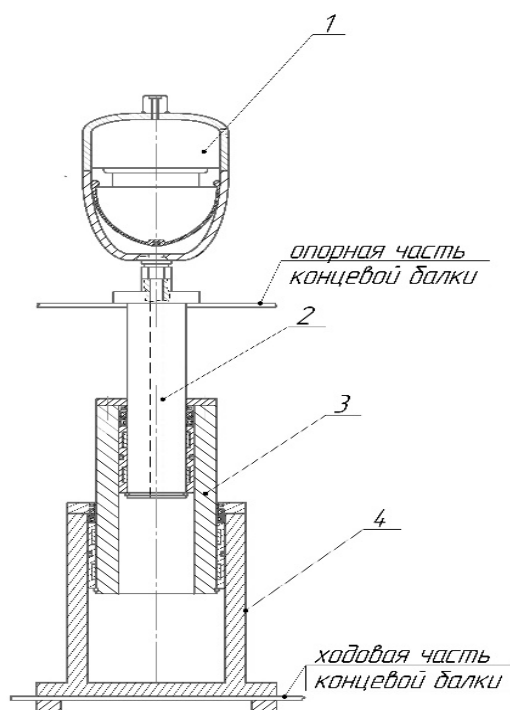


Рис. 3. Телескопическая гидростатическая опора. а) конструкция гидростатической опоры: 1- пневмогидравлический аккумулятор; 2-шток первой ступени; 3-шток второй ступени; 4-корпус. б) характеристика гидростатической опоры: 1-характеристика первой ступени; 2-характеристика второй ступени; F_0 -усилие статического положения, определяемое давлением зарядки аккумулятора; Δ_1, F_1 - параметры первой ступени; Δ_2, F_2 - параметры второй ступени.

Верхнее статическое положение гидростатической опоры, определяется давлением зарядки аккумулятора, при котором обеспечивается компенсация постоянной нагрузки F_0 , равной весу пролетного строения. При временной нагрузке, усилия, действующие на статическую опору, компенсируются последовательной работой ее первой и второй ступеней.

Нижнее статическое положение гидростатической опоры, обеспечивается конечным положением штоков первой и второй ступеней, при их упоре в дно корпуса гидростатической опоры. Тем самым формируется нелинейная механическая характеристика гидростатической опоры.

Для компенсации углов уклона рельсового пути на участке перемещения грузовой тележки в пределах $0,1 \dots 0,15 > \chi > 0$, (рис.1), предусматривается установка на грузовой тележке 1, показанной на (рис.4), гидростатической системы, состоящей из гидростатического телескопического упора 2 и опорных гидроцилиндров 4, установленных в системе подвески ее ходовых колес.

При положении тележки 1 (рис. 4 а) в промежутке пролетного строения $0,1 \dots 0,15 < \chi < 0,5$, шток 3 гидростатического упора 2 выдвинут, штоки опорных гидроцилиндров 4 упираются в днище корпусов, гидроцилиндры 4 трансформируются в жесткую опору, а подвески ее ходовых колес, в жесткую подвеску. При положении грузовой тележки 1, на краю пролетного строения, $0,1 \dots 0,15 > \chi > 0$, (рис. 4 б), один из телескопических штоков 3, упираясь в концевой упор, перемещается, вытесняя по гидравлическим линиям рабочую жидкость в опорные гидроцилиндры. При этом, в гидростатических упорах создается давление и продольное компенсирующее усилие, пропорциональное нагрузке на ходовые колеса.

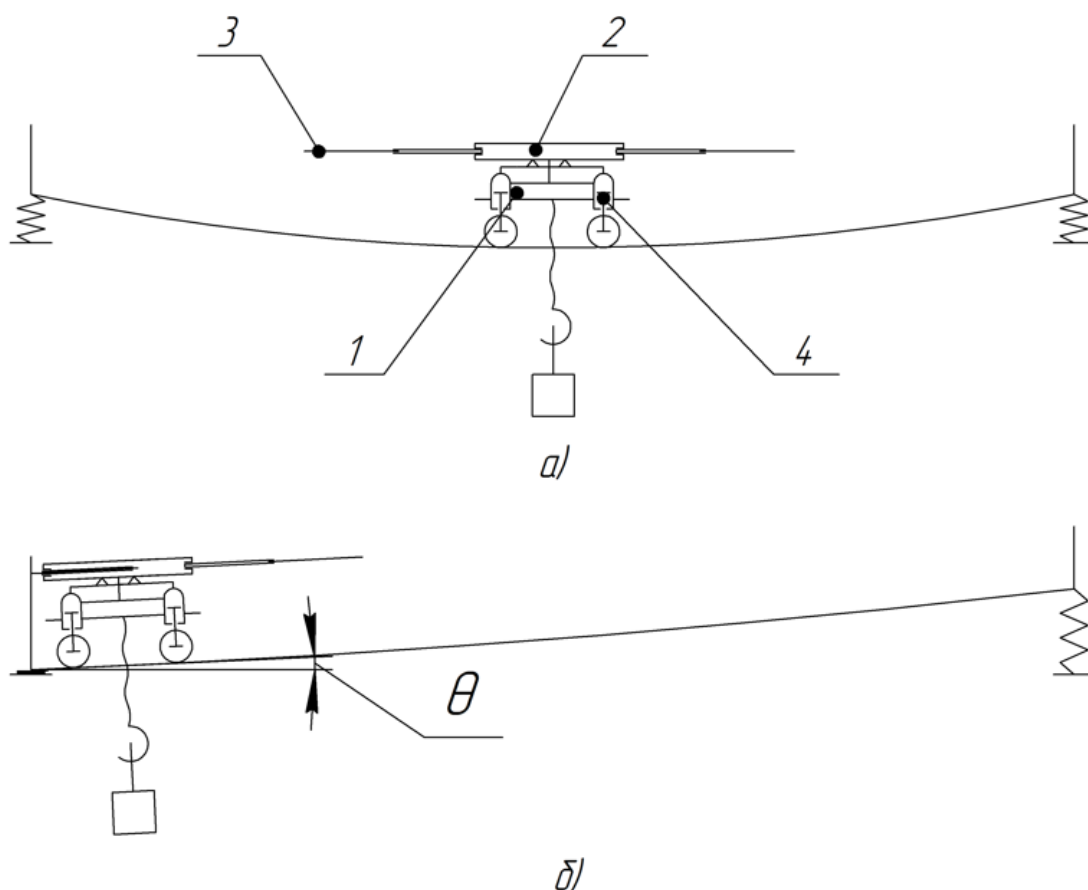


Рис. 4. Схема компенсации углов уклона рельсового пути при крайних положениях грузовой тележки: 1- грузовая тележка; 2 – гидростатический упор; 3 – телескопический шток; 4 – упругие опоры.

На рис. 5 представлен вариант конструктивного исполнения концевой балки, состоящей из опорной 1 и ходовой 2 частей, между которыми установлены упругие, гидростатические опоры 1. Деформации гидростатических опор, при изменении положения грузовой тележки $0,25 \dots 0,3 < \chi < 0,5$, формируют нелинейно изменяемый кинематический уклон пролетного строения. При $0 < \chi < 0,25 \dots 0,3$, шток гидростатической опоры занимает свое крайнее положение (упирается в дно корпуса), при котором устанавливается максимальное, стационарное, значение угла кинематического уклона пролетного строения.

На рис. 6 представлен вариант конструктивного исполнения грузовой тележки, оборудованной гидростатическими упорами, выполненными в виде телескопических гидроцилиндров [8].

коэффициентов нагрузки и изгибной податливости пролетного строения в (9) составляют: $\beta_1 = 0,766$; $\beta_2 = 3,96$; $\nu_\alpha = 0,95 \cdot 10^{-9} [1/H \cdot \text{м}^2]$.

Изменения параметров деформированного состояния пролетного строения двухбалочного мостового крана, выполненного из прокатного двутавра 60Б2 ГОСТ 26020, показаны на рис.7.

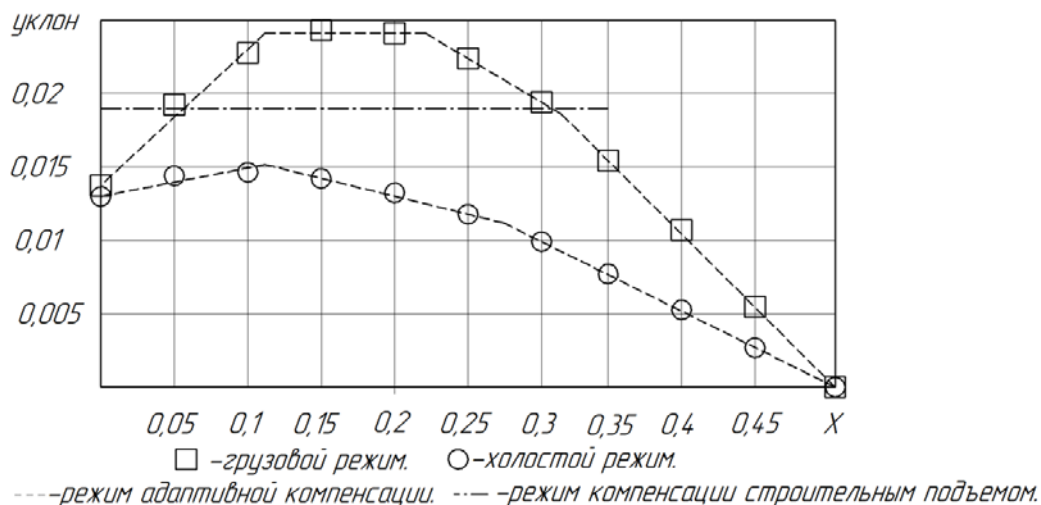


Рис. 7. Изменения параметров деформированного состояния пролетного строения мостового крана, выполненного из прокатный двутавр 60Б2 ГОСТ 26020.

Здесь представлены расчетные значения упругих деформаций рельсового пути пролетного строения мостового крана, при грузовом и холостом режимах нагружения, а также представлены графические зависимости режимов адаптивной компенсации рассчитанных из условия (12), с учетом нелинейных характеристик упругих опор. Их сравнение, определяющее величину некомпенсированного угла уклона подтележечного рельса, позволяет отметить особенности его формирования для различных вариантов исполнения пролетного строения мостового крана: в случае пролетного строения выполненного со строительным подъемом, величина некомпенсированного уклона составляет: при грузовом режиме $0 < \chi < 0,25 \dots 0,3$ до $\theta = 0,005$; при холостом режиме $0 < \chi < 0,25 \dots 0,3$ до $\theta = 0,01$; при грузовом режиме $0,25 \dots 0,3 < \chi < 0,5$ до $\theta = 0,015$; при холостом режиме $0,25 \dots 0,3 < \chi < 0,5$ до $\theta = 0,08$. В случае применения адаптивной системы компенсации угла уклона подтележесного рельса, величина некомпенсированного угла уклона по всей длине пролетного строения, для грузового и холостого режимов работы крана, имеет незначительную величину, и, как видно из рис.7, существенно меньше 0,002.

Выводы

Эффективность использования адаптивной системы компенсации углов уклона подтележечного рельса, возникающих вследствие упругих деформаций пролетного строения крана, определяется несколькими показателями: снижением величины некомпенсированного уклона, до значений менее 0,002 принятых при расчете согласно [3], что позволяет повысить эффективность привода передвижения грузовой тележки, в том числе, при значительных деформациях пролетного строения крана; возможностью изготовления пролетного строения крана из прокатных балок двутаврового профиля, что повышает технологичность его изготовления и снижает его металлоемкость.

Список литературы

1. Гохберг М. М. Металлические конструкции подъемно транспортных машин. М.: Машиностроение, 1969. 522 с.
 2. Шабашов А. П., Лысяков А. Г. Мостовые краны общего назначения. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.
 3. Справочник по кранам: В2 т.Т 2. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов. Под общ. Ред. М. М. Гохберга.-М.: Машиностроение, 1988.-559 с.: ил.
 4. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно транспортных машин. СПб.: Политехника, 2005 423 с.
 5. Заярный С. Л. Параметрические модели сопротивлений перемещению грузовой тележки мостового крана. Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2024, №1, с.24-36.
 6. Патент №2803209 Российская Федерация: №2022102679: заявл. 03.02.2022: опубл. 11.09.2023/ С.Л. Заярный; 13 с.
 7. Патент №2812012 Российская Федерация: №2022105672: заявл. 02.03.2022: опубл. 04.09.2023/ С.Л. Заярный; 13 с.
 8. Никитин О.Ф. Гидравлика и гидропневмопривод. М.: МГТУ им. Баумана, 2010 г. 414 с.
-

АВТОРЫ

Заярный Сергей Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, texnakon@yandex.ru.

Павлов Иван Дмитриевич, студент кафедры «Подъемно-транспортные системы» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, slepova0330@gmail.com

Machines & Plants Design & Exploiting

Electronic journal
International Public Organization
"Integration strategy"
<http://maplants-journal.ru>

//Machines and Plants:Design and Exploiting.
2024. № 2. pp. 1 – 12.

DOI:

Received: 12.06.2024

Accepted for publication: 04.10.2024

© Interntional Public Organization "Integration
strategy"

The system of compensation of the angle of inclination of the underbody rail track of the bridge crane

Sergey L. Zayarny,
Ivan D. Pavlov*

* slepcova0330@gmail.com

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State
Technical University, Moscow, Russian
Federation

The paper considers ways to compensate for the angle of inclination of the underbody rail track caused by elastic deformations of the superstructure of the bridge crane. A mechanical adaptive system is proposed as an alternative to construction lifting, as a way to compensate for the slope angle. The possibilities of using an adaptive mechanical system are shown, as well as a variant of its design.

Keywords: overhead crane, superstructure, cargo truck, elastic deformations, slope angle, rail track.

References

1. Gokhberg M. M. Metal structures of lifting and transport machines. Moscow: Mashinostroenie, 1969. 522 p.
2. Shabashov A. P., Lysyakov A. G. General purpose overhead cranes. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 304 p.
3. Reference book on cranes: V2 t.T. 2. Characteristics and design schemes of cranes. Crane mechanisms, their parts and assemblies. Technical operation of cranes. Under the general Editorship of M. M. Gokhberg.-M.: Mechanical Engineering, 1988.-559 p.: ill.
4. Sokolov S.A. Metal structures of lifting and transport machines. St. Petersburg: Politehnika, 2005 423 p.
5. Zayarny S. L. Parametric models of resistance to movement of a cargo truck of an overhead crane. Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University, 2024, No. 1, pp.24-36.
6. Patent No.2803209 Russian Federation: No.2022102679: published 03.02.2022: publ. 11.09.2023/ S.L. Zayarny; 13 p.

7. Patent No.2812012 Russian Federation: No.2022105672: published 02.03.2022: published 04.09.2023/ S.L. Zayarny; 13 p.

8. Nikitin O.F. Hydraulics and hydropneumatic drive. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2010 414 p.

AUTHORS

Sergey L. Zayarny, Associate Professor of Technical Sciences, Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, texnakon@yandex.ru

Ivan D. Pavlov, student, Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, slepcova0330@gmail.com.