УДК 624.21.05

Схема управления техническим состоянием искусственных сооружений

Оксана КОС

Oksana I. KOS

Кос Оксана Игоревна – *аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования транспортных конструкций и сооружений» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

Scheme of Control of Engineering Structures' Technical Condition
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – *p. 202)*

Надёжность искусственных сооружений на железных дорогах напрямую связана с обеспечением безопасности жизни пассажиров и грузов. Предложенная схема управления техническим состоянием пролётного строения позволяет с большой точностью рассчитывать надёжность конструкции и прогнозировать её изменения, гибко реагировать на динамику эксплуатационных условий, а также осуществлять оптимальное руководство процессами по критерию «надёжность–затраты».

Ключевые слова: *железная дорога, инженерные сооружения, пролётное строение, надёжность, безопасность, рекуррентный алгоритм, оптимальный интервал.*

В соответствии с ГОСТ Р 54257-2010 [1] надежность строительного объекта определяется как его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации, а расчетный срок службы – это установленный в строительных нормах или задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием. Расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации объекта или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции.

Следовательно, расчётный срок службы определяется априори, т.е. до начала эксплуатации, на основе среднестатистических данных. Поэтому элементы искусственных сооружений заменяются или ремонтируются через нормируемые межремонтные сроки.

Для учета изменений эксплуатационных условий (меняющаяся поездная нагрузка, непостоянная интенсивность движения, переменные климатические условия) с целью обеспечения требуемой надежности необходимо искусственные сооружения на железных дорогах использовать по фактическому техническому состоянию.

Чтобы определить срок службы и другие показатели надежности искусственного сооружения не по нормируемым межремонтным срокам, а по фактическому техническому состоянию, следует построить вероятностную модель искусственного сооружения как сложной технической системы. Вероятностная модель позволит спрогнозировать срок службы искусственного сооружения с обеспечением заданной вероятности безотказной работы.

Для эффективной эксплуатации искусственного сооружения нужно осуществлять замены или ремонты элементов не по нормируемым срокам, а в соответствии с результатами расчетов по вероятностной модели с учетом технического фактического состояния.

Поскольку срок эксплуатации искусственного сооружения меньше, чем срок эксплуатации любого из его элементов, необходимо с помощью вероятностной модели рассчитывать, то есть прогнозировать, срок эксплуатации всего искусственного сооружения.

Расчет надежности всего искусственного сооружения как сложной технической системы можно производить по построенному рекуррентному методу, изложенному в статье [2].

Для железнодорожных мостов вероятность безотказной работы элементов металлических пролетных строений, учитывая высокие требования к безопасности эксплуатации, не должна опускаться ниже 0,9845 [3]. Поэтому для всего пролетного строения надо определить момент времени эксплуатации или, что то же самое, прошедшую поездную нагрузку, когда вероятность безотказной работы достигла 0,9845.

Поскольку срок замены всего пролетного строения наступает раньше, чем срок ремонта (замены) его элементов, для продления срока службы всего искусственного сооружения предстоит заменять его отдельные элементы. В первую очередь те элементы, срок ремонта (замены) которых наступает раньше, чем у других. Для совокупных целей здесь лучше всего использовать алгоритм расчета оптимального интервала предупредительных замен [4]. Далее из всех оптимальных интервалов нужно выбрать наименьший интервал, то есть выбрать элемент, который планируется заменять раньше всех элементов.

Для расчета методом оптимальных интервалов предупредительных замен необходимо представить искусственное сооружение как сложную техническую систему, состоящую из большого количества взаимосвязанных элементов, что можно сделать следующим образом.

Для каждого элемента задается своя функция распределения вероятности безотказной работы:

– функция распределения такой вероятности выбирается по принципам, изложенным в статье [5], оптимальным выбором является функция распределения Вейбулла, для которой нужно задать два параметра; при отсутствии данных обследования параметры подбираются согласно рекомендованной теории;

– по данным обследования рассчитываются параметры выбранной функции распределения вероятности безотказной работы для каждого элемента металлического пролетного строения.

При определении параметров функции распределения вероятности безотказной работы необходимо провести обследование искусственного сооружения. По ходу обследования для каждого элемента искусственного сооружения рассчитывается балльная оценка его технического состояния с помощью специальной инструкции [6]. Затем балльная оценка может быть переведена в меру повреждения по методике, изложенной в статье [5]. Зависимость вероятности безотказной работы от меры повреждения, согласно методике в монографии [3], строится по нормальному закону:

$$F(\nu)=\frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\nu}\frac{e^{-(\nu-m)^2}}{2\sigma^2}d\nu, \qquad (1)$$

где ν – мера повреждения элемента искусственного сооружения;

m – математическое ожидание меры повреждения, при которой наступил отказ;

σ – стандартное отклонение меры повреждения, при котором наступил отказ.

По полученной таким способом после проведения одного обследования вероятности безотказной работы и известной прошед-

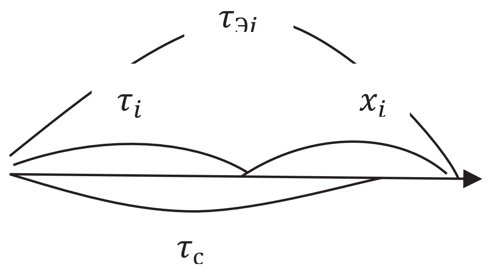


Рис. 1. Соотношение интервалов $\tau_{эi}$, τ_i, τ_c, x_i.

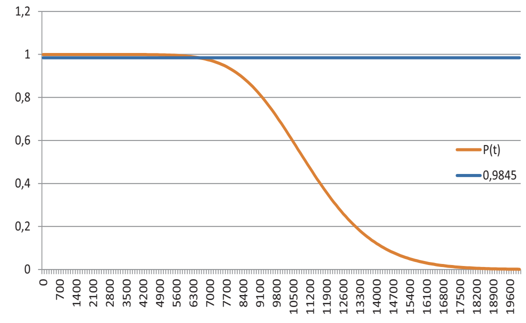


Рис. 2. Вероятность безотказной работы пролетного строения моста через р. Нерусса.

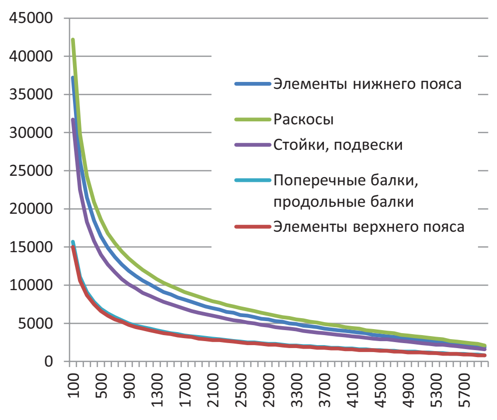


Рис. 3. Зависимость оптимального интервала τ_i от предупредительного интервала x_i.

шей нагрузки к моменту этого обследования вычисляется один из параметров функции распределения. При проведении двух обследований можно вычислить оба параметра функции распределения вероятности безотказной работы, которые в ходе последующих обследований будут только уточняться. Таким образом, для каждого элемента искусственного сооружения подбираются и впоследствии уточняются свои параметры функции распределения Вейбулла.

Далее с помощью рекуррентного метода [2] рассчитывается вероятность безотказной работы всего сооружения в заданный момент времени или, что то же самое, при заданном значении пропущенной нагрузки. Следовательно, получаем зависимость вероятности безотказной работы всего искусственного сооружения от прошедшей нагрузки. По найденной зависимости можно рассчитать момент времени τ_c, при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы P = 0,9845.

Рассмотрим металлическое пролетное строение искусственного сооружения, в котором количество элементов обозначим через n. Чтобы эксплуатировать искусственное сооружение по критерию минимума экономических затрат при максимуме надежности, необходимо осуществлять ремонты (замены) отдельных элементов искусственного сооружения через оптимальные интервалы $\tau_1, \tau_i, ..., \tau_n$, рассчитанные с помощью метода оптимальных интервалов ремонтов (замен) элементов [4].

Оптимальный интервал ремонтов (замен) зависит от времени, в течение которого элемент должен гарантированно проработать для того, чтобы за это время осуществить его ремонт или замену с учетом возможных задержек, т.е. от длительности предупредительного интервала x. Для оптимальной эксплуатации следует выбрать наименьший из таких интервалов.

Для любого i-го элемента искусственного сооружения справедливо следующее неравенство:

$$x_i + \tau_i = \tau_{эi} > \tau_c, \quad (2)$$

где x_i – предупредительный интервал для i-го элемента;

τ_i, $i = 1,...n$ – оптимальный интервал для i-го элемента;

$\tau_{эi}$, $i = 1,...n$ – сумма оптимального интервала τ_i и предупредительного интервала x_i для i-го элемента;

τ_c – интервал ремонта (замены) искусственного сооружения;

n – количество элементов в искусственном сооружении.

Это неравенство представлено графически на рис. 1.

Чтобы искусственное сооружение соответствовало требованиям надежности, необходимо начать заменять элементы искусственного сооружения с наименьшими оптимальными интервалами τ_{min} и, следовательно, с наименьшим интервалом $\tau_{эmin}$, равным сумме τ_{min} и x_{min}, для таких элементов за интервал x до момента времени, когда предстоит заменить все искусственное сооружение, т.е. оптимальный интервал для таких элементов уменьшается на время $\tau = \tau_{эmin} - \tau_c$. Таким образом, получаем:

$$\tau_{min} + x_{min} - \tau = \tau_{эmin} - \tau \leq \tau_c, \qquad (3)$$

где x_{min} – предупредительный интервал для такого элемента;

τ_{min} – наименьший оптимальный интервал;

$\tau_{эmin}$ – сумма оптимального интервала τ_{min} и предупредительного интервала x_{min} для элемента;

τ_c – интервал ремонта (замены) искусственного сооружения.

Построим схему управления техническим состоянием на весь период эксплуатации моста на реке Нерусса, расположенного на 478 км II-го пути участка Брянск–Суземка Брянск-Льговской дистанции пути. Мост имеет металлические пролетные строения с ездой понизу проектировки Гипротранса НКПС 1931 года, под расчетную нагрузку Н-7.

Рассчитанный интервал ремонта (замены) по рекуррентному методу для металлического пролетного строения моста, пропускающего реку Нерусса, составляет τ_c = 6536 млн т при вероятности безотказной работы.

Для различных типов элементов металлического пролетного строения рассматриваемого моста рассчитаны оптимальные интервалы их замены. Зависимость оптимального интервала от предупредительного для различных типов элементов металлического пролетного строения представлена на рис. 3.

Из элементов, для которых рассчитаны оптимальные интервалы замены, выбраны элементы с наименьшими оптимальными интервалами. Такими элементами являются элементы верхнего пояса, оптимальный интервал замен для которых τ_{min} = 6000 млн т при предупредительном интервале x_{min} = 600 млн т.

Таким образом, оптимальный интервал замены металлического пролетного строения, то есть всей системы, τ_c = 6536 млн т меньше наименьшего интервала $\tau_{эmin}$, равного сумме τ_{min} = 6000 млн т и x_{min} = 600 млн т. Следовательно, оптимальный интервал для элементов верхнего пояса следует уменьшить на время, равное τ = 6600–536 = 64 млн т. То есть начать ремонт верхнего пояса металлического пролетного строения необходимо через τ_{min} = 6000–64 = 5936 млн т, а τ_{min} и x_{min} = 600 млн т.

Предложенная схема управления техническим состоянием пролетного строения позволяет с большой точностью рассчитывать ожидаемую надежность и прогнозировать её изменения, гибко реагировать на динамику эксплуатационных условий, а также осуществлять оптимальное управление по критерию «надежность-затраты».

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 54257–2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. Введ. 01.09.2011.

2. Кос О. И. Рекуррентный алгоритм расчета и прогнозирования вероятности безотказной работы искусственных сооружений// Транспортное строительство.– 2016.– № 6.– С. 16–20.

3. Осипов В. О. Долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов.– М.: Транспорт, 1982.– 287 с.

4. Смирнов В. Ю., Кос О. И. Оптимальный интервал предупредительных замен для искусственных сооружений железных дорог// Мир транспорта.– 2013.– № 1.– С. 152–155.

5. Кос О. И. Прогноз износа металлических мостовых пролетов // Мир транспорта.– 2014.– № 5.– С. 82–89.

6. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации / Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД» – М., 2006.– 120 с.

7. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем.– СПб.: Политехника, 2000.– 248 с.

8. Integrated Life-time Engineering of Buildings and Civil Infrastructures // 2nd International Symposim. 2003, 640 p.

9. Barlow R. E., Proschan F. Mathematical Theory of Reliability// New York: Wiley, 1965. 258 p.

10. Walley P. Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities. Chapman and Hall, London, 1991, 706 p.

11. Linzhong D. Artificial Intelligence Techniques for Bridge Reliability assessment., 2011, 188p.

Координаты автора: **Кос О. И.** – kosoksana90@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 10.05.2016, принята к публикации 19.08.2016.

SCHEME OF CONTROL OF ENGINEERING STRUCTURES' TECHNICAL CONDITION

Kos, Oksana I., *Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.*

ABSTRACT

Reliability of artificial structures on the railways is directly related to safety of life of passengers and cargo. The proposed scheme of control of technical condition of the span allows to calculate with a great precision design reliability and to predict its changes, to respond flexibly to the dynamics of the operating conditions, as well as to control optimally the processes by the criterion «reliability–cost».

Keywords: *railway engineering structures, span, reliability, security, recursive algorithm, optimal interval.*

Background. *In accordance with GOST R54257–2010 [1], the reliability of the construction object is defined as its ability to perform its required function over the estimated useful life and estimated lifetime is a set in the building code or the design assignment period of use of the construction object according to its purpose until overhaul and (or) reconstruction with prescribed maintenance. Design life is measured from the start of operation of the facility or resumption of its operation after major repairs or reconstruction.*

Consequently, the expected lifetime is determined a priori, i.e. before the start of operation, based on average data. Therefore, elements of artificial structures are replaced or repaired through the normalized period between repairs.

Objective. *The objective of the authors is to consider a scheme of control of technical condition of artificial structures.*

Methods. *The author uses general scientific and engineering methods, mathematical calculation, evaluation approach, graph construction.*

Results. *To account for changes in operating conditions (varying train load, non-constant traffic intensity, changing climatic conditions) in order to ensure the required security artificial structures should be used on railways according to the actual technical condition.*

To determine the service life and other indicators of reliability of artificial structures by not normalized period between overhaul, and based on the actual technical state it is necessary to build a probabilistic model of an artificial structure as of a complex technical system. The probabilistic model will allow to predict the service life of an artificial structure with a certain probability of failure-free operation.

For efficient operation of artificial structure it is necessary to carry out replacement or repair of elements not according to the normalized terms, but in accordance with the results of calculations on a probability model considering the actual technical condition.

Since the service life of artificial constructions is less than the life of any of its elements, it is necessary with the probalistic model to calculate, that is, to predict service life of the entire man-made structure.

Calculation of reliability of the entire man-made structure as complex technical systems can be built on the built recursion method described in the article [2].

For railway bridges the probability of failure-free operation of elements of metal spans, given the high safety requirements for operation, should not fall below 0.9845 [3]. Therefore it is necessary to determine the moment of the operating time for the entire superstructure, or what is the same, passed train load, when the probability of failure-free operation reached 0.9845.

Since the terms of replacing the entire superstructure comes earlier than the period of repair (replacement) of its elements, to extend the life of the entire man-made structure it is necessary to replace its individual elements. First of all those elements, the repair time (replacement) of which comes earlier than others. For cumulative purposes here it is best to use the algorithm for calculating the optimal range of preventive replacements [4]. Further, of all optimal intervals it is necessary to use the smallest interval, that is, to select the element, which is scheduled to be replaced before all elements.

For the calculation by the method of optimal intervals of preventive replacements an artificial structure should be represented as a complex technical system, consisting of a large number of interrelated elements that can be done as follows.

For each element, its function of distribution of probability of failure-free operation is set:

– distribution function of such probability is selected by the principles set out in article [5], the best choice is a distribution function of Weibull for which it is necessary to set two parameters; in the absence of survey data parameters are selected according to a recommended theory;

– according to the survey data the parameters of the selected function of distribution of probability of failure-free operation is calculated for each element of the metal superstructure.

In determining the parameters of distribution function of probability of failure-free operation it is necessary to conduct a survey of artificial constructions. In the course of the survey for each element of artificial constructions numerical score of its technical condition is calculated with the help of special instruction [6]. Then numerical score can be transferred into a measure of damage following the procedure laid down in article [5]. The dependence of probability of failure-free operation on the measure of damage, according to the procedure in the monograph [3], is built on the normal law:

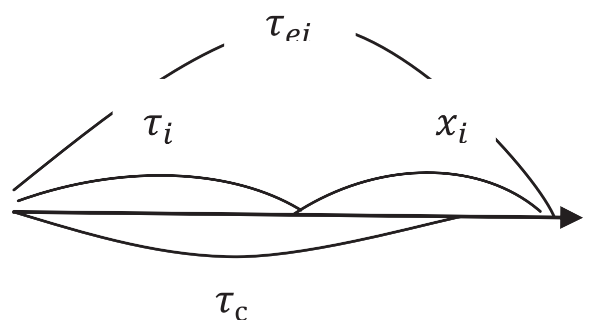
$$F(\nu)=\frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\nu}\frac{e^{-(\nu-m)^2}}{2\sigma^2}d\nu, \qquad (1)$$

where ν – measure of damage of the element of the artificial structure;

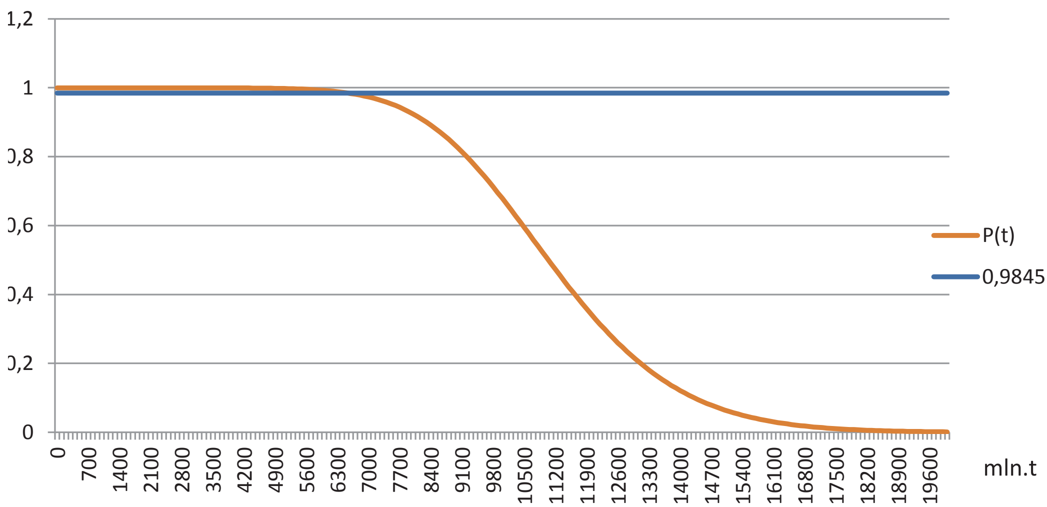
m – mathematical expectation of the damage measure at which the failure occurred;

σ – standard deviation of the measures of damage, at which the failure occurred.

By the probability of failure-free operation obtained after a survey in such a way and passed load to the time of the survey one of the parameters of the distribution function is calculated. During two surveys both parameters of the distribution function of the probability of failure-free operation can be calculated, which during future surveys will only be specified.



Pic. 1. The ratio of intervals τ_{ei}, τ_i, τ_c, x_i.



Pic. 2. Probability of failure-free operation of the superstructure of the bridge over the river Nerussa.

Thus, for each element of the artificial structures the parameters of the Weibull distribution function are selected and subsequently refined.

Then, using the recursive method [2] the probability of failure-free operation of all facilities at a given time, or what is the same, for a given value of missed load is calculated. Consequently, we obtain the dependence of the probability of failure-free operation of the entire artificial construction from the passed load. According to the found dependence can be calculated time τ_c, *at which the critical level of probability of failure-free operation P = 0.9845 is reached.*

Let's consider the metal superstructure of artificial structure, in which the number of elements is denoted by n. To operate the artificial construction on the criterion of the minimum economic costs with a maximum of reliability, it is necessary to carry out repairs (replacement) of individual elements of artificial structures through optimal intervals $\tau_1, \tau_i, \ldots, \tau_n$, *calculated using the method of optimal intervals of repair (replacement) of elements [4].*

Optimal interval of repair (replacement) depends on time during which the element must be guaranteed to work in order to carry out during this time its repair or replacement with a view of possible delays, i.e. duration of the alert interval x. For optimal operation, the smallest of these intervals should be selected.

For any i-th element of the artificial facility the following inequation is fair:

$$x + \tau_i = \tau_{ei} > \tau_c, \qquad (2)$$

where x_i *– preventive interval for the i-th element;*

τ_i, *i = 1,...n – optimal interval for the i-th element;*

τ_{ei}, *i = 1,...n – sum of the optimal interval* τ_i *and preventive element* x_i *for the i-th element;*

τ_c *– interval of repair (replacement) of the artificial structure;*

n – number of elements in the artificial structure.

This inequation is represented graphically in Pic. 1.

In order that the artificial structure corresponds with the requirements of reliability, it is necessary to begin to replace the elements of the artificial structure with the smallest optimal intervals τ_{min} *and, consequently, with the smallest interval* τ_{emin} *equal to the sum* τ_{min} *and* x_{min}, *for these elements during the interval x to the time when it is necessary to replace the entire artificial structure, i.e. the optimum interval for these elements is reduced by the time* $\tau = \tau_{emin} - \tau_c$. *Thus, we obtain:*

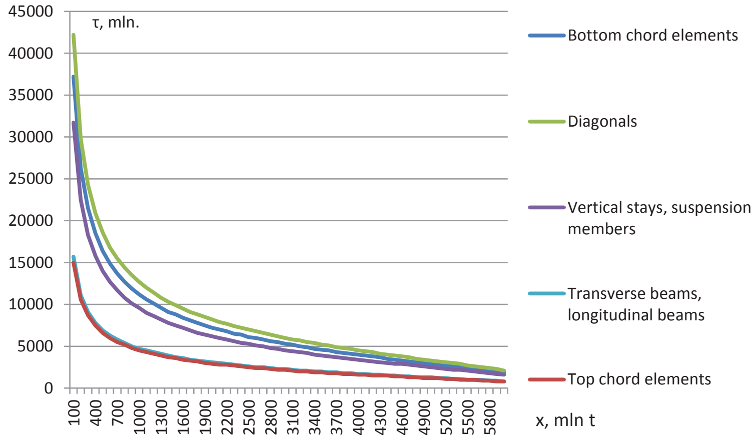
$$\tau_{min} + x_{min} - \tau = \tau_{emin} - \tau \le \tau_c, \qquad (3)$$

where x_{min} *– preventive interval for this element;*

τ_{min} *– the lowest optimal interval;*

τ_{emin} *– sum pf the optimal interval* τ_{min} *and preventive interval* x_{min} *for the element;*

τ_c *– interval of repair (replacement) of the artificial structure.*



Pic. 3. Dependence of the optimal interval τ_i on preventive interval x_i.

Let's build a scheme of control of technical condition for the entire period of operation of the bridge on the river Nerussa, located at 478 km of II track of the section Bryansk–Suzemka of Bryansk–Lgov maintenance section. The bridge has metal spans roadway on bottom boom designed by Giprotrans of People's Commissariat for Lines of Communication of 1931, under the design load H-7.

The calculated interval of repair (replacement) under the recurrence method for the metal superstructure of the bridge overlooking a river Nerussa is τ_c= 6536 mln t at a probability of failure-free operation

For different types of elements of the metal superstructure of the bridge under consideration optimal replacement intervals were calculated. The dependence of the optimal interval from preventive intervals for different types of elements of the metal superstructure is shown in Pic. 3.

Of the elements for which the optimal intervals of replacement were calculated, elements with the least optimal intervals were selected. These elements are the elements of the upper zone, the optimal replacement interval for which is τ_{min} = 6000 mln tons with a preventive signal x_{min} = 600 mln tons.

Thus, an optimal replacement interval of the metal superstructure, i.e. the entire system, τ_c= 6536 mln tons less than the lowest interval τ_{emin}, equal to the sum of τ_{min} = 6000 mln tons and x_{min} = 600 mln tons. Therefore, the optimal interval for the top chord elements should be reduced by time equal to τ = 6600–536 = 64 mln tons That is, it is necessary to start repairing elements of the top chord of the metal superstructure must be in τ_{min} = 6000–64 = 5936 mln tons and τ_{min} and x_{min} = 600 mln tons.

Conclusion. *The proposed scheme of control of the technical condition of the superstructure allows more accurately to calculate its reliability and to predict its changes, to respond flexibly to the dynamics of the operating conditions, as well as to carry out the optimal control by the criterion of «reliability–cost».*

REFERENCES

1. GOST R54257–2010. Reliability of constructions and foundations. Fundamentals and requirements. Introduced on 01.09.2011 [*GOST R54257–2010. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozhenija i trebovanija. Vved. 01.09.2011*].

2. Kos, O. I. Recursive algorithm for calculating and predicting the probability of failure-free operation of artificial structures [*Rekurrentnyj algoritm rascheta i prognozirovanija verojatnosti bezotkaznoj raboty iskusstvennyh sooruzhenij*]. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2016, Iss. 6, pp. 16–20.

3. Osipov, O. Durability of metal superstructures of operated railway bridges [*Dolgovechnost' metallicheskih proletnyh stroenij ekspluatiruemyh zheleznodorozhnyh mostov*]. Moscow, Transport publ., 1982, 287 p.

4. Smirnov, V. Yu., Kos, O. I. Optimum Time Spans of Preventive Replacements for Railway Engineering Structures. *World of Transport and Transportation*, Vol. 11, 2013, Iss. 1, pp. 152–155.

5. Kos, O. I. Forecast of Wear of Metal Bridge Spans. *World of Transport and Tranposrtation*, Vol. 12, 2014, Iss. 5, pp. 82–89.

6. Instruction on evaluation of state and maintenance of artificial structures on the railways of the Russian Federation / Department of track and structures of JSC Russian Railways [*Instrukcija po ocenke sostojanija i soderzhanija iskusstvennyh sooruzhenij na zheleznyh dorogah Rossijskoj Federacii / Departament puti i sooruzhenij OAO «RZhD»*]. Moscow, 2006, 120 p.

7. Ryabinin, I. A. Reliability and safety of structurally complex systems [*Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnyh system*].St.Petersburg, Politehnika publ., 2000, 248 p.

8. Integrated Life-time Engineering of Buildings and Civil Infrastructures // 2nd International Symposim. 2003, 640 p.

9. Barlow, R.E., Proschan, F. Mathematical Theory of Reliability. New York, Wiley, 1965, 258 p.

10. Walley, P. Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities. London, Chapman and Hall, 1991, 706 p.

11. Linzhong, D. Artificial Intelligence Techniques for Bridge Reliability assessment, 2011, 188p.

Information about the author:
Kos, Oksana I. – Ph.D. student at the department of Computer-aided design of transport constructions and structures of the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, kosoksana90@gmail.com.

Article received 10.05.2016, accepted 19.08.2016.