

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА МЕХАНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ РАССЕЙЯНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЕ МАТЕРИАЛА

Извеков Ю.А., Банатурский Н.В.

*ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38), e-mail: maijor076767@mail.ru*

Определена вероятность выхода из строя механической системы несущей конструкции главной балки металлургического мостового крана. Вероятность рассчитывается с учетом рассеяния прочностных характеристик материала конструкции на основе теории «выбросов». Современные конструкции находятся под воздействием стационарных случайных сил большой интенсивности. «Выбросы» нагрузок при этом могут привести, в том числе, к отказу системы. В качестве выходного параметра рассматривается нагрузка, действующая на рассматриваемую механическую систему – несущую конструкцию – главную балку металлургического мостового крана. Предельный уровень нагрузки определяется режимом нагружения и отклонениями прочностных характеристик материала элементов конструкций системы. Случайный стационарный процесс принимается распределенным нормально. Для обеспечения высокой надежности элементов механической системы необходимо, чтобы вероятность отказа любого из них была малой величиной. Приведены зависимости для нахождения вероятности выхода из строя рассматриваемой механической системы. Выражение для запаса прочности содержит параметры, характеризующие случайный входной процесс  $\sigma_Q$  и выходные параметры этого процесса  $Q_d^{cp}$ , а также параметры рабочего состояния системы через  $|U_{Q_d}(0)|$  и показатель разброса прочностных характеристик материала  $\sigma_{Q_{\sigma}}$ . Расчеты приводились для реальных режимов нагружения металлургического мостового крана, исходя из его эксплуатации и прочностных характеристик. Полученная вероятность выхода из строя системы позволяет перейти к оценке конструкционного риска как локального, объектового, так и местного, регионального, а также предусмотреть меры по его снижению на всех этапах жизненного цикла рассматриваемых механических систем.

Ключевые слова: несущая конструкция металлургического мостового крана, вероятность выхода из строя, теория выбросов, механическая система, конструкционный риск, рассеяние прочностных характеристик, действующая нагрузка.

## DETERMINING THE PROBABILITY OF FAILURE OF MECHANICAL DESIGN, TAKING INTO ACCOUNT THE SCATTERING OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF ITS MATERIAL

Izvekoy Y.A., Banaturskiy N.V.

*Magnitogorsk state technical university of G.I. Nosova, Magnitogorsk, Russia, (455000, Magnitogorsk, Lenin's avenue, 38 ) e-mail: maijor076767@mail.ru*

The probability of failure of mechanical system of the bearing design of the main beam of the metallurgical bridge crane is defined. The probability calculates taking into account dispersion of strength characteristics of material of a design on the basis of the theory of "emissions". Modern designs are under the influence of stationary casual forces of big intensity. "Emissions" of loadings thus can bring, including, to refusal of system. As output parameter loading, the considered mechanical system operating on – the bearing design - the main beam of the metallurgical bridge crane is considered. The limit of loading is defined by the mode of loading and rejections of strength characteristics of material of elements of designs of system. Casual stationary process is accepted distributed normally. It is necessary for ensuring high reliability of elements of mechanical system that the probability of refusal of any of them was small size. Dependences for finding of probability of failure of the considered mechanical system are given. Expression for margin of safety contains the parameters characterizing casual entrance process  $\sigma_Q$  by  $Q_d^{cp}$  output parameters of this process of  $Q_d^{cp}$ , and also parameters of a working condition of system through  $|U_{Q_d}(0)|$  and an indicator of dispersion of strength characteristics of material  $\sigma_{Q_{\sigma}}$ . Calculations were given for the real modes of loading of the metallurgical bridge crane, proceeding from its operation and strength characteristics. The received probability of failure of system allows to pass to an assessment of constructional risk as local, object, and local, regional, and also to provide measures for its decrease at all stages of life cycle of the considered mechanical systems.

Keywords: the bearing design of the metallurgical bridge crane, probability of failure, the theory of emissions, mechanical system, constructional risk, dispersion of strength characteristics, the operating loading.

Исследования по проблемам анализа, нормирования и снижения конструкционных рисков на промышленных предприятиях различных уровней, начиная от регионального и дальше до национального и международного становятся все более актуальными и перспективными. Особое место здесь занимает так называемая теория «выбросов». Современные конструкции находятся под воздействием стационарных случайных сил большой интенсивности. «Выбросы» нагрузок при этом могут привести, в том числе, к отказу системы. Представляется важным вопрос определения вероятности отказа механических систем промышленного значения с учетом прочностных характеристик материала исследуемых конструкций.

Будем рассматривать в качестве выходного параметра нагрузку, действующую на рассматриваемую механическую систему [2, 3 - 15] – несущую конструкцию – главную балку металлургического мостового крана. Предельный уровень нагрузки определяется режимом нагружения и отклонениями прочностных характеристик материала элементов конструкций системы [2]. Примем случайный стационарный процесс распределенным нормально. Для обеспечения высокой надежности элементов механической системы необходимо, чтобы вероятность отказа любого из них была малой величиной. Таким образом, выразим вероятность выхода из строя рассматриваемой механической системы как:

$$P \approx \sum_{i=1}^N P_i^{\text{от}} n_i, \quad (1)$$

где  $N$  – число разнотипных элементов системы;  $P_i^{\text{от}}$  – вероятность отказа  $i$ -ого разнотипного элемента,  $n_i$  – число однотипных элементов.

Запишем условие разрушения лимитирующего элемента:

$$Q_{\text{д}}^* - Q_{\text{д}}^{\text{сп}} = Q_{\text{св}} < 0, \quad (2)$$

принимая закон распределения  $Q_{\text{д}}^*$  и  $Q_{\text{д}}^{\text{сп}}$  нормальным.

$Q_{\text{д}}^*$  – действующая распределенная нагрузка на балку моста;

$Q_{\text{д}}^{\text{сп}}$  – средняя действующая распределенная нагрузка на балку моста;

$Q_{\text{св}}$  – величина нагрузки, соответствующей пределу прочности балки моста.

Соответственно, распределение  $Q_{\text{св}}$  тоже будет нормальным с плотностью вероятности

$$p(Q_{\text{св}}) = \frac{1}{\sigma_{Q_{\text{св}}} \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{(Q_{\text{св}} - m(Q_{\text{св}}))^2}{2 \sigma_{Q_{\text{св}}}^2} \right), \quad (3)$$

где  $m(Q_{\text{св}})$  – математическое ожидание распределенной нагрузки предела прочности балки;

$\sigma_{Q_{\sigma B}}$  – среднее квадратическое отклонение.

Используя плотность (3), вероятность выхода из строя через функцию Лапласа:

$$P^A = \frac{1}{2} - F \left[ \frac{m(Q_{\sigma B})}{\sigma_{Q_{\sigma B}}} \right]. \quad (4)$$

На основании [2]  $\frac{m(Q_{\sigma B})}{\sigma_{Q_{\sigma B}}}$  в формуле принимаем как:

$$\frac{m(Q_{\sigma B})}{\sigma_{Q_{\sigma B}}} = k_v (n_0 - 1), \quad (5)$$

$k_v$  – коэффициент нагруженности, зависящий от средней величины распределенной нагрузки и рассеивания предельной и действующей нагрузок  $k_v = \frac{Q_{\sigma B}^{cp}}{\sigma_{Q_{\sigma B}}}$ ,

Величина запаса прочности элементов на основании анализа случайного процесса нагружения:

$$n_0 = \frac{Q_{\sigma B}^*}{Q_{\sigma B}^{cp}} = 1 + \left\{ \frac{2\sigma_{\sigma B}^2 L n \left[ \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_{\sigma B}}} |U_{Q_{\sigma B}}(0)| \right]}{Q_{\sigma B}^{cp2}} \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

Выражение для запаса прочности содержит параметры, характеризующие случайный входной процесс  $\sigma_Q$  и выходные параметры этого процесса  $Q_{\sigma B}^{cp}$ , а также параметры рабочего состояния системы через  $|U_{Q_{\sigma B}}(0)|$  и показатель разброса прочностных характеристик материала  $\sigma_{Q_{\sigma B}}$ .

Тогда (4) с учетом (6) примет вид:

$$P^A = \frac{1}{2} - F \left\{ \frac{k_v \sqrt{2} \sigma_{Q_{\sigma B}}}{Q_{\sigma B}^{cp}} (L n \left[ \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_{\sigma B}}} |U_{Q_{\sigma B}}(0)| \right])^{1/2} \right\}. \quad (7)$$

Подсчитаем вероятность выхода из строя системы, подставив выражение из (7) в (1). При рассматриваемых  $Q_{\sigma B}^{cp} = 165$  МПа и  $\sigma_{Q_{\sigma B}} = 65,23$  коэффициент нагруженности будет равен  $k_v = 2,54$ , а вероятность выхода из строя несущей конструкции – главной балки моста металлургического крана  $P = 0,081$ .

В работах [1, 2, 4, 5] показано, что обобщающее условие анализа и управления безопасностью можно представить в форме:

$$R(t) = \sum_i P_i(t) \cdot U_i(t) \leq [R(t)] = \frac{R_c(t)}{n_R} = m_Z Z(t). \quad (8)$$

В таблице 1 [1] приведены сравнительные данные о величинах ущербов  $U$ , вероятностей  $P$  и экономических рисков от единичных аварий и катастроф различного класса опасности.

**Таблица 1**

### Характеристики экономических ущербов и рисков

Класс	Масштаб аварии или катастрофы	Ущерб, у.е	Вероятность возникновения P,1/год	Риск, у.е./год
1	Локальный	1,0E+03	20	2,0E+04
2	Объектовый	1,0E+05	8	8,0E+05
3	Местный	1,0E+07	1,2	1,2E+07
4	Региональный	1,0E+08	0,3	3,0E+07
5	Национальный	1,0E+10	0,07	7,0E+08
6	Глобальный	1,0E+11	0,03	3,0E+09
7	Планетарный	1,0E+12	0,01	1,0E+10

Полученная вероятность выхода из строя конструкции позволяет по (8) и таблице 1 перейти к оценке риска 2 класса и определить меры по снижению конструкционного риска.

Определенная вероятность отказа конструкции системы – несущей конструкции главной балки металлургического мостового с учетом рассеяния ее механических характеристик на основе теории «выбросов» позволяет перейти к оценке риска как локального, объектового, так и местного, регионального, а также предусмотреть меры по его снижению на всех этапах жизненного цикла.

### Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. // Ч.3. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов: Научн. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2007. – 816 с: ил.
2. Бирюков М. П. Динамика и прогнозирующий расчет механических систем. // «Высшая школа». - Минск, 1980. – 189 с: ил.
3. Извеков Ю. А. Анализ техногенной безопасности кранового хозяйства России. // Современные наукоемкие технологии. - Москва, РАЕ, 2012. - № 12. С. 18-19.
4. Извеков Ю. А., Кобелькова Е. В., Лосева Н. А. Анализ динамики и вопросы оптимизации металлургических мостовых кранов. // Фундаментальные исследования. - Москва, РАЕ, 2013. - № 6-2. С. 263-266.
5. Извеков Ю. А. Риск-анализ оборудования металлургических производств. Подход, концепция, анализ. Монография. - Saarbrücken, Deutschland. LAP Lambert, 2013. – 56 с.

6. Извеков Ю. А. Моделирование прогнозирования риска несущих конструкций кранов металлургического производства. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. - Магнитогорск, МГТУ, 2012. № 70, Т. 1. С. 6-8.
7. Извеков Ю. А. Математическое моделирование оценки упругопластической деформации несущих конструкций механических систем. // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 октября 2013: в 26 частях. Часть 15; М-во обр. и науки. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. С. 57-58.
8. Извеков Ю. А. Прогнозирование надежности несущих конструкций кранов металлургических производств. Вопросы. Гипотезы. Ответы: Наука XXI века: Коллективная монография. – Краснодар, 2013. Книга 6, часть 3, глава 9. С. 189-211.
9. Извеков Ю. А., Кузина Т. Г. Оценка упругопластической деформации на основе метода преобразования вероятностей. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 6; URL: [www.science-education.ru/113-10810](http://www.science-education.ru/113-10810) (дата обращения 14.05.2014).
10. Izvekov Y.A., Dubrovsky V.V., Hamutskikh E.Y. Mathematical Modeling and Calculation of Accuracy and Durability of Mechanical Systems' Elements. // World Applied Sciences Journal 30 (1): pp. 32-34, 2014
11. Извеков Ю.А. Вероятностный синтез сложной механической системы // Молодой ученый. – 2014. - № 4. – С. 179-182.
12. Izvekov Y.A., Kobelkova E.V., Loseva N.A. Numerical calculation of durability and reliability using correlation method. Life Science Journal, 2014. № 11(8s), pp. 272-274.
13. Першин Г.Д., Уляков М.С. Анализ влияния режимов работы канатных пил на себестоимость отделения монолитов камня от породного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 125-135.
14. Першин Г.Д., Уляков М.С. Анализ влияния режимов работы канатных пил на эффективность отделения монолитов природного камня от массива // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. №4 (48). С. 14-21.
15. Першин Г.Д., Уляков М.С. Повышение эффективности разработки месторождений блочного высокопрочного камня // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 7. С. 10-18.

**Рецензенты:**

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

Бигеев В.А., д.т.н., профессор, директор института машиностроения, металлургии и металлообработки МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск.