

УДК (UDC) 621.86/87

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАВНОВЕШИВАЮЩЕГО КАНАТА ДЛЯ ГАШЕНИЯ
КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА, ПЕРЕМЕЩАЕМОГО ГРУЗОПОДЪЕМНЫМ КРАНОМUSE OF BALANCING ROPE FOR DAMPING OF CARGO SWAYS MOVED BY
A LOADING CRANEКорытов М.С., Щербаков В.С., Танский В.В.
Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Tansky V.V.Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск, Россия)
Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russia)

Аннотация. Предложено дополнить грузоподъемный кран с гибким канатным подвесом груза дополнительным боковым уравновешивающим канатом. Последний расположен преимущественно горизонтально. Дополнительный канат прикреплен к стреле, а также крепится блоком к основному грузовому канату в его промежуточной точке между оголовком стрелы и грузозахватным устройством. При этом не требуется дополнение приводного барабана канатной лебедкой с демпфирующим механизмом вращательного типа. На примере крана-трубоукладчика в среде моделирования Matlab разработана имитационная математическая модель, позволяющая исследовать свободные колебания отдельного груза в боковом направлении, с учетом дополнительного уравновешивающего каната. В имитационной модели учитываются не только угловые степени свободы, но и растяжение двух участков грузового каната. Линейные и угловые коэффициенты диссипации энергии каждого из двух участков грузового каната, а также линейный коэффициент диссипации бокового уравновешивающего каната задаются в зависимости от длины соответствующих участков. Использование имитационной модели позволило установить, что в результате использования бокового уравновешивающего каната, соединенного с основным грузовым канатом, коэффициент затухания неуправляемых колебаний груза в боковом направлении существенно увеличивается. При этом средний период колебаний уменьшается, а логарифмический декремент колебаний также увеличивается. Размеры области колебаний груза при этом способе гашения, уменьшаются, что способствует повышению безопасности рабочего процесса.

Ключевые слова: кран-трубоукладчик, уравновешивающий канат, гашение колебаний, коэффициент затухания.

Дата принятия к публикации: 27.02.2019
Дата публикации: 25.03.2019

Сведения об авторах:

Корытов Михаил Сергеевич – д.т.н., доцент, профессор, кафедра «Автомобили, конструкционные материалы и технологии», Федеральное госу-

Abstract. It has been proposed to add a load-lifting crane with a flexible cable suspension of cargo with an additional side balancing cable. The latter is located predominantly horizontally. An additional rope is attached to the boom, and is also fastened by the unit to the main cargo cable at its intermediate point between the boom tip and the load handler. It does not require the addition of a drive drum with a cable winch with a rotary damping mechanism. Using the example of a pipe-laying crane in the Matlab modeling environment, an imitational mathematical model has been developed that allows us to investigate the free sways of a separate load in the lateral direction, taking into account the additional balancing rope. The simulation model takes into account not only the angular degrees of freedom, but also the stretching of two sections of the cargo rope. The linear and angular energy dissipation coefficients of each of the two sections of the cargo rope, as well as the linear dissipation coefficient of the side balancing cable, are set depending on the length of the respective sections. The use of a simulation model made it possible to establish that as a result of the use of a side balancing cable connected to the main cargo cable, the attenuation coefficient of uncontrolled cargo sways in the lateral direction increases significantly. In this case, the average sway period decreases, and the logarithmic decrement of sways also increases. The dimensions of the area of sway of the cargo with this method of clearing, are reduced, which contributes to improving the safety of the workflow.

Keywords: crane-pipelayer, balancing rope, sways damping, attenuation coefficient.

Date of acceptance for publication: 27.02.2019
Date of publication: 25.03.2019

Authors' information:

Mikhail S. Korytov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Automobiles, Construction Materials and Technologies,

дарственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», *e-mail: kms142@mail.ru.*

ORCID: 0000-0002-5104-7568

Щербakov Виталий Сергеевич – д.т.н., профессор, профессор, кафедра «Автоматизация производственных процессов и электротехника, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», *e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org.*

ORCID: 0000-0002-3084-2271

Танский Вячеслав Владимирович – к.т.н., ст. преподаватель, кафедра «Автомобили, конструкционные материалы и технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», *e-mail: slava8968@gmail.com.*

† Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI)», *e-mail: kms142@mail.ru.*

† *ORCID: 0000-0002-5104-7568*

† **Vitaliy S. Shcherbakov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI)», *e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org.*

† *ORCID: 0000-0002-3084-2271*

† **Vyacheslav V. Tansky** – Ph.D., Art. Lecturer, Department of Automobiles, Construction Materials and Technologies, Federal State-Impact Budget Educational Institution of Higher Education «Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI)», *e-mail: slava8968@gmail.com.*

1. Введение

Задача высокопроизводительного и безопасного перемещения грузов грузоподъемными кранами при выполнении подъемно-транспортных, строительных и монтажных работ, является актуальной [1-3]. Одним из ее важных аспектов является подавление неуравновешенных колебаний груза большой амплитуды, которые возникают при перемещении краном груза на нежестком канатном подвесе [4-6]. Решению данной проблемы посвящено множество работ российских авторов [1, 7, 8] и зарубежных исследователей [9-11]. Данная проблема актуальна для всех видов грузоподъемных кранов с нежестким канатным подвесом: мостовых [12-14], козловых [15], поворотных с телескопической стрелой [16, 17], контейнерных [18], судовых [19], башенных [20, 21] и кранов-трубоукладчиков [22, 23].

Краны-трубоукладчики, которые относятся к специальным видам тракторных кранов, широко применяются как в составе трубоукладочной колонны для укладки трубопроводов, так и для перемещения штучных грузов [22].

В последнем случае зачастую возникают неуравновешенные колебания отдельных штучных грузов, которые имеют большую амплитуду.

Неуправляемые колебания штучных грузов, перемещаемых кранами-трубоукладчиками, в целом отрицательно влияют на рабочий процесс. Возрастает время ожидания затухания колебаний, снижается производительность. При этом удары груза о стрелу могут приводить к повреждениям как стрелы, так и самого груза.

Для гашения неуравновешенных колебаний груза предложено использовать дополнительную канатную лебедку, уравновешивающий канат которой проходит через направляющие блоки, установленные на стреле, и крепится к грузозахватному устройству [23].

Известное конструктивное решение [23] имеет недостаток. Требуется дополнение приводного барабана канатной лебедкой с демпфирующим механизмом вращательного типа [23].

2. Описание предлагаемой конструкции крана с уравновешивающим канатом

Для упрощения известной конструкции предлагается следующее решение. Точку крепления уравновешивающего каната постоянной длины необходимо привязать не к грузозахватному устройству, а к основному грузовому канату крана. Эта точка может быть смещена вверх относительно грузозахватного устройства (рис. 1, а).

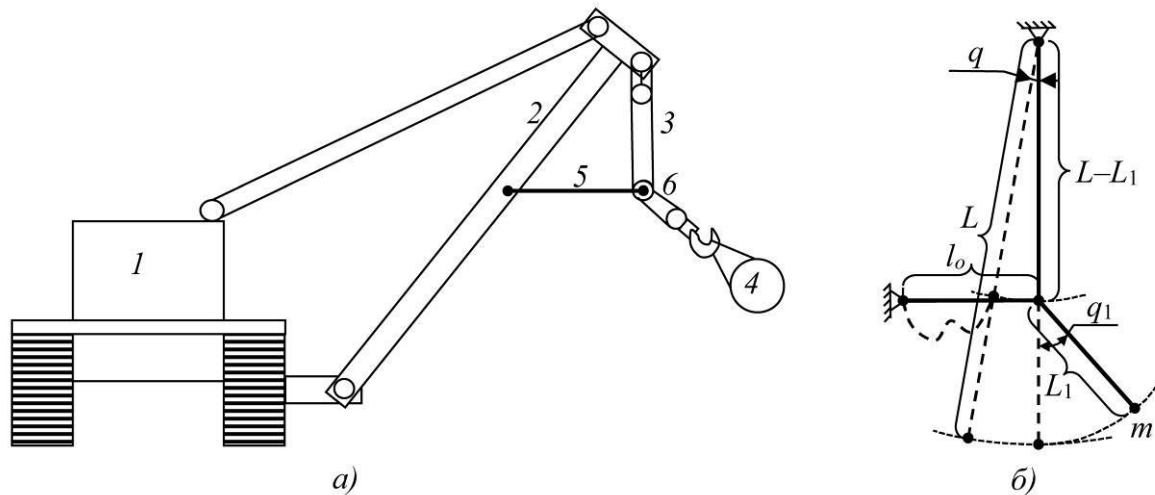


Рис. 1. Предлагаемая конструкция крана-трубоукладчика с боковым уравнивающим канатом (а) и соответствующая ей расчетная схема (б)

Решение позволит обойтись без необходимости использования не только демпфирующего механизма приводного барабана дополнительной канатной лебедки, но и самого барабана.

На рис. 1, а показан общий вид крана-трубоукладчика. Обозначены позиции: 1 – базовое шасси крана-трубоукладчика; 2 – стрела; 3 – основной грузовой канат; 4 – груз массой m ; 5 – уравнивающий канат; 6 – блок крепления уравнивающего каната к основному грузовому канату.

Вместо дополнительной канатной лебедки с барабаном, оснащенной в известной конструкции [23] демпфирующим устройством, предлагаемая конструкция оснащается только уравнивающим канатом, который соединен с блоком 6. Соответствующая общему виду расчетная схема предлагаемой конструкции приведена на рис. 1, б.

На расчетной схеме обозначены основные параметры системы: m – масса штучного груза, кг; q – угол отклонения основного грузового каната 3 от гравитационной вертикали, измеренный в верхней точке подвеса грузового каната на стреле, рад; q_1 – угол отклонения участка основного грузового каната ниже точки б (блока крепления уравнивающего каната к основному грузовому канату), от участка основного грузового каната выше указанной точки, рад; L – полная длина основного грузового каната от стрелы до грузозахватного устройства, м; L_1 – длина

основного грузового каната от точки блока крепления уравнивающего каната к основному грузовому канату б, до грузозахватного устройства, м; l_0 – длина уравнивающего каната, м.

3. Имитационная модель конструкции с уравнивающим канатом

Для установления принципиальной возможности гашения колебаний груза при помощи предлагаемой конструкции была разработана имитационная математическая модель. В ней принято математическое описание, при котором физические свойства каждого из двух участков грузового каната крана описаны при помощи двух степеней свободы – вращательной и поступательной. Поступательная степень свободы каждого участка грузового каната позволяет моделировать вертикальные колебания груза, и учитывать происходящие при этом потери энергии. Математическая имитационная модель описывает колебания груза при неподвижной точке закрепления грузового каната на стреле.

По двум угловым координатам каждого из участков грузового каната заданы коэффициенты диссипации энергии, вычисляемые по зависимостям (для координат q и q_1 соответственно):

$$b = b_u \cdot L; \quad b_1 = b_u \cdot L_1, \quad (1)$$

где b_u – угловой коэффициент вязкого трения, отнесенный к 1 м длины основного грузового каната, Н·м/(рад/с).

При натяжении уравнивающего каната (в рассматриваемом примере натяжение присутствует при выполнении условия $q < 0$) в точке блока крепления уравнивающего каната к основному грузовому канату b прикладывается горизонтально направленная сила, вычисляемая по зависимости

$$F_o = y \frac{c_p}{l_o} + \dot{y} \cdot b_p \cdot l_o, \quad (2)$$

где y – горизонтальная координата груза, м; c_p – коэффициент упругости уравнивающего каната, отнесенный к 1 м длины уравнивающего каната, Н/м; b_p – коэффициент вязкого трения уравнивающего каната, отнесенный к 1 м длины уравнивающего каната, Н/(м/с). Точками здесь и далее обозначены производные координат по времени.

В случае отсутствия натяжения уравнивающего каната, сила F_o (2) принимала нулевые значения.

Выражения, аналогичные (2), использовались для вычисления сил, действующих вдоль основного грузового каната. На участке от стрелы до точки блока b :

$$F = \Delta(L - L_1) \cdot \frac{c_p}{L} + \dot{L} \cdot b_p \cdot L. \quad (3)$$

На участке от точки блока b до грузозахватного устройства:

$$F_1 = \Delta L_1 \cdot \frac{c_p}{L_1} + \dot{L}_1 \cdot b_p \cdot L_1. \quad (4)$$

На основе расчетной схемы (рис. 1, б) в программном комплексе MATLAB/Simulink/Simscape Multibody была разработана имитационная модель колебаний груза в отдельной вертикальной плоскости пространства (рис. 2).

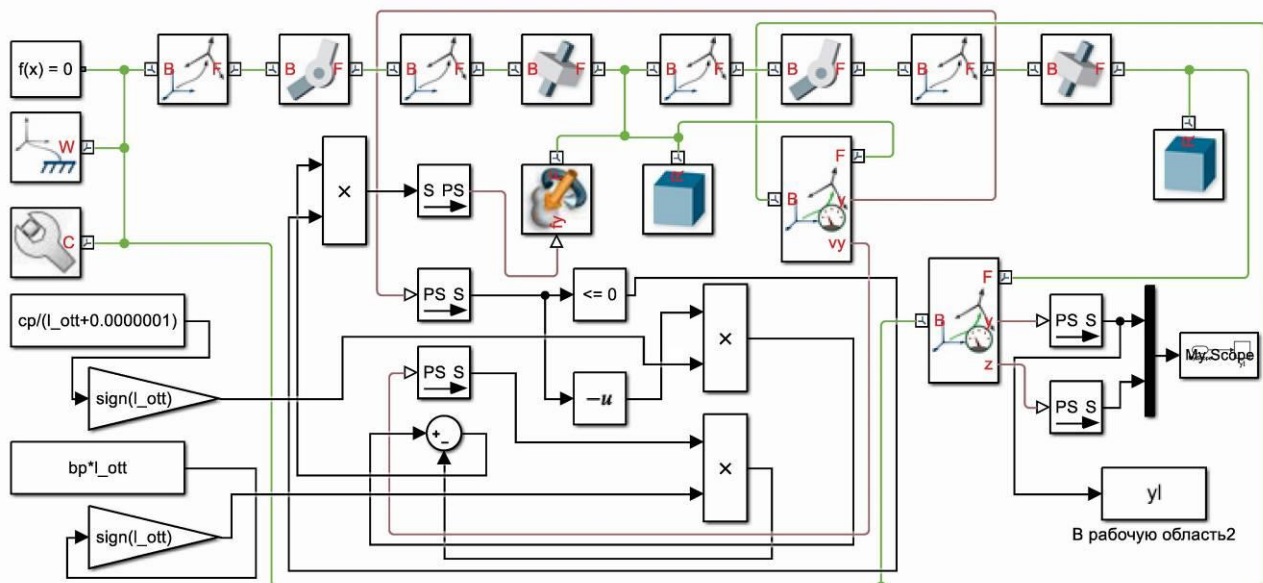


Рис. 2. Имитационная модель колебаний груза с уравнивающим канатом в системе MATLAB/Simulink/Simscape Multibody

В имитационной модели использованы два шарнира Simscape Multibody – *Revolute Joint* с одной вращательной степенью свободы каждый, моделирующие повороты двух участков основного грузового каната вокруг оголовка стрелы крана и блока крепления уравнивающего каната к основному грузовому канату b соответственно. Также

использованы два шарнира *Prismatic Joint* с одной поступательной степенью свободы каждый, моделирующие растяжения двух участков основного грузового каната. Во всех шарнирах задействованы внутренние механизмы пакета Simscape Multibody (*Internal Mechanics*). В этих механизмах по

угловым координатам заданы коэффициенты демпфирования b и b_1 соответственно (1).

Из двух блоков твердых тел *Solid* модели, один блок (справа) задает массу груза m . Второй блок *Solid* задает малую массу m_6 блока крепления уравнивающего каната к основному грузовому канату b .

В имитационной модели использован блок *External Force and Torque*. С его помощью сила со стороны уравнивающего каната прикладывалась к блоку b основного грузового каната.

Также использовался ряд блоков Simscape Multibody, выполняющих вспомогательные функции: сдвигов и поворотов *Rigid Transform*, виртуальных датчиков *Transform Sensor* для измерения текущих значений линейных и угловых координат. *World Frame*, *Mechanism Configuration* и *Solver Configuration* – обязательных для использования в каждой модели Simscape Multibody блоков, задающих неподвижную систему координат и настройки модели. Кроме того, в качестве вспомогательных использовались блоки Simulink: задания постоянных значений *Constant*, умножения на коэффициент *Gain*, сравнения с нулем *Compare To Zero*, умножения *Product*, суммирования *Sum* и др.

В качестве начальных условий моделирования, кроме постоянных параметров, использовался начальный угол отклонения грузового каната от гравитационной вертикали $q(t=0)$ (в положительном направлении, соответствующем отсутствию натяжения уравнивающего каната).

4. Пример моделирования свободных затухающих колебаний груза

На рис. 3 в качестве примера приведены временные зависимости горизонтальной координаты груза y при свободных затухающих колебаниях груза без гашения колебаний груза при помощи уравнивающего каната (рис. 3, а), и с гашением колебаний (рис. 3, б).

Значения постоянных параметров системы при моделировании составляли: $L=10$ м; $L_1=2$ м; $g=9,81$ м/с²; $m=1000$ кг; $b_p=10000$

Н/(м/с); $c_p=10000000$ Н/м; $b_u=1000$ Н·м/(рад/с).

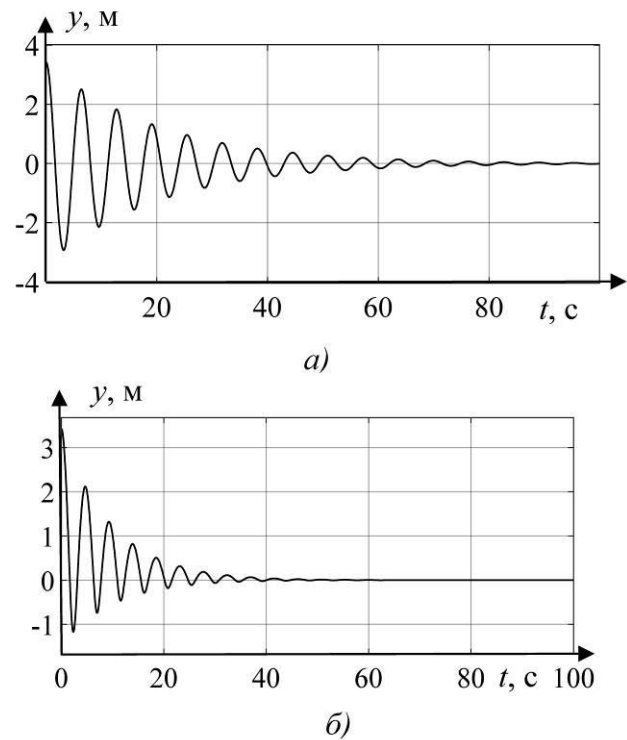


Рис. 3. Временные зависимости горизонтальной координаты груза y при свободных затухающих колебаниях груза: а – без гашения колебаний груза (без использования уравнивающего каната); б – с гашением колебаний (пример)

Начальный угол отклонения грузового каната от гравитационной вертикали $q(t=0)$ принимал значение 20 градусов.

Результаты на рис. 3, а получены для системы без использования бокового уравнивающего каната (базовая конструкция крана-трубоукладчика), а на рис. 3, б – с использованием бокового уравнивающего каната (предлагаемая конструкция). Длина уравнивающего каната в последнем случае составляла $l_0=5$ м.

В таблице приведены значения параметров, характеризующих процесс затухающих колебаний для двух рассматриваемых конструкций: базовой и предлагаемой. Это средний период колебаний \bar{T} , средний логарифмический декремент затухания колебаний $\bar{\lambda}$ и средний коэффициент затухания колебаний $\bar{\beta}$.

Таблица

Значения среднего периода колебаний \bar{T} , среднего логарифмического декремента колебаний $\bar{\lambda}$, среднего коэффициента затухания $\bar{\beta}$ (пример моделирования)

Параметр	\bar{T} , с	$\bar{\lambda}$	$\bar{\beta}$
Базовая конструкция	6.353	0.335	0.053
Модернизированная конструкция	4.619	0.552	0.119

5. Заключение

Результаты имитационного моделирования показали, что в случае применения бокового уравнивающего каната, в рассматриваемом примере средний период колебаний уменьшился на 27 %, средний логарифмический декремент затухания колебаний возрос на 65 %, и средний коэффициент затухания колебаний возрос на 125 %.

Фактически это означает, что скорость затухания свободных колебаний груза при применении бокового уравнивающего каната увеличивается в рассматриваемом примере более чем в 2 раза. То есть, применение предложенной конструкции может быть достаточно перспективным в плане га-

шения свободных колебаний штучных грузов, перемещаемых грузоподъемными кранами с нежестким канатным подвесом груза.

Кроме того, использование бокового уравнивающего каната существенно ограничивает при колебаниях смещение груза в сторону, противоположную боковому уравнивающему канату (вправо на рис. 1). Что также может считаться дополнительным преимуществом предлагаемого конструктивного решения, поскольку уменьшает размеры области колебаний груза. Это повышает безопасность рабочего процесса крана и уменьшает вероятность столкновения груза с рабочим оборудованием и другими объектами в рабочей зоне.

Список литературы

1. Сериков С.А. Способ успокоения колебаний груза, транспортируемого мостовым краном // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2006. № 9. С. 4-8.
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.
3. Wu Z., Xia X., Zhu B. Model predictive control for improving operational efficiency of overhead cranes. *Nonlinear Dynamics*, 2015, Vol. 79, No. 4, Pp. 2639-2657.
4. Sun N., Fang Y., Chen H. Adaptive anti-swing control for cranes in the presence of rail length constraints and uncertainties. *Nonlinear Dynamics*, 2015, Vol. 81, No. 1-2. Pp. 41-51.

References

1. Serikov S.A. A way to calm the oscillations of the cargo transported by a bridge crane. *Pribory i sistemy. Upravlenie, control, monitoring*, 2006, No. 9, pp. 4-8. (In Russian).
2. Tolochko O.I., Bazhutin D.V. Comparative analysis of methods for damping oscillations of a load suspended from the mechanism of translational motion of a bridge crane. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie*. 2010. No. 75. pp. 22-28. (In Russian).
3. Wu Z., Xia X., Zhu B. Model predictive control for improving operational efficiency of overhead cranes. *Nonlinear Dynamics*, 2015, Vol. 79, No. 4, Pp. 2639-2657.
4. Sun N., Fang Y., Chen H. Adaptive anti-swing control for cranes in the presence of rail length constraints and uncertainties. *Nonlinear Dynamics*, 2015, Vol. 81, No. 1-2. Pp. 41-51.
5. Korytov M., Shcherbakov V., Titenko V. Analytical solution of the problem of acceleration of cargo by a bridge crane with constant

5. Korytov M., Shcherbakov V., Titenko V. Analytical solution of the problem of acceleration of cargo by a bridge crane with constant acceleration at elimination of swings of a cargo rope. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 944, No. 1, Pp. 012062.
6. Zhang Z., Wu Y., Huang J. Differential-flatness-based finite-time anti-swing control of underactuated crane systems. *Nonlinear Dynamics*, 2017, Vol. 87, No. 3, pp. 1749-1761.
7. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. 383 с.
8. Korytov M.S., Shcherbakov V.S. Cargo transportation by bridge cranes along a predetermined trajectory without uncontrollable sways. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2018, Vol. 12, No. 2, Pp. 72-79.
9. Xiaou Li, Wen Yu Anti-Swing Control For An Overhead Crane With Fuzzy Compensation. *Intelligent Automation*, 2012, Vol. 18, No. 1, Pp. 1-11.
10. Omar F., Karray F., Basir O., Yu L. Autonomous overhead crane system using a fuzzy logic controller. *Journal of vibration and control*, 2004, Vol. 10, Issue 9, Pp. 22-28.
11. Akira I., Yoshiyuki N. Fast trajectory planning by design of initial trajectory in overhead traveling crane with considering obstacle avoidance and load vibration suppression. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 744, No. 1, Pp. 012070.
12. Caporali R.P.L. Iterative method for controlling with a command profile the sway of a payload for gantry and overhead traveling cranes. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2018, No. 14 (3), Pp. 1095-1112.
13. Matsunaga M., Nakamoto M., Yamamoto T. A sound-based measurement of sway angle for anti-sway control of overhead crane. *Journal of robotics networking and artificial life*, 2018, Vol. 4, No. 4, Pp. 322-325.
14. Enin S.S., Omelchenko E.Y., Fomin, N.V., Belyi A.V. Overhead Crane Computer Model. *11th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 327, UNSP 022028. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022028
15. Hamdy M., Shalaby R., Sallam M. A acceleration at elimination of swings of a cargo rope. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 944, No. 1, Pp. 012062.
6. Zhang Z., Wu Y., Huang J. Differential-flatness-based finite-time anti-swing control of underactuated crane systems. *Nonlinear Dynamics*, 2017, Vol. 87, No. 3, Pp. 1749-1761.
7. Chernousko F.L., Akulenko L.D., Sokolov B.N. Oscillation control. Moscow, Nauka, 1980. 383 p. (In Russian).
8. Korytov M.S., Shcherbakov V.S. Cargo transportation by bridge cranes along a predetermined trajectory without uncontrollable sways. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2018, Vol. 12, No. 2, Pp. 72-79.
9. Xiaou Li, Wen Yu Anti-Swing Control For An Overhead Crane With Fuzzy Compensation. *Intelligent Automation*, 2012, Vol. 18, No. 1, Pp. 1-11.
10. Omar F., Karray F., Basir O., Yu L. Autonomous overhead crane system using a fuzzy logic controller. *Journal of vibration and control*, 2004, Vol. 10, Issue 9, Pp. 22-28.
11. Akira I., Yoshiyuki N. Fast trajectory planning by design of initial trajectory in overhead traveling crane with considering obstacle avoidance and load vibration suppression. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 744, No. 1, Pp. 012070.
12. Caporali R.P.L. Iterative method for controlling with a command profile the sway of a payload for gantry and overhead traveling cranes. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2018, No. 14 (3), Pp. 1095-1112.
13. Matsunaga M., Nakamoto M., Yamamoto T. A sound-based measurement of sway angle for anti-sway control of overhead crane. *Journal of robotics networking and artificial life*, 2018, Vol. 4, No. 4, Pp. 322-325.
14. Enin S.S., Omelchenko E.Y., Fomin, N.V., Belyi A.V. Overhead Crane Computer Model. *11th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 327, UNSP 022028. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022028
15. Hamdy M., Shalaby R., Sallam M. A

Control Systems (MEACS): IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, 2018, Vol. 327, UNSP 022028. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022028

15. Hamdy M., Shalaby R., Sallam M. A hybrid partial feedback linearization and deadbeat control scheme for a nonlinear gantry crane. *Journal of the Franklin institute-engineering and applied mathematics*, 2018, Vol. 355, No. 14, Pp. 6286-6299.

16. AbdelHamid, A.Y., Abdelkader, H.A., Mabrouk, M.H. Load tracking and anti-sway control for telescopic rotary crane. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2017, Vol. 4B, UNSP V04BT05A013. DOI: 10.1115/IMECE2017-71940

17. Alhassan A., Mohamed Z., Abdullahi A.M., Bature A.A., Haruna A., Tahir N.M. Input shaping techniques for sway control of a rotary crane system. *Jurnal Teknologi*, 2018, Vol. 80, No. 1, Pp. 61-69. DOI: 10.11113/jt.v80.10297

18. Sun Y.-G., Qiang H.-Y., Xu J., Dong D.-S. The nonlinear dynamics and anti-sway tracking control for offshore container crane on a mobile harbor. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 2017, Vol. 25, No. 6, Pp. 656-665. DOI: 10.6119/JMST-017-1226-05

19. Li X., Mei Z., Zhu D., Xie B. Modeling and anti-sway control of ship-mounted crane. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, Vol. 9, No. 9, Pp. 1687814017727252. DOI: 10.1177/1687814017727252

20. Samin R.E., Mohamed Z. Comparative Assessment of Anti-Sway Control Strategy for Tower Crane System. *AIP Conference Proceedings*, 2017, Vol. 1883, UNSP 020035. DOI: 10.1063/1.5002053

21. Dong M., Pang B., Wang, J. Analysis of Cargo Sway Characteristics of Tower Cranes. *AER-Advances in Engineering Research*, 2015, Vol. 49, Pp. 330-333.

22. Щербakov В.С., Кoryтов М.С., Шабалин А.Н. Направления развития теории безопасности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин трубоукладочной колонны // Известия

hybrid partial feedback linearization and deadbeat control scheme for a nonlinear gantry crane. *Journal of the Franklin institute-engineering and applied mathematics*, 2018, Vol. 355, No. 14, Pp. 6286-6299.

16. AbdelHamid, A.Y., Abdelkader, H.A., Mabrouk, M.H. Load tracking and anti-sway control for telescopic rotary crane. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2017, Vol. 4B, UNSP V04BT05A013. DOI: 10.1115/IMECE2017-71940

17. Alhassan A., Mohamed Z., Abdullahi A.M., Bature A.A., Haruna A., Tahir N.M. Input shaping techniques for sway control of a rotary crane system. *Jurnal Teknologi*, 2018, Vol. 80, No. 1, Pp. 61-69. DOI: 10.11113/jt.v80.10297

18. Sun Y.-G., Qiang H.-Y., Xu J., Dong D.-S. The nonlinear dynamics and anti-sway tracking control for offshore container crane on a mobile harbor. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 2017, Vol. 25, No. 6, Pp. 656-665. DOI: 10.6119/JMST-017-1226-05

19. Li X., Mei Z., Zhu D., Xie B. Modeling and anti-sway control of ship-mounted crane. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, Vol. 9, No. 9, Pp. 1687814017727252. DOI: 10.1177/1687814017727252

20. Samin R.E., Mohamed Z. Comparative Assessment of Anti-Sway Control Strategy for Tower Crane System. *AIP Conference Proceedings*, 2017, Vol. 1883, UNSP 020035. DOI: 10.1063/1.5002053

21. Dong M., Pang B., Wang, J. Analysis of Cargo Sway Characteristics of Tower Cranes. *AER-Advances in Engineering Research*, 2015, Vol. 49, Pp. 330-333.

22. Scherbakov V.S., Korytov M.S., Shabalin A.N. Directions of development of the theory of safety of the working process of a set of load-lifting machines of the pipe-laying column. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Mayematika, fizika i mekhanika*, 2014, Vol. 325, No. 2, Pp. 50-57. (In Russian).

23. Pat. 158094 Russian Federation, IPC B66C23/26. Crane-pipelayer. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Tansky V.V.; Applicant and patentee of the Federal State Budgetary

Томского политехнического университета. *†*
Математика, физика и механика. 2014. Т. *†*
325, No. 2. С. 50-57. *†*

23. Пат. 158094 Российская Федерация, *†*
МПК В66С23/26. Кран-трубоукладчик / *†*
Щербаков В.С., Корытов М.С., Танский *†*
В.В.; заявитель и патентообладатель *†*
Федеральное государственное бюджетное *†*
образовательное учреждение высшего *†*
образования "Сибирская государственная *†*
автомобильно-дорожная академия *†*
(СибАДИ)" (RU); No. 2015120191/11; заявл. *†*
27.05.15; опубл. 20.12.15. Бюл. No. 35. 2 с. *†*

Educational Institution of Higher Education *†*
"Siberian State Automobile and Highway *†*
Academy (SibADI)" (RU); No. *†*
2015120191/11; declare 05.27.15; publ. *†*
12.20.15. Bul. No. 35. 2 p. (In Russian). *†*