

Savenkov Nikita V (Makeevka) – Doctor of Philosophy, assistant, State Educational Institution of Higher Professional Education “Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture” (286123, Makeevka, street Derzhavina, 2, e-mail: SavenkovNV@ya.ru).

*Ponyakin Victor V (Makeevka) – assistant,
State Educational Institution of Higher
Professional Education “Donbass National
Academy of Civil Engineering and Architecture”
(286123, Makeevka, street Derzhavina, 2, e-mail:
PonyakinVV@mail.ru).*

Горожанкин С.А. Создание концепции исследования, постановка целей и задач, общее руководство.

Савенков Н.В. Проведение экспериментальной части исследования. Разработка расчётно-экспериментальных методик для определения характеристик автомобильных двигателей и силовых установок с учетом неустановившихся режимов движения.

Понякин В.В. Разработка математических моделей режимов движения автомобиля в ездовом цикле WLTC; расчёт топливной экономичности АТС в комплексе нестационарных режимов.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СУПЕРПОЗИЦИИ ПЛОСКИХ МОДЕЛЕЙ МОСТОВОГО КРАНА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГАШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА

АННОТАЦИЯ

Введение. Для динамической системы плоского маятника с затуханием колебаний, описывающей колебания груза мостового крана на гибком канатном подвесе в отдельной вертикальной плоскости, предложено решение задачи перемещения груза на заданное расстояние с выполнением условия полного гашения его неуправляемых маятниковых пространственных колебаний.

Материалы и методы. *Использован принцип пересчета временных зависимостей углов отклонения грузового каната от вертикали в зависимости ускорений, скоростей и перемещений точки подвеса груза на грузовой тележке в отдельной плоскости движения моста либо грузовой тележки. Учтены кинематические ограничения на перемещения точки подвеса груза в виде максимально достижимых ускорений и скоростей моста и грузовой тележки крана.*

Результаты. Подтверждена гипотеза о соблюдении принципа суперпозиции колебаний при совместном перемещении груза в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях пространства при малых значениях углов отклонения грузового каната от вертикали.

Обсуждение и заключение. Проведена оценка точности суперпозиции плоских моделей маятниковой системы мостового крана при гашении пространственных колебаний груза. Пространственные перемещения груза в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях пространства могут быть с достаточной для практических целей точностью смоделированы с использованием сравнительно несложной плоской математической модели маятниковой системы мостового крана с грузом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *мостовой кран, суперпозиция, гашение колебаний груза, маятниковая система, раскачивание каната, ограничение колебаний.*

ВВЕДЕНИЕ

Раскачивание и маятниковые колебания груза, перемещаемого мостовым краном (МК), обусловлены гибкостью канатного подвеса груза. При отсутствии целенаправленного гашения колебаний любые перемещения груза приводят к его большему или меньшему раскачиванию, в котором, как правило, всегда присутствует неуправляемая компонента. Колебания увеличивают время цикла МК, снижают не только производительность, но и безопасность работ [1, 2, 3]. Возможно полное гашение неуправляемой компоненты маятниковых колебаний груза в отдельной плоскости. Для этого предлагается перемещать точку подвеса груза (грузовую тележку МК) по некоторой нелинейной временной зависимости (траектории), которая не только подавляет неуправляемую компоненту колебаний, но и обеспечивает заданную временную зависимость угла отклонений грузового каната МК от вертикали.

Известные методы синтеза указанной траектории точки подвеса маятниковой системы [3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] имеют общий недостаток в виде сравнительно большой погрешности реализации как угла отклонения грузового каната МК от вертикали, так и линейных координат перемещаемого груза. Либо угол отклонения грузового каната МК от вертикали вообще не отслеживается и не контролируется. Время перемещения при подавлении раскачиваний груза, как правило, увеличивается. Известные алгоритмы характеризуются сравнительной сложностью и необходимостью применения специфического математического аппарата, такого как нечеткая логика [3], теория оптимального управления [4], шейпинг-управление [11] и др.

В связи с изложенным была поставлена цель разработки такой сравнительно несложной математической модели, которая позволяла бы не только ограничивать неуправляемые раскачивания груза в отдельной плоскости (в направлении движения моста или грузовой тележки МК), но и при использовании суперпозиции (наложения) гашения колебаний в пространстве давала бы достаточно точные результаты. Основной задачей данной работы являлась оценка точности суперпозиции двух плоских моделей маятниковой системы мостового крана при ограничении пространственных колебаний груза (вызываемые одновре-

менным движением как моста, так и грузовой тележки МК).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для синтеза искомой нелинейной временной зависимости перемещения точки подвеса груза (грузовой тележки), подавляющей неуправляемые колебания, авторами предложено использовать математическую модель плоского маятника в виде известного нелинейного дифференциального уравнения второго порядка [13, 14, 15, 16, 17]

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

где m – масса груза, кг; L – длина грузового каната МК от подвижной точки подвеса на грузовой тележке (центр блока роликов полиспаста) до центра масс груза, м; b – приведенный к угловой координате коэффициент вязкого трения, задающий меру диссипации энергии, Н·м·с/рад; q , $\dot{q}$, $\ddot{q}$ – угол отклонения грузового каната МК от гравитационной вертикали и его первые две производные по времени соответственно, рад, рад/с, рад/с²; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²; $\ddot{x}$ – линейное ускорение точки подвеса груза в горизонтальном направлении движения грузовой тележки, м/с².

Были приняты допущения о постоянстве длины грузового каната L в процессе перемещения груза, о бесступенчатом характере регулирования скорости $\dot{x}$ и ускорения $\ddot{x}$ разгона и торможения точки подвеса груза (грузовой тележки МК, что обеспечивает ЧРП) в горизонтальном направлении, и о пренебрежимо малом влиянии массы перемещаемого груза и подвижных звеньев МК на управляемый параметр ускорения точки подвеса $\ddot{x}$.

Авторами разработан алгоритм перемещения груза в режиме гашения колебаний, синтезирующий непрерывное (бесступенчатое) управление точкой подвеса, которое может быть реализовано при помощи частотно-регулируемых приводов (ЧРП) МК. Перспективными ЧРП оснащаются большинство изготавливаемых в настоящее время МК. Алгоритм учитывает ограничения в виде максимальных скорости и ускорения подвижной точки подвеса груза на МК (грузовой тележки).

Груз из состояния покоя на вертикальном канатном подвесе перемещался МК на заданное расстояние l_x . После перемещения (в мо-

мент времени T) груз также находился в состоянии, близком к состоянию покоя (отсутствие остаточных колебаний).

Использован принцип пересчета временной зависимости $q(t)$ угла отклонения грузового каната от вертикали в зависимости ускорений, скоростей и перемещений точки подвеса груза на грузовой тележке. Зависимость $q(t)$ задавалась в виде суммы четырех элементарных сигмоидальных функций [7, 9, 17, 18]

$$q(t) = A / (e^{k(c_1-t)} + 1) - A / (e^{k(c_3-t)} + 1) + \\ + A / (e^{-k(c_2-t)} + 1) - A / (e^{-k(c_4-t)} + 1), \quad (2)$$

где A – амплитуда угла наклона грузового каната МК во время перемещения груза, рад; k – коэффициент крутизны нарастания и спада значения угла q ; c_1, c_2 – временные значения локальных центров нарастания и спада угла наклона грузового каната МК в положительном направлении (разгон МК с грузом), с; c_3, c_4 – временные значения локальных центров нарастания и спада угла наклона грузового каната МК в отрицательном направлении (торможение МК с грузом при приближении к целевой точке), с.

Аналитическое дифференцирование выражения (2) позволяет в символьном виде получить выражения для первой $\dot{q}(t)$ и второй $\ddot{q}(t)$ производных угла наклона каната, которые не приводятся вследствие больших размеров формул. Выражение ускорения точки подвеса $\ddot{x}$ из (1) имеет вид

$$\ddot{x} = -L(\ddot{q} + 2b\dot{q} / m + g \cdot \sin(q) / L) / \cos(q). \quad (3)$$

Подстановка аналитических выражений $\dot{q}(t)$ и $\ddot{q}(t)$ в (3) позволяет получить аналитическое выражение $\ddot{x}(t)$.

Вывод аналитических выражений интегралов $\dot{x}(t)$ и $x(t)$ затруднен. Поэтому вектор дискретных значений зависимости ускорения точки подвеса от времени $\ddot{x}(t)$ дважды интегрировался при помощи известного численного метода трапеций [19, 20]. В результате формировался вектор дискретных значений перемещения точки подвеса $x(t)$.

Последовательная оптимизация значений параметров A, k, c_1, c_2, c_3, c_4 , входящих в выражение (2), может быть выполнена различными способами. Авторами было установлено путем вычислительных экспериментов, что указан-

ная оптимизация позволит не только учесть ограничения на предельные максимальные значения скорости $\dot{x}_{lim}$ и ускорения $\ddot{x}_{lim}$ точки подвеса груза, но и переместить груз на заданное расстояние l_x . Поскольку первым в разработанном алгоритме вычисляется временной ряд значений угла наклона грузового каната по (2), алгоритм обеспечивает полную управляемость углом отклонения грузового каната, когда последний в процессе перемещения груза достигает точно заданного максимального значения. Это гарантирует максимальное быстрое действие.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вычислительными экспериментами была подтверждена гипотеза о соблюдении принципа суперпозиции при совместном перемещении груза вдоль двух взаимно перпендикулярных горизонтально расположенных осей X и Z неподвижной системы координат $OXYZ$, когда углы отклонения грузового каната от вертикали достаточно малы ($\max 1 - 3^\circ$). Оценка точности суперпозиции двух плоских моделей маятниковой системы мостового крана при перемещении груза по пространственной траектории в режиме гашения колебаний выполнялась по критерию абсолютной погрешности линейных координат условного центра груза Δ :

$$\Delta = \max(\Delta_i);$$

$$\Delta_i = \sqrt{|x_{gi} - x_{gsmi}|^2 + |z_{gi} - z_{gsmi}|^2}, \quad i=1, \dots, n,$$

где x_{gi} и z_{gi} – координаты груза вдоль осей OX и OZ соответственно на шаге времени i , полученные независимо друг от друга по разработанному алгоритму с использованием уравнений (1) – (3); x_{gsmi} и z_{gsmi} – координаты груза вдоль осей OX и OZ соответственно на шаге времени i , полученные одновременно на общей пространственной модели МК с грузом в системе MATLAB SimMechanics Second Generation (см. рисунок 1).

В качестве допущения трехмерная имитационная модель МК в системе MATLAB SimMechanics Second Generation рассматривалась как эталонный объект, идентичный реальному МК. Относительно перемещений имитационной модели МК рассчитывалась погрешность.

Мосту и грузовой тележке МК в пространственной имитационной модели одновременно сообщали движения, по отдельности син-

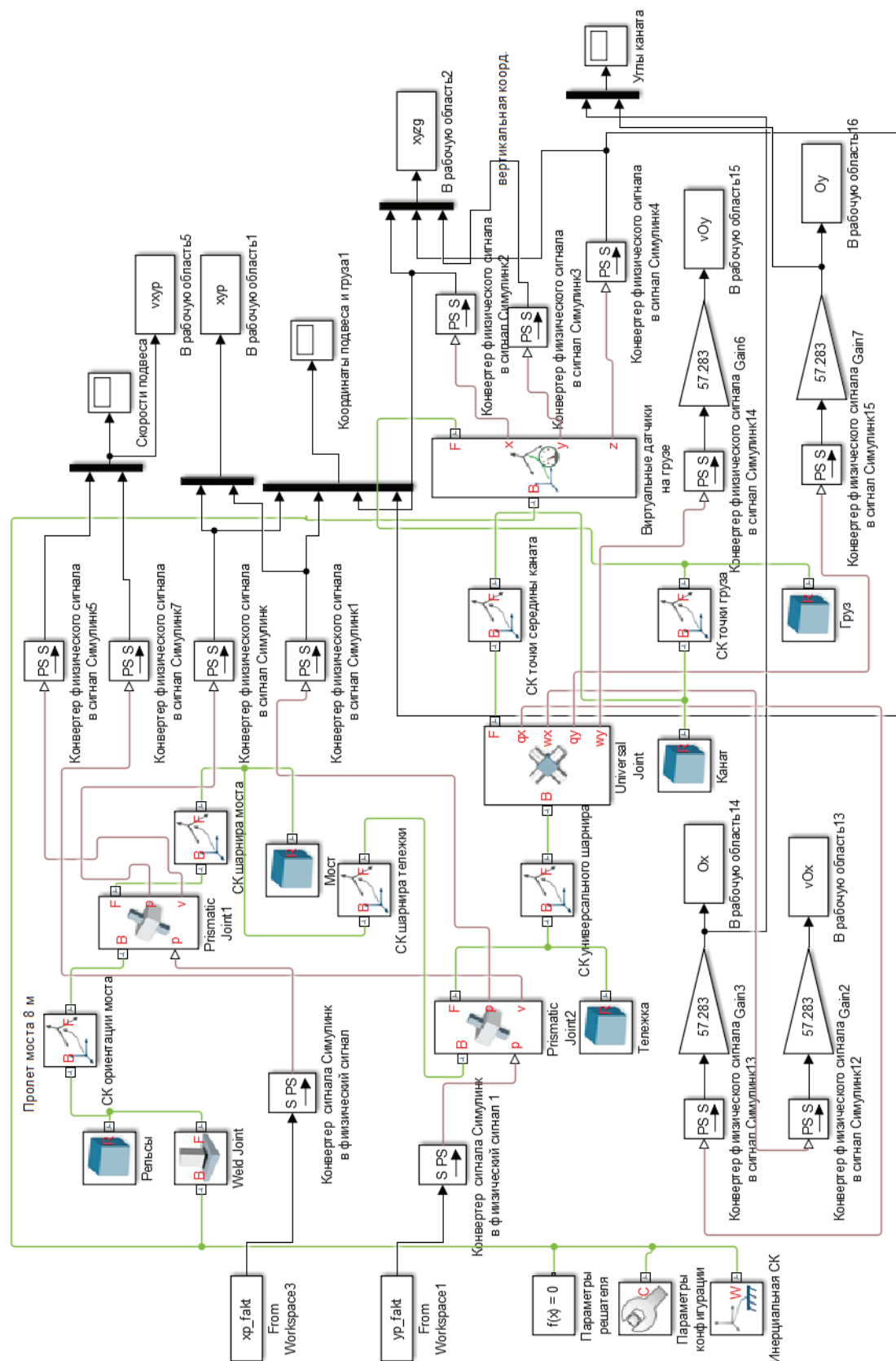


Рисунок 1 – Пространственная имитационная модель мостового крана с грузом в системе MATLAB SimMechanics Second Generation

Figure 1 – Spatial simulation model of the bridge crane with a load in the MATLAB SimMechanics Second Generation system

тезированные разработанным алгоритмом по координатам X и Z соответственно. В результате груз при моделировании в системе MATLAB перемещался по пространственной траектории (см. рисунок 2, а).

Постоянные значения массы груза, длины каната и коэффициента диссипации составляли $m=100$ кг, $L=10$ м, $b=0,5$ Н·м·с/рад. Ограничения максимальных значений скорости и ускорения точки подвеса груза принимали также постоянные значения $\dot{x}_{\text{lim}}=1,5$ м/с и $\ddot{x}_{\text{lim}}=0,4$ м/с² для моста и $\dot{z}_{\text{lim}}=0,7$ м/с и $\ddot{z}_{\text{lim}}=0,5$ м/с² для грузовой тележки соответственно. Углы отклонения грузового каната в направлениях осей OX и OZ не превышали 2° .

Использовался центральный симметричный план вычислительного эксперимента. Варьируемыми параметрами при этом выступали: расстояния перемещений груза l_x и l_z вдоль координатных осей OX и OZ соответственно, задержка времени τ при движении вдоль оси OZ .

В центре симметричного плана вычислительного эксперимента указанные параметры принимали значения $l_x = 15$ м, $l_z = 10$ м, $\tau = 5$ с. Диапазоны варьирования параметров имели вид: $l_x = [13:1:17]$ м; $l_z = [8:1:12]$ м; $\tau = [3:1:7]$ с.

Результаты вычислительного эксперимента приведены на рисунке 2, б.

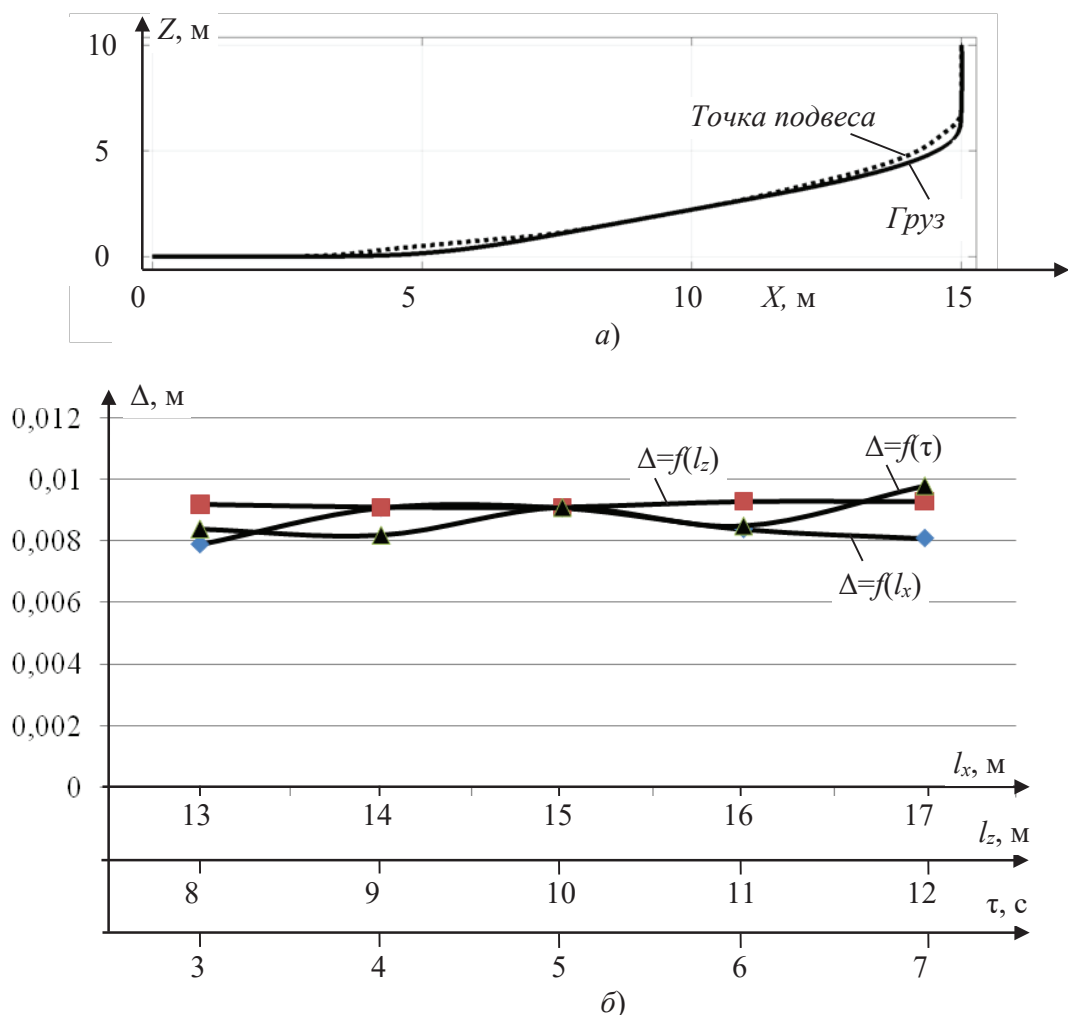


Рисунок 2 – Траектории движения груза и подвеса (вид сверху) в центральной точке плана вычислительного эксперимента (а); зависимости абсолютной погрешности линейных координат условного центра груза Δ от расстояний перемещений груза l_x и l_z вдоль координатных осей OX и OZ соответственно и задержки времени τ (б)

Figure 2 – Trajectory of cargo movement and suspension (top view) in the central point of the plan of the computing experiment (a); dependence of the linear coordinates' absolute error of the conditional center on the load Δ from the displacements of the load l_x and l_z along the coordinate axes OX and OZ , and the time delay τ (b)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных на рисунке 2 результатов позволил сделать следующие выводы. Варьирование линейных размеров исследуемой траектории и задержки времени при движении вдоль второй горизонтальной оси приводит к незначительным ($\pm 10\%$) изменениям абсолютной погрешности линейных координат условного центра груза Δ относительно эталонной траектории, полученной с использованием пространственной имитационной модели. При этом все три варьируемых параметра оказывают примерно равное влияние на точность. Абсолютная погрешность при всех сочетаниях варьируемых параметров не превышает 0,01 м, что можно считать достаточной точностью при перемещениях груза МК.

Таким образом, пространственные перемещения груза в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях пространства могут быть описаны и смоделированы без использования сравнительно сложной пространственной имитационной модели МК. Для этого предлагается использовать суперпозицию плоских колебаний груза в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Математическая модель плоских колебаний позволяет не только переместить груз на заданное расстояние с выполнением условия полного гашения его неуправляемых маятниковых пространственных колебаний, но и обеспечить полную управляемость углами отклонений грузового каната и линейными координатами груза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. 13 – 17.
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. Алгоритмы подавления колебаний грузов подъем-

но-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования / О.А. Шведова и др. // Доклады БГУИР. 2014. № 1 (79). С. 65 – 71.

4. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. 383 с.

5. Ridout A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback // J. of Electrical and Electronics Engineering. 1989. Vol. 9, no. 1/2. pp. 17 – 26.

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

7. Korytov M., Shcherbakov V., Volf E. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes // International Journal of Mechanics and Control, ISSN: 1590-8844. 2015. Vol. 16, no. 2. pp. 3 – 8.

8. Shcherbakov V. etc. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory size // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 811. pp. 99 – 103.

9. Shcherbakov V. etc. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 701-702. pp. 715 – 720.

10. Kim Y.S. etc. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes // Industry Applications Conference. 2003. Vol. 1. pp. 262 – 269.

11. Blackburn D. etc. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics // Journal of Vibration and Control. 2010. № 16. pp. 477 – 501.

12. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration // European Journal of Control. 1999. no. 5. pp. 208 – 218.

13. Блехман И. И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400 с.

14. Щербakov В.С., Кorytov М.С., Вольф Е.О. Алгоритм компенсации неуправляемых пространственных колебаний груза и повышения точности траектории его перемещения грузоподъемным краном // Вестник машиностроения, 2015. № 3. С. 16 – 18.

15. Бутиков Е.И. Необычное поведение маятника при синусоидальном внешнем воздействии // Компьютерные инструменты в образовании. 2008. № 2. С. 24 – 36.

16. Кильчевский Н.А. Курс теоретической механики, Т. 1 (кинематика, статика, динамика точки). М.: Наука, 1972. 456 с.

17. Кorytov М.С. Перемещение грузовой тележки мостового крана в режиме подавления неуправляемых колебаний груза // Проблемы управления. 2017. № 2. С. 10 – 16.

18. Mitchell, Tom M. Machine Learning. WCB/McGraw-Hill, 1997. 414 p.

19. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967. 500 с.

20. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1967. 368 с.

ACCURACY EVALUATION OF THE BRIDGE CRANE FLAT MODELS' SUPERPOSITION AT MODELING THE SATURATION OF CARGO SPATIAL VIBRATIONS

M.S. Korytov, V.S. Shcherbakov

ABSTRACT

Introduction. A solution of the problem of moving the load to a given distance is proposed in the article with the fulfillment of the condition for complete quenching of the uncontrollable pendulum spatial oscillations for the plane pendulum dynamical system with oscillations' damping describing the load oscillations of the bridge crane on a flexible cable suspension in a separate vertical plane.

Materials and methods. The recalculation principle of the time dependences of the cargo rope deviation from the dependence of the vertical acceleration, speed and movement of the load suspension on the freight trolley in a separate bridge plane or the freight trolley. The kinematic restrictions on the movement of the cargo suspension point in the form of the maximum achievable accelerations, speeds of the bridge and the truck of the crane are taken into account in the research.

Results. The principle hypothesis of the swings' superposition in the joint cargo movement of two mutually perpendicular vertical planes is confirmed with small deviation angles' values of the load rope from the vertical position.

Discussion and conclusion. The accuracy of the superposition of the bridge crane pendulum system flat models is evaluated in the process of suppressing the spatial cargo swings. The spatial cargo movement in two mutually perpendicular vertical planes could be simulated with sufficient accuracy for practical purposes using a relatively simple flat mathematical model of the loaded bridge crane pendulum system.

KEYWORDS: bridge crane, superposition, damping of cargo swings, pendulum system, rope swing, swing limits.

REFERENCES

1. Shhedrinov A.V., Serikov S.A., Kolmykov V.V. Avtomaticheskaja sistema uspokoenija kolebanij gruza dlja mostovogo krana [Automatic system of calming the load for the bridge crane]. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika, 2007, no. 8, pp. 13 – 17.
2. Tolochko O.I., Bazhutin D.V. Sravnitel'nyj analiz metodov gashenija kolebanij gruzov, podveshennogo k mehanizmu postupatel'nogo dvizhenija mostovogo krana [Comparative analysis of methods for damping the swings of a load suspended to the mechanism of translational movement of a bridge crane]. Jelektromashinostroenie i jelektrooborudovanie, 2010, no. 75, pp. 22 – 28.
3. Shvedova O.A. Algoritmy podavlenija kolebanij gruzov podjemno-transportnyh mehanizmov s ispol'zovaniem nechetkoj logiki funkcionirovanija [Algorithms for suppressing the swings of cargoes of hoisting-and-transport mechanisms using fuzzy logic of functioning]. Doklady BGUIR, 2014, no.1 (79), pp. 65 – 71.
4. Chernous'ko F.L., Akulenko L.D., Sokolov B.N. Upravlenie kolebanijami [Control of swings]. Moscow, Nauka, 1980, 383 p.
5. Ridout A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback. J. of Electrical and Electronics Engineering, 1989, Vol. 9, no. 1/2, pp. 17 – 26.
6. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes : PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, 2003, 100 p.
7. Korytov M., Shcherbakov V., Volf E. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes. International Journal of Mechanics and Control, ISSN: 1590-8844, 2015, Vol. 16, no. 2, pp. 3 – 8.
8. Shcherbakov V. etc. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory size. Applied Mechanics and Materials, 2015, Vol. 811, pp. 99 – 103.
9. Shcherbakov V. etc. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane. Applied Mechanics and Materials, 2014, Vols. 701 – 702, pp. 715 – 720.
10. Kim Y.S., etc. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes. Industry Applications Conference, 2003, Vol. 1, pp. 262 – 269.
11. Blackburn D. etc. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics. Journal of Vibration and Control, 2010, no. 16, p. 477 – 501.
12. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration. European Journal of Control, 1999, no. 5, pp. 208 – 218.
13. Blehman I.I. Vibracionnaja mehanika [Vibration

mechanics]. Moscow, Fizmatlit, 1994. 400 p.

14. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Volf E.O. Algoritm kompensacii neupravljaemyh prostranstvennyh kolebanij gruzov i povyshenija tochnosti traektorii ego peremeshhenija gruzopodemnym kranom [Algorithm for compensation of uncontrolled spatial swings of cargo and increase of accuracy of the trajectory of its movement by a crane]. Vestnik mashinostroenija, 2015, no. 3, pp. 16 – 18.

15. Butikov E.I. Neobychnoe povedenie majatnika pri sinusoidalnom vneshnem vozdejstvii [Unusual pendulum behavior with sinusoidal external action]. Kompjuternye instrumenty v obrazovanii, 2008, no. 2, pp. 24 – 36.

16. Kilchevskij N.A. Kurs teoreticheskoy mehaniki, T. 1 (kinematika, statika, dinamika tochki) [Course of theoretical mechanics, T. 1 (kinematics, statics, point dynamics)]. Moscow, Nauka, 1972. 456 p.

17. Korytov M.S. Peremeshhenie gruzovoj teleshki mostovogo krana v rezhime podavlenija neupravljaemyh kolebanij gruzov [Moving a truck crane bridge crane in the mode of suppressing uncontrolled swings of cargo]. Problemy upravlenija, 2017, no. 2, pp. 10 – 16.

18. Mitchell Tom M. Machine Learning. WCB/McGraw-Hill, 1997, 414 p.

19. Krylov V.I. Priblizhennoe vychislenie integralov [Approximate calculation of integrals]. Moscow, Nauka, 1967, 500 p.

20. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova Je.Z. Osnovy vychislitel'noj matematiki [Fundamentals of Computational Mathematics]. Moscow, Nauka, 1967. 368 p.

Поступила 17.01.2018, принята к публикации 15.02.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корытов Михаил Сергеевич (г. Омск, Россия) – доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «СибАДИ», профессор кафедры «АКМТ», ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, Researcher ID B-5667-2015 (644080, г. Омск, пр. Мухоморова д. 5, e-mail: kms142@mail.ru).

Korytov Mikhail Sergeevich (Omsk, Russia) – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, FGBOU VO "SIBADI", Professor of

the Department "AKMiT", ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, Researcher ID B-5667-2015 (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: kms142@mail.ru).

Щербаков Виталий Сергеевич (г. Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «СибАДИ», заведующий кафедрой «АППиЭ», ORCID 0000-0002-3084-2271, Scopus Author ID 57034922100, Researcher ID N-1716-2017 (644080, г. Омск, пр. Мира д. 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

Shcherbakov Vitaliy Sergeevich (Omsk, Rus-

sia) – Doctor of Technical Sciences, Prof., FGBOU VO "SIBADI", Head. Dep. "APPiE", ORCID 0000-0002-3084-2271, Scopus Author ID 57034922100, Researcher ID N-1716-2017 (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корытов М.С. Исследование состояния вопроса, вывод уравнений математической модели, разработка программного продукта для проверки работоспособности математической модели.

Щербаков В.С. Редактирование текста статьи, заключение.

УДК 620.22
620.178.16

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Ю.К. Машков¹, О.А. Кургузова², А.С. Рубан³

¹ФГБОУ ВО «ОмГТУ», г. Омск, Россия;

²Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия;

³ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие современной техники выдвигает новые и более высокие требования к физико-механическим свойствам полимерных композиционных материалов, широко применяемых в узлах трения (подшипников, герметизирующих устройств и т.п.) машин общего, специального назначения: транспортных, дорожно-строительных, горных. Это обуславливает актуальность задачи создания новых полимерных нанокompозитов триботехнического назначения с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами. Названная задача решается методами структурной модификации полимерной матрицы ПКМ, а также оптимизацией технологического процесса синтеза композиционных материалов.

Методы и материалы. Одним из перспективных методов структурной модификации является введение в полимерную матрицу наполнителей различного типа, особенно дисперсных и волокнистых, а в последние годы – ультрадисперсных и наноразмерных. Композиционным материалам с нанодисперсными наполнителями присущи свойства, существенно отличающиеся от свойств материала с микро- и макродисперсными частицами, вследствие высокой поверхностной активности наноразмерных частиц наполнителей.

Результаты. В данной работе рассматриваются результаты разработки и исследования полимерных нанокompозитов с полидисперсными и наноразмерными наполнителями, их влияние на структуру и износостойкость полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена.

Обсуждение и заключение. Эффективность использования полимерных композиционных материалов в узлах трения машин существенно повышается при совершенствовании конструкции узлов с учетом особенностей физико-механических свойств и технологических возможностей полимеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимерные композиционные материалы; политетрафторэтилен; нанотрубки; структурная модификация; ограничение теплового расширения; износостойкость.