УДК 62 – 192:519.22

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МОСТОВЫХ КРАНОВ

Извеков Ю.А., Кобелькова Е.В., Лосева Н.А.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, e-mail: maijor076767@mail.ru

Приведен анализ динамики и освещены вопросы оптимизации такой механической системы, как металлургический мостовой кран. Смоделирована механическая система на основе дифференциального уравнения в форме Лагранжа. Применяется матричный метод решения частотного уравнения, а система дифференциальных уравнений n массовой системы записывается в операторном виде. Определены требования и построена расчетная динамическая схема мостового металлургического крана, в результате анализа которой выявлены участки несущих конструкций и элементов механизмов подъема, влияющие на нагруженность системы и так называемые входные и выходные параметры. Анализируется движение конструкции крана, испытывающей внешние механические силовые воздействия, которые возбуждают изгибные колебания в виде линейных перемещений элементов с возникновением перегрузок (амплитуд ускорений) и динамических воздействий на них. Используется метод преобразования вероятностей: определяется закон распределения выходных параметров по известному закону распределения вероятности входных параметров. Рассматриваются две случайные величины, связанные функциональной зависимостью: уровень пластической (упругой) деформации и величина действующей нагрузки; статистические характеристики случайной величины У определяются как функции случайного аргумента Х, если задан закон распределения Х. Полученные зависимости представляют большой интерес, так как позволяют преобразовать плотности вероятностей входного параметра системы в плотность вероятности выходного параметра. Предложенный анализ позволяет сформулировать и аналитически оценить уровень пластической (упругой) деформации несущих конструкций металлургических мостовых кранов в зависимости от величины действующей нагрузки как определяющего параметра при управлении техногенной безопасностью и рисками.

Ключевые слова: техногенная безопасность, несущие конструкции металлургических мостовых кранов, анализ динамики, механическая система, расчетная динамическая схема, риск, дифференциальные уравнения, определяющий параметр, изгибные колебания, метод преобразования вероятностей, пластическая (упругая) деформация, действующая нагрузка

ANALYSIS OF THE DYNAMICS AND OPTIMIZATION OF METALLURGICAL BRIDGE CRANES

Izvekov Y.A., Kobelkova E.V., Loseva N.A.

Magnitogorsk state technical university of G.I. Nosova, Magnitogorsk, e-mail: maijor076767@mail.ru

The analysis of dynamics and highlight issues of optimization of the mechanical system of the iron and steel bridge cranes. Modeled mechanical system on the basis of differential equations in Lagrange form. Apply the matrix method of the decision of the frequency of the equation, and the system of differential equations n mass of the system is recorded in the operator form. Identify requirements and built target dynamic scheme bridge metallurgical crane, as a result of analysis which identified areas of bearing constructions and elements of hoisting mechanisms of influencing the encumbrance of the system and the so-called input and output parameters. Analyzes the movement of the crane structure, challenging external mechanical effects of force, which provoke the bending oscillations in the form of linear displacements of elements with the emergence of overloads (the amplitudes of the accelerations) and a dynamic impact on them. Used a method of transformation of probabilities: to be determined by the law of distribution of output parameters of a well-known law of probability distribution for the input parameters. We consider two random variables, associated functional dependence: the level of plastic (elastic) deformation and the value of the actual load; the statistical characteristics of the random variable Has been defined as a function of a random argument X, if the law of distribution of X. The obtained dependences are of great interest, as it enables you to convert the probability density of the input parameter of the system in the probability density of the output parameter. The proposed analysis allows us to formulate and analytically assess the level of plastic (elastic) deformation of the load-bearing structures of the metallurgical crane depending on the size of the actual load is a determinant parameter in the management of technological safety and risk.

Keywords: technogenic safety, load-bearing structures of the metallurgical crane, the analysis of dynamics of a mechanical system, the dynamic scheme, the risk, the differential equations, the controlling parameter, bending oscillations, the method of transformation of probabilities, plastic (elastic) deformation, the current load

Анализ динамики современных сложных механических систем, таких как металлургические мостовые краны, представляет острую проблему в силу ее серьезного влияния на техногенную безопасность. Важным аспектом этой проблемы является конструкционная безопасность.

Обобщающее условие анализа и управления безопасностью можно представить в форме

$$R(t) = \sum_i P_i(t) \cdot U_i(t) \le \left[R(t)\right] = \frac{R_c(t)}{n_R} = m_Z Z(t), \qquad (1)\ [1, 3].$$

Выявить отдельные элементы или участки механической системы, которые определяют параметр $P(t)$, выработать практические меры по исключению опасных резонансных зон – основная цель при совершенствовании и оптимизации параметров надежности конструкции.

Процесс перехода потенциальной энергии в кинетическую движущихся масс и обратно сопровождается возникновением колебаний в системе и динамических нагрузок на ее элементы [8]. Колебательное движение металлургического мостового крана можно описать дифференциальным уравнением в форме Лагранжа следующего вида:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i}\right)-\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi_i}\right)+\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i}=Q_i, \qquad (2)$$

где φ_i, $\dot{\varphi}_i$ – перемещение i-го элемента крана и первая производная; Q_i – вынужденная внешняя нагрузка в виде изгибающей или какой-либо другой силы; T – кинетическая энергия свободно колеблющейся системы. При свободных колебаниях принимается [8] нулевое значение правой части формулы (2) ($Q_i = 0$).

$$T=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left(J_i\dot{\varphi}_i\right)^2, \qquad (3)$$

где J_i – параметр инерционности элемента в виде момента инерции или величины массы; П – потенциальная энергия свободно колеблющейся системы:

$$\Pi=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}\left[c_i\left(\varphi_i-\varphi_{i+1}\right)^2\right], \qquad (4)$$

где c_i – параметр жесткости.

Подставив (4) и (3) в (2) и имея, что

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi_i}\right)=0,$$

получим

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i}\right)=J_i\varphi_i\,\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i}\right)=J_i\ddot{\varphi}_i;$$

$$\left(\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i}\right)=c_i\left(\varphi_i-\varphi_{i+1}\right)-c_{i-1}\left(\varphi_{i-1}-\varphi_i\right).$$

Тогда уравнение (2) примет вид

$$J_i\ddot{\varphi}_i+c_i\left(\varphi_i-\varphi_{i+1}\right)-c_{i-1}\left(\varphi_{i-1}-\varphi_i\right)=0. \qquad (5)$$

Для системы, имеющей n масс, количество уравнений (5) будет равно n. Полученная система дифференциальных уравнений решается известными методами [6]. Частное решение такой системы принимаем в виде

$$\varphi_i=\sum_{i=1}^{n}A_i\sin\left(\omega_{ci}t+\alpha_i\right), \qquad (6)$$

где A_i – амплитуда колебаний i-й системы; w_{ci} – частота свободных колебаний системы; a_i – фаза колебаний системы.

Подставив решение в систему дифференциальных уравнений, получим систему однородных дифференциальных уравнений относительно неизвестных амплитуд колебаний. Решая его, получим частотное уравнение свободных колебаний системы относительно неизвестных частот w.

Для такой сложной механической системы, как металлургический кран, применяется матричный метод решения частотного уравнения. Для этого система дифференциальных уравнений n массовой системы записывается в операторном виде:

$$\vec{J}\,\ddot{\vec{\varphi}}+\vec{C}\,\vec{\varphi}=0, \qquad (7)$$

где J – диагональная матрица параметров масс элементов крана; C – симметричная матрица коэффициентов жесткости; φ – вектор-столбец перемещений элементов системы.

Анализ динамики сложных механических систем имеет серьезное значение при оценке параметров надежности и безопасности.

Расчетная динамическая схема системы должна удовлетворять двум главным требованиям: во-первых, она должна быть адекватна реальной системе и, насколько это возможно, отражать основные физические свойства исследуемой системы; во-вторых, она должна быть не очень сложной, чтобы решение динамической задачи оказалось не слишком трудоемким [9]. Основу мостового крана представляет металлоконструкция, состоящая из несущих и концевых балок, которые вместе образуют жесткую конструкцию, способную выдерживать приложенные нагрузки.

На следующем этапе анализа динамической расчетной схемы выявляются те участки несущих конструкций и элементов механизмов подъема металлургического мостового крана, которые будут определять динамику всей системы и ее нагруженность, для определения входных и выходных параметров системы.

При выполнении динамических расчетов рассматриваемой механической системы будем исследовать движение конструкции крана, испытывающей внешние механические силовые воздействия, которые возбуждают изгибные колебания в виде линейных перемещений элементов с возникновением перегрузок (амплитуд ускорений) и динамических воздействий на них.

Принятый метод анализа механической системы предполагает получение точного решения дифференциальных уравнений, описывающих ее движение с учетом

упругих деформаций, а затем уточнение, разработку и применение вероятностных методов прогнозирующего расчета определяющего параметра $P(t)$ на основании исследования случайного процесса изменения входных параметров.

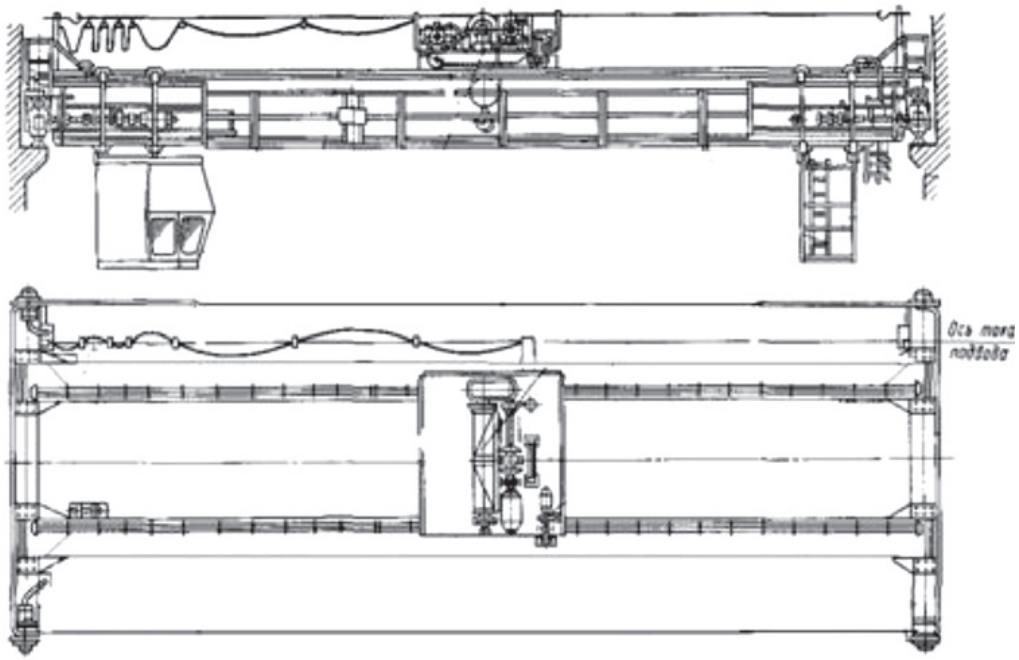

Рис. 1. Общий вид мостового крана

Балки испытывают нагрузки согласно следующей схеме:

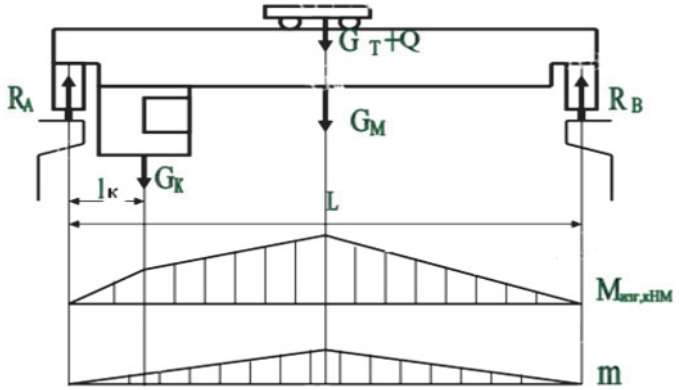

Рис. 2. К построению динамической модели мостового крана

Для достижения поставленной цели используем метод преобразования вероятностей [2, 3, 8]: определяется закон распределения выходных параметров по известному закону распределения вероятности входных параметров. Рассмотрим две случайные величины, связанные функциональной зависимостью: уровень пластической (упругой) деформации и величина действующей нагрузки; статистические характеристики случайной величины У определяются как функции случайного аргумента Х, если задан закон распределения Х. Можно записать:

$$p(x, t_1)dx = p(y, t_1)dy, \qquad (8)$$

откуда

$$p(y,t_1) = p(x, t_1)\frac{dx}{dy}, \qquad (9)$$

уравнение (9) представляет большой интерес, так как позволяет преобразовать плотности вероятностей входного параметра си-

стемы в плотность вероятности выходного параметра.

Таким образом, приведенный анализ динамики и некоторые вопросы оптимизации такой группы объектов, как металлургические мостовые краны, позволяют сформулировать и аналитически оценить уровень пластической (упругой) деформации их основных несущих конструкций в зависимости от величины действующей нагрузки как определяющего параметра при управлении техногенной безопасностью и рисками.

Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. В 4-х частях // Ч.1. Основы анализа и регулирования безопасности: научн. руковод. К.В. Фролов, Н.А. Махутов. – М.: МГФ «Знание», 2006. – 640 с: ил.

2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, Физматгиз, 1969 – 576 с.

3. Извеков Ю.А. Анализ техногенной безопасности кранового хозяйства России // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 12. – С. 18–19. – URL: www.rae.ru/snt/?section = content&op = show_article&article_id = 10000338 (дата обращения: 20.03.2013).

4. Извеков Ю.А., Лосева Н.А. Методология прогнозирования риска металлургического производства как сложной социально-природно-техногенной системы // Актуальные проблемы развития науки, образования и культуры: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Сибай: филиал БашГУ, 2012. – С. 352–354.

5. Крылова Е.А., Извеков Ю.А. О подходе к оценке техногенной безопасности металлургического производства // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6 – С. 32–33. – URL: www.rae.ru/use/?section = content&op = show_article&article_id = 9999573 (дата обращения: 25.03.2013).

6. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. – М.: КомКнига, 2006. – 472 с: ил.

7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – 10-е изд. – М.: МГТУ, 1999.

8. Бирюков М.П. Динамика и прогнозирующий расчет механических систем. – Минск: «Вышэйшая школа», 1980. – 189 с: ил.

9. Расчетная динамическая схема. [Электронный ресурс] // ООО «Аркон». Грузоподъемное оборудование: сайт. – URL: http://arcon-t.ru/raschetnie-dinamicheskie-schemi/raschetnaya-dinamicheskaya-schema (дата обращения: 18.03.2013).

References

1. Bezopasnost' Rossii. Pravovye, social'no-e'konomicheskie i nauchno-texnicheskie aspekty. V 4-x chastyax // Ch.1. Osnovy analiza i regulirovaniya bezopasnosti: Nauchn. rukovod. K.V. Frolov, Maxutov N.A. M.: MGF «Znanie», 2006. 640 p: il.

2. Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej. M.: Nauka, Fizmatgiz, 1969 576 p.

3. Izvekov Yu.A. Analiz texnogennoj bezopasnosti kranovogo xozyajstva Rossii // Sovremennye naukoemkie texnologii. 2012. no. 12 pp. 18–19. URL: www.rae.ru/snt/?section = content&op = show_article&article_id = 10000338 (data obrashheniya: 20.03.2013).

4. Izvekov Y.A., Loseva N.A. Metodologiya prognozirovaniya riska metallurgicheskogo proizvodstva kak slozhnoj social'no-prirodno-texnogennoj sistemy. Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem) «Aktual'nye problemy razvitiya nauki, obrazovaniya i kul'tury». Sibaj, filial BashGU, 2012. pp. 352–354.

5. Krylova E.A., Izvekov Yu.A. O podxode k ocenke texnogennoj bezopasnosti metallurgicheskogo proizvodstva // Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. 2012. no. 6 pp. 32–33. URL: www.rae.ru/use/?section = content&op = show_article&article_id = 9999573 (data obrashheniya: 25.03.2013).

6. Stepanov V.V. Kurs differencial'nyx uravnenij. KomKniga, 2006, 472 p: il.

7. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov. Izd. 10-e. MGTU. M., 1999.

8. Biryukov M.P. Dinamika i prognoziruyushhij raschet mexanicheskix sistem. «Vyshe'jshaya shkola», Minsk, 1980. 189 p: il.

9. Raschetnaya dinamicheskaya sxema. [E'lektronnyj resurs] // OOO «Arkon». Gruzopod»emnoe oborudovanie: sajt. URL: http://arcon-t.ru/raschetnie-dinamicheskie-schemi/raschetnaya-dinamicheskaya-schema (data obrashheniya: 18.03.2013).

Рецензенты:

Черчинцев В.Д., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии безопасности жизнедеятельности, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск;

Корнилов С.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой промышленного транспорта, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск.

Работа поступила в редакцию 11.04.2013.