МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА, ПЕРЕМЕЩАЕМОГО ГРУЗОПОДЪЕМНЫМ КРАНОМ

М.С. Корытов¹, В.С. Щербаков¹, В.Е. Беляков²

¹ФГБОУ ВО «СибАДИ»,

г. Омск, Россия,

²Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии

А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации,

г. Омск, Россия

**kms142@mail.ru*

АННОТАЦИЯ

Введение. Уменьшение колебаний груза, перемещаемого грузоподъемными кранами с гибким канатным подвесом груза, является актуальной задачей, поскольку позволяет существенно уменьшить время, затрачиваемое на выполнение рабочей операции перемещения груза. Перспективным направлением уменьшения колебаний груза, позволяющим обойтись без усложнения конструкции грузоподъемного крана, является оптимизация траектории перемещения верхней точки подвеса груза.

Материалы и методы. В статье рассматривается способ имитационного математического моделирования плоских колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном с горизонтально перемещающейся точкой подвеса, при помощи программных средств системы MATLAB. Для моделирования использована функция системы MATLAB ode45, предназначенная для численного решения систем нестационарных дифференциальных уравнений произвольного порядка. Приводится дифференциальное уравнение второго порядка, используемое для описания колебаний перемещаемого груза, и его реализация в виде программного кода. Даются элементы программного кода для анализа и визуализации результатов моделирования.

Результаты. В качестве примера в статье приведен ряд графиков изменения с течением времени угла наклона грузового каната, ускорения точки подвеса, значения целевой функции при синусоидальном характере ускорения точки подвеса. Целевая функция представляет собой сумму абсолютных значений угла отклонения каната и его первой производной в конечный момент времени движения точки подвеса с ускорением.

Обсуждение и заключение. Показано, что при симметричном характере разгона и торможения точки подвеса система с диссипацией энергии не достигает нулевого значения целевой функции. Необходимо придать асимметричность периодам разгона и торможения точки подвеса, для того чтобы полностью погасить остаточные колебания груза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: груз, колебания, маятник, канат, грузоподъемный кран, гашение колебаний, точка подвеса.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы статьи выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение анонимному рецензенту, работавшему с данной статьей.

© М.С. Корытов, В.С. Щербаков, В.Е. Беляков

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

FLUCTUATIONS OF THE CARGO TRANSPORTED BY LIFTING CRANE: SIMULATION AND ANALYSIS

M.S. Korytov¹, V.S. Shcherbakov¹, V.E. Belyakov²

¹*Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia*

²*Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Krulev,
Omsk, Russia*

**kms142@mail.ru*

ABSTRACT

Introduction. Reducing fluctuations in the load transported by hoisting cranes with a flexible rope suspension of the load is an urgent task since it can significantly reduce the time taken to complete the operation of moving the load. A promising direction for reducing load fluctuations is to optimize the trajectory of movement of the load suspension upper point.

Materials and methods. The paper discussed the method of mathematical simulation of plane vibrations of a load moved by a crane with a horizontally moving suspension point, using the software of the MATLAB system. For modeling, the authors used the function of the MATLAB ode45 system, intended for the numerical solution of systems of non-stationary differential equations of arbitrary order. The second-order differential equation used to describe the fluctuations of the transported load and its implementation in the form of program code was presented. Moreover, the authors demonstrated the elements of program code for the analysis and visualization of simulation results.

Results. The authors obtained and presented the series of graphs in the inclination angle's changing of the cargo rope, the acceleration of the suspension point and the value of the objective function with the sinusoidal nature of the acceleration. The objective function was the sum of the absolute values of the deflection angle of the rope and the first derivative at the final moment of the suspension point's movement with acceleration.

Discussion and conclusions. As a result, the paper shows that the system with energy dissipation does not reach the zero value of the objective function even by a symmetrical nature of acceleration and deceleration of the suspension point. Therefore, it is necessary to give asymmetry to the acceleration and deceleration periods of the suspension point in order to completely absorb the residual fluctuations of the load.

KEYWORDS: load, vibrations, pendulum, rope, crane, damping, suspension point.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the reviewers for the opinions and suggestions.

© M.S. Korytov, V.S. Shcherbakov, V.E. Belyakov

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные краны (ГК) – основное средство механизации погрузочно-разгрузочных работ в строительстве [1], в черной и цветной металлургии [2], в портах и логистических центрах [3], на железнодорожном транспорте. Их основной задачей является захват груза с помощью грузозахватного устройства, его подъем, перемещение на заданное расстояние и опускание в целевую точку [4].

Как механическая динамическая система, состоящая из отдельных звеньев, ГК может быть описан с помощью дифференциальных уравнений (ДУ) [5]. Одна из основных и до конца не решенных в настоящее время проблем, связанных с использованием ГК с нежестким подвесом груза, – неуправляемые колебания последнего в горизонтальном и вертикальном направлениях [6, 7]. Горизонтальные колебания груза на порядок превышают вертикальные и возникают при любом перемещении верхней точки подвеса груза в горизонтальной плоскости [8].

Улучшить работу, эффективность и безопасность ГК возможно при активном подавлении горизонтальных колебаний груза вместе с грузозахватным приспособлением [9]. Это позволяет существенно сократить время рабочего цикла ГК [10].

Нелинейность и сложная динамика усложняют перемещение грузозахватного приспособления с грузом в определенную точку пространства, поэтому хорошо продуманный подавляющий колебания процесс управления ГК позволяет выйти на режим и поддерживать в нем малый диапазон раскачивания груза либо полностью подавить неуправляемые колебания. Таким способом будет повышена эффективность работы ГК при одновременном снижении энергопотребления в приводах [11].

В реальной работе грузозахватное приспособление ГК имеет большой ход, поэтому процесс управления в основном включает три этапа: этап ускорения и устранения раскачиваний груза, этап равномерного движения и этап замедления и устранения раскачиваний груза. Среди них стадия ускорения и устранения раскачиваний груза является наиболее сложной частью управления грузозахватным приспособлением ГК. Существует ряд распространенных методов контроля положения грузозахватного приспособления и груза ГК [12], основные из них заключаются в рациональном планировании траектории движения, чтобы перемещения рабочего оборудования ГК могли подавлять раскачивание груза [13]. Разноо-

бразны и методы измерения величин, необходимых для работы системы управления. Так, в статье [14] для измерения угла наклона грузового каната с грузом в процессе управления предлагается использовать звуковые сигналы.

Проблема возникновения неуправляемых колебаний характерна для всех видов ГК с канатным подвесом груза, в том числе для мостовых ГК [15] и для башенных ГК [16]. Для ее решения, помимо традиционных подходов, таких как использование ПИД-регуляторов [17], применяются самые разные подходы, в частности и достаточно нестандартные: нечеткие системы управления [18], эволюционные алгоритмы [19] и т.д.

Большинство методов контроля положения грузозахватного приспособления и груза ГК для проверки их работоспособности и эффективности могут использовать различные математические модели объекта, включая имитационные [20]. Однако при всех своих преимуществах имитационные математические модели сравнительно сложны и ресурсоемки.

В настоящей работе представлена менее ресурсоемкая математическая модель, основанная на непосредственном решении системы ДУ, описывающих динамику больших угловых колебаний груза ГК в отдельной плоскости. Пространственные колебания груза при углах отклонения каната от гравитационной вертикали менее 5° могут быть с достаточной точностью описаны как суперпозиция плоских колебаний [7, 20].

Для разработки данной математической модели необходимо выбрать вид ДУ, описывающего исследуемые движения динамической системы ГК с достаточной степенью детализации, представить данное ДУ в форме Коши, допускающее его решение численными методами, составить программный код для решения и произвести его отладку. Для подтверждения работоспособности математической модели необходимо представить примеры результатов ее использования.

Важность проведенного исследования обусловлена тем, что математические модели, в том числе представленная в данной статье, могут быть использованы для описания поведения объекта, т.е. ГК, при любом из описанных выше подходов к решению задачи подавления неуправляемых колебаний груза.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрена маятниковая колебательная система в виде груза массой m , подвешенного на нерастяжимой нити постоянной длины L .

Верхняя точка подвеса маятника подвижна, ее ускорение в горизонтальном направлении вдоль оси x обозначено $\ddot{x}$. Учтена диссипация энергии угловых колебаний, описанная приведенным к угловой координате маятника q коэффициентом диссипации энергии B , Н·м·с/рад.

Для случая больших углов отклонений грузового каната от гравитационной вертикали ДУ второго порядка, описывающего динамику системы, имеет вид [7, 20]:

$$\ddot{q} + \frac{2b}{m}\dot{q} + \frac{g}{L}\sin(q) + \frac{\ddot{x}}{L}\cos(q) = 0 \quad (1)$$

Здесь и далее точками над символами обозначены производные параметров по времени. Система ДУ (1) с достаточной степенью детализации показывает колебания груза, перемещаемого ГК, в отдельной плоскости пространства [7, 20]. При принятии допущения о постоянстве длины грузового каната при горизонтальных перемещениях груза рассматривался основной, занимающий наибольшее время этап перемещения груза после его подъема. Использование ДУ (1) предполагает допущение о том, что влияние массы груза на ускорение точки подвеса пренебрежимо мало (система ГК мало нагружена).

Для решения ДУ (1) численными методами необходимо представить его в форме Коши [5]. Введем новую переменную ω для производной угла первого порядка, тогда ДУ (1) примет вид системы из двух ДУ первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{q} = \omega; \\ \dot{\omega} = -\frac{2b}{m}\omega - \frac{g}{L}\sin(q) - \frac{\ddot{x}}{L}\cos(q). \end{cases} \quad (2)$$

Для численного решения системы ДУ (2) использовалась функции `ode45` языка программирования системы MATLAB. Формат вызова процедуры решателя при помощи данной функции в системе MATLAB имел вид

$$[T,Y]=ode45(\text{fun},[0,T_{\text{kon}}],[0 \ 0]),$$

где $[0,T_{\text{kon}}]$ – вектор из двух значений начального и конечного времени моделирования; $[0 \ 0]$ – вектор из двух нулевых начальных значений переменных ω и q в начальный (нулевой) момент времени; `fun` – название (в данном случае т.н. «маска») функции, где вычисляются правые части системы ДУ (2); T – вектор значений времени для массива решений Y (значений переменных ω и q в данном случае).

Файл-функция с названием `func1`, описывающая правые части системы ДУ в форме Коши, имела вид

```
function dy = func1(t,y,B,L,A,k) % Название
dy = zeros(2,1);
g=9.81; % Ускорение свободного падения
dy(1)=-B*y(1)-g*sin(y(2)/L-A*sin(k*t)*cos(y(2)/L);
% Правые части системы ДУ
dy(2) = y(1);
end
```

В ней в качестве примера, демонстрирующего работоспособность математической модели, воздействие со стороны привода ГК, т.е. ускорение подвеса в горизонтальном направлении вдоль оси x задавалось в виде синусоиды

$$\ddot{x} = A \cdot \sin(k \cdot t), \quad (3)$$

где A – амплитуда ускорения точки подвеса; k – коэффициент задания периода колебаний ускорения точки подвеса.

В данной функции, помимо времени t и вектора y из двух переменных ДУ ω и q , в качестве входных параметров выступает коэффициент диссипации энергии B , длина грузового каната L , амплитуда ускорения точки подвеса A и коэффициент задания периода колебаний ускорения точки подвеса k .

Функция `func1` вычисления правых частей системы ДУ имеет 6 входных параметров, из которых один векторный, остальные скалярные, в то время как функция численного решения системы ДУ языка программирования MATLAB предусматривает только два входных параметра вызываемой функции вычисления правых частей системы ДУ: время и вектор переменных систем ДУ. Напрямую использовать функцию `func1` в строке вызова решателя `ode45` невозможно.

Для обхода этого ограничения был использован аппарат анонимных функций.

В строке основной программы, предшествующей вызову решателя `ode45`, описывалась анонимная функция `fun` аргументов t и y , которая «маскирует» функцию 6 аргументов `func1`, приведенную выше:

$$\text{fun} = @(t,y) \text{func1}(t,y,B,L,A,k).$$

При вызове в строке с `ode45` функции `fun` требования решателя `ode45` выполняются.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования влияния времени движения системы точки подвеса с грузом с ускорением коэффициент задания периода колебаний ускорения точки подвеса k варьировался от 0.1 до 0.2 с шагом 0.0001 в цикле:

```
for k = 0.1:0.0001:0.2
    Tkon = (2*pi)/k;
    .....
end
```

Конечное время моделирования задавалось по зависимости

$$T_{kon} = \frac{2\pi}{k},$$

которая при использовании синусоиды (3) в качестве функции ускорения подвеса обеспечивает нулевое значение ускорения (выход на установившийся режим движения либо полную остановку) грузовой тележки ГК в конечный момент рассматриваемого процесса.

Прочие параметры модели принимали значения: $b = 0.5$; $m = 100$; $L = 10$; $A = 0.1$.

Минимизируемая функция F вычислялась по зависимости

$$F = |q(T_{kon})| + |\dot{q}(T_{kon})|. \quad (4)$$

Соответствующие строки программного кода для вычисления функции (4) имели вид

```
Nkon = length(Y(:,1));
```

$$CF(i) = \text{abs}(Y(\text{nkon},1)) + \text{abs}(Y(\text{nkon},2)).$$

На рисунке 1 а, в приведены временные зависимости угла q наклона грузового каната ГК и его первой производной (а) и функции F (в) при $k = 0.1$. На рисунке 1, б, г приведены аналогичные зависимости при оптимальном значении $k = 0.1419$.

Было установлено, что даже при оптимальном значении $k = 0.1419$ симметричная форма функции (3) ускорения точки подвеса груза на ГК не позволяет полностью устранить остаточные колебания грузового каната и груза после окончания периода ускорения (см. рисунок 1, б, г).

Поэтому была исследована также несимметричная форма функции ускорения точки подвеса при прочих равных условиях (рисунок 2, е):

$$\ddot{x} = A \cdot (1 - k_1 \cdot t) \cdot \sin(k \cdot t), \quad (5)$$

где k_1 – коэффициент приращения (уменьшения) ускорения. При $k_1 = 0$ функция (5) становится тождественно симметричной функции (3).

В результате было установлено, что при оптимальном значении $k_1 = 0.0045$ значение целевой функции может быть снижено до нуля при $k = 0.1418$ (рисунок 2, д).

Рисунок 1 – Временные зависимости угла q наклона грузового каната ГК и его первой производной (а, б), а также целевой минимизируемой функции F (в, г) (пример)

Figure 1 – Time dependences of the q tilt angle of the cargo rope of the main cargo ship and its first derivative (a, b), as well as the target minimized function F (c, d) (example)

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ математического моделирования колебаний груза ГК мостового типа, у которого точка подвеса совершает перемещения с ускорением в горизонтальном направлении при помощи встроенных функций языка программирования математической системы MATLAB.

Элементы программного кода могут быть использованы для моделирования колебаний грузового каната с грузом при рабочих перемещениях ГК различных типов.

В качестве примера, демонстрирующего работоспособность созданной математической модели, приведены данные результатов моделирования при движении точки подвеса

Рисунок 2 – Функциональные зависимости целевой функции F и временные зависимости ускорения точки подвеса $\ddot{x}$, угла отклонения каната q и перемещения точки подвеса x : а – $F(k)$ при $k_1=0$; б – $\ddot{x}(t)$ при $k_1=0$ и $k=0.1419$; в – q при $k_1=0$ и $k=0.1419$; г – $x(t)$ при $k_1=0$ и $k=0.1419$; д – $F(k)$ при $k_1=0.0045$; е – $\ddot{x}(t)$ при $k_1=0.0045$ и $k=0.1418$; ж – $q(t)$ при $k_1=0.0045$ и $k=0.1418$; з – $x(t)$ при $k_1=0.0045$ и $k=0.1418$
Figure 2 – Functional dependences of the F objective function and time dependences of the suspension point's acceleration, the angle of the q rope deflection and the movement of the x suspension point: а – $F(k)$ at $k_1=0$; б – $\ddot{x}(t)$ for $k_1=0$ and $k=0.1419$; в – q for $k_1=0$ and $k=0.1419$; д – $x(t)$ for $k_1=0$ and $k=0.1419$; е – $F(k)$ at $k_1=0.0045$; ф – $\ddot{x}(t)$ at $k_1=0.0045$ and $k=0.1418$; ж – $q(t)$ at $k_1=0.0045$ and $k=0.1418$; з – $x(t)$ at $k_1=0.0045$ and $k=0.1418$

груза с ускорением, изменяющимся по синусоиде, а также по синусоиде с равномерным убыванием амплитуды.

Показано, что при отсутствии убывания амплитуды у синусоиды ускорения точки подвеса, т.е. при симметричном характере разгона и последующего торможения, не достигается полное устранение остаточных колебаний в конечный момент времени процесса. Хотя величина угловой скорости остаточных колебаний грузового каната ГК и составляет незначительную величину 3-го порядка малости в самом благоприятном расчетном случае (порядка 10^{-3} рад/с).

Наиболее подходящий расчетный случай при симметричном характере разгона и последующего торможения точки подвеса по синусоиде достигается при симметричном характере скорости изменения угла наклона грузового каната (см. рисунок 1, б).

В то же время изменение характера ускорения точки подвеса с симметричного на несимметричный (введение убывания амплитуды синусоиды ускорения точки подвеса) позволяет полностью устранить остаточные колебания грузового каната ГК после окончания цикла разгона с торможением.

Разработанная математическая модель с использованием элементов программирования языка MATLAB может быть при необходимости легко модифицирована и использована для исследования колебаний динамической системы ГК с подвижной точкой подвеса груза при любых других видах воздействий со стороны привода. Перспективная область использования разработанной модели – исследование и разработка методов уменьшения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого ГК с нежестким грузовым канатом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Ji Y., Leite F. Automated tower crane planning: leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking // *Automation in construction*. 2018. Vol. 9. Pp. 78–90. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.003.
2. Pal U., Mukhopadhyay G., Sharma A., Bhat-tacharya S. Failure analysis of wire rope of ladle crane in steel making shop // *International journal of fatigue*. 2018. Vol. 116. Pp. 149–155. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.019.
3. Chu Y., Hatledal L.I., Zhang H., Aesoy V., Ehlers S. Virtual prototyping for maritime crane design and operations // *Journal of marine science and technology*. 2018. Vol. 23. No. 4. Pp. 754–766. DOI: 10.1007/s00773-017-0509-z.
4. Mori Y., Tagawa Y. Vibration controller for overhead cranes considering limited horizontal acceleration // *Control engineering practice*. 2018.

Vol. 81. Pp. 256–263. DOI: 10.1016/j.coneng-prac.2018.09.009.

5. Enin S.S., Omelchenko E.Ya., Fomin N.V., Beliy A.V. Overhead crane computer model // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Pp. 22–28. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022028.

6. La V.D., Nguyen K.T. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload // *Mechanical systems and signal processing*. 2019. Vol. 116 Pp. 310–321. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.06.056.

7. 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. 12–62. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012062.

8. Chen H., Fang Y., Sun N. A payload swing suppression guaranteed emergency braking method for overhead crane systems // *Journal of vibration and control*. 2018. Vol. 24. No. 20. Pp. 4651–4660. DOI: 10.1177/1077546317731967.

9. Maghsoudi M. J., Ramli L., Sudin, S. Improved unity magnitude input shaping scheme for sway control of an underactuated 3D overhead crane with hoisting // *Mechanical systems and signal processing*. 2019. Vol. 123. Pp. 466–482. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.12.056.

10. Ouyang H., Hu, J., Zhang G. Decoupled linear model and S-shaped curve motion trajectory for load sway reduction control in overhead cranes with double-pendulum effect // *Proceedings of the institution of mechanical engineers part C-journal of mechanical engineering science*. 2019. Vol. 233. No. 10. Pp. 3678–3689. DOI: 10.1177/0954406218819029.

11. Miao Y., Xu F., Hu, Y. Anti-swing control of the overhead crane system based on the harmony search radial basis function neural network algorithm // *Advances in mechanical engineering*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 1687814019834458. DOI: 10.1177/1687814019834458.

12. Ma X., Bao H. An anti-swing closed-loop control strategy for overhead cranes // *Applied Sciences-Basel*. 2018. Vol. 8. No. 9. P. 1463. DOI: 10.3390/app8091463.

13. Spruogis B., Jakstas A., Gican V., Turla V., Moksins V. Further research on an anti-swing control system for overhead cranes // *Engineering technology & applied science research*. 2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 2598–2603.

14. 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. DOI: 10.2991/jrnl.2018.4.4.14.

15. Zhang M. Название: Finite-time model-free trajectory tracking control for overhead

cranes subject to model uncertainties, parameter variations and external disturbances // Transactions of the institute of measurement and control. 2019. Vol. 41. No. 12. Pp. 3516–3525. DOI: 10.1177/0142331219830157.

16. Sun N., Wu Y., Chen H., Fang Y. Antiswing cargo transportation of underactuated tower crane systems by a nonlinear controller embedded with an integral term // IEEE transactions on automation science and engineering. 2019. Vol. 16. No. 3. Pp. 1387–1398. DOI: 10.1109/TASE.2018.2889434.

17. Abdel-razak M.H., Ata A.A., Mohamed K.T., Haraz E.H. Proportional-integral-derivative controller with inlet derivative filter fine-tuning of a double-pendulum gantry crane system by a multi-objective genetic algorithm // Engineering optimization. 2019. Vol. 0. Pp. 1–22. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1603300.

18. Huang X., Ralescu A.L., Gao H., Huang H. A survey on the application of fuzzy systems for underactuated systems // Proceedings of the institution of mechanical engineers part i-journal of systems and control engineering. 2019. Vol. 233. No. 3. Pp. 217–244. DOI: 10.1177/0959651818791027.

19. Wang J., Qiang B., Du W., He Z., Dong S., Guan B. Control Technology for Overhead Crane System Based on Particle Swarm Algorithm Optimization PID Control // Advances in materials, machinery, electronics. III Book series: AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2073. UNSP 020095-1. DOI: 10.1063/1.5090749.

20. 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. DOI: 10.24874/jsscm.2018.12.02.05.

Приводится на русском языке и латинице согласно правилам для References.

Поступила 02.09.2019, принята к публикации 25.10.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корытов Михаил Сергеевич – д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, ResearcherID B-5667-2015, ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. каф. АКМуТ (644080, г. Омск, пр. Мира 5, kms142@mail.ru.).

Щербakov Виталий Сергеевич, – д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3084-2271, Scopus Author ID 57034922100, ResearcherID N-1716-2017, ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. каф.

АППу (644080, г. Омск, пр. Мира 5, sherbakov_vs@sibadi.org.).

Беляков Виталий Евгеньевич – ст. преподаватель, Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации (г. Омск, Военный 14-й городок, 119, vitaliy_belyakov@mail.ru.).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail S. Korytov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automobile, Construction Materials and Technologies, ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, ResearcherID B-5667-2015, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: kms142@mail.ru).

Vitaliy S. Shcherbakov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering, Siberian State Automobile and Highway University, ORCID: 0000-0002-3084-2271, (644088, Omsk, 5, Mira Ave, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

Vitaliy E. Belyakov – Senior Lecturer, Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Krulev (644088, Omsk, 119, Military 14th town, e-mail: vitaliy_belyakov@mail.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корытов Михаил Сергеевич. Исследование состояния вопроса, библиографический поиск, составление уравнений математической модели, разработка программного продукта для проверки работоспособности методики, вычислительная проверка методики.

Щербakov Виталий Сергеевич. Формулировка проблемы, разработка общей концепции моделирования рабочего процесса грузоподъемного крана, написание заключения.

Беляков Виталий Евгеньевич. Написание введения, обработка результатов вычислительного эксперимента, визуализация и оформление графиков.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Mikhail S. Korytov – research of the problem; bibliographic search; compilation of equations of a mathematical model; development of the software product to test the operability of the technique; computational verification of the technique.

Vitaliy S. Shcherbakov – formulation of the problem; developing the general concept for modeling the working process of a crane; conclusion's writing.

Vitaliy E. Belyakov – introduction's writing; processing the results of a computational experiment; visualization and design of graphs.