



Оптимальный интервал предупредительных замен для искусственных сооружений железных дорог



Владимир СМЕРНОВ
Vladimir Yu. SMIRNOV

Оксана КОС
Oxana I. KOS



Смирнов Владимир Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования транспортных конструкций и сооружений» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Кос Оксана Игоревна — аспирант Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Представлена вероятностная модель искусственного сооружения, на основе которой разработан программный комплекс, позволяющий рассчитать интервалы предупредительных замен или ремонтов для любых элементов инженерных конструкций. Комплекс помогает принимать оптимальные решения по управлению техническим состоянием мостов, водопропускных труб и других объектов дорожной инфраструктуры по критериям надежности и безопасности. Программы написаны на языке C#. Для удобства использования создан инсталляционный пакет. С его участием можно начертить новую конструкцию или же сгенерировать ее вариант на основе стандартных прототипов.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, техническое состояние, надежность, безопасность, управление, автоматизация, программный комплекс, интервалы предупредительных замен.

Искусственные сооружения — сложные и ответственные элементы путевого хозяйства железных дорог. Их исправность и надежность имеют большое значение для осуществления бесперебойного и безопасного движения поездов. Общая протяженность искусственных сооружений на сети железных дорог РФ превышает сегодня несколько тысяч километров и чаще всего это мосты и водопропускные трубы.

Для строительства искусственных сооружений преимущественно используются железобетон, металл и композитные материалы. А основным методом обеспечения их эксплуатационной надежности и безопасности является оптимальная организация технического обслуживания действующих объектов.

При планировании частоты обслуживания можно выделить два принципиально разных подхода:

- с постоянным периодом обслуживания, рассчитанным по некоторым усредненным для мостов показателям, то есть обслуживание по нормативу;
- с переменным периодом, определяемым на основе оценки фактического

состояния мостов, то есть обслуживание по фактическому состоянию.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция предпочтения второму подходу.

Для того чтобы определить срок службы конструкции не по нормируемым межремонтным срокам, а по фактическому техническому состоянию, необходимо построить вероятностную модель искусственного сооружения как сложной технической системы, которая помогает спрогнозировать пределы безотказной работы, а соответственно им и осуществлять замены или ремонты теряющих надежность элементов.

Управление техническим состоянием искусственного сооружения рассматривается в условиях накопления повреждений до наступления определенного предельного уровня [1–5].

Возьмем вариант модели, когда опережающее накопление повреждений происходит преимущественно в одном из элементов металлических пролетных строений (раскос, подвеска, нижний пояс), а работоспособность и безопасность конструкции контролируется двумя уровнями предельных состояний [6].

Допустим, что накопление повреждений в элементе носит монотонный характер и отражается параметром $v(t)$. Пусть этот монотонно возрастающий параметр контролируется в дискретные моменты $t_k = k \times \Delta t$ с интервалом Δt .

Когда параметр достигает уровня $v_{он}$, появляется усталостная трещина, а когда уровня v_p — происходит усталостное разрушение элемента конструкции.

Пусть C_1 — средние затраты на восстановление искусственного сооружения до превышения параметром v уровня $v_{он}$; $C_2 = C_1 + A_1$ — средние затраты на восстановление искусственного сооружения после превышения параметром v уровня $v_{он}$; $C_3 = C_2 + A_2$ — средние затраты при превышении уровня v_p .

Оптимальная стратегия управления техническим состоянием искусственного сооружения по его фактическому состоянию, обеспечивающая минимум средних удельных затрат, сводится к выбору упреждающего уровня накопления повреждений $\alpha_0 < L$, определяемого путем решения уравнения:

$$A \int_0^{\alpha_0} H(v) f(L-v) dv = C + A[1-F(L)], \quad (1)$$

где C — средние затраты на устранение повреждений, не превосходящих уровень L ;

$C + A[1-F(L)]$ — затраты в случае выхода повреждений за уровень L ;

$H(v)$ — среднее количество повреждений на интервале Δv ;

$$f(v) = F'(v).$$

Для уровней $v_{он}$ и v_p уравнение запишется соответственно в виде (2) и (3):

$$A_1 \int_0^{\alpha_0} H(v) f(v_{он}-v) dv = C_1 + A_1[1-F(v_{он})]; \quad (2)$$

$$A_2 \int_0^{\alpha_0^{(1)}} H^{(1)}(v) f^{(1)}(v_p-v) dv = C_2 + A_2[1-F^{(1)}(v_p)]; \quad (3)$$

Пусть T_0 — среднее время безотказной работы элемента или время от начала его эксплуатации до достижения заданного предельного уровня надежности; T_1 — среднее время замены (ремонта) работоспособного элемента, а T_2 — среднее время замены (ремонта) отказавшего элемента конструкции.

За единицу примем интервал времени, в течение которого по мосту проходит 1000 поездов.

$P(x, t)$ — показатель, имеющий смысл вероятности застать элемент в работоспособном состоянии в произвольный момент t и проработать безотказно после этого в течение времени x , которое назовем предупредительным интервалом.

Времена плановых замен (ремонта) элемента являются реализациями некоторой случайной величины T , имеющей распределение $G(t)$. Интервалы между заменами (ремонтами) образуют во времени последовательность независимых, одинаково распределенных случайных величин с функцией распределения $F(t)$. И в этом плане естественное продолжение: $H(t)$ — математическое ожидание числа восстановлений к моменту времени t .

Искусственное сооружение — система, которая функционирует длительное время, поэтому показатель $p(x, t)$ рассмотрим при $t \rightarrow \infty$.

Запишем выражение для $p(x, t)$ через функции $G(t)$, $F(t)$ и $H(t)$ и перейдем





$$\frac{T_1}{T_2 - T_1} = \left[\frac{F(\tau + x) - 1}{1 - F(\tau)} F(\tau) + \lambda(\tau) \int_0^\tau [1 - F(t)] dt \right] \frac{1 - F(\tau)}{1 - F(\tau + x)} + \frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{1 - F(\tau)}{1 - F(\tau + x)} \int_0^\tau [1 - F(t + x)] dt - \int_0^\tau [1 - F(t)] dt \right] \quad (6)$$

к пределу при $t \rightarrow \infty$.

После преобразований получим выражение:

$$p(x) = \frac{\int_0^\infty \psi(t, x) dG(t)}{\int_0^\infty [\psi(t, 0) + T_1 + (T_2 - T_1) F(t)] dG(t)}, \quad (4)$$

где

$$\psi(t, x) = \int_0^{t+x} [1 - F(t)] dt = \int_0^t [1 - F(t + x)] dt;$$

$$A(t) = \psi(t, 0) > 0;$$

$$B(t) = \psi(t, 0) + T_1 + (T_2 - T_1) F(t) > 0.$$

Выражение для $p(x)$ из (4) представляется в виде (5), которое является дробно-линейным функционалом относительно $G(t)$:

$$p(x) = \frac{\int_0^\infty A(t) dG(t)}{\int_0^\infty B(t) dG(t)}. \quad (5)$$

Для этого функционала следует найти такой закон распределения $G(t)$, при котором вероятность $p(x)$ принимает максимальное значение, то есть предстоит решить сложную задачу вариационного исчисления. Она сводится к исследованию на экстремум функции одного аргумента.

После нахождения экстремума функции и преобразований получим (6), где

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}.$$

Решением представленного интегро-дифференциального уравнения является интервал предупредительных замен или ремонтов элементов t .

Разработанный программный комплекс позволяет рассчитать интервалы предупредительных замен или ремонтов для любых элементов искусственных сооружений различных типов.

Программный комплекс написан на языке C#. Для удобства использования создан инсталляционный пакет. С его участием можно начертить новую конструкцию или же сгенерировать конструкцию на основе стандартных прототипов.

ВЫВОДЫ

1. Наблюдается устойчивая тенденция перехода от стратегии управления техническим состоянием искусственных сооружений на основе нормируемых межремонтных сроков к стратегии управления по фактическому техническому состоянию, когда решается задача оптимизации условий обеспечения безотказной и безопасной работы создаваемой транспортной инфраструктуры.

2. Разработанный программный комплекс вычисления оптимального интервала предупредительных замен (ремонта) элементов искусственных сооружений обладает высокой степенью универсальности, способен к восприятию различных видов оптимизации, ему свойственна инвариантность относительно типов поездов.

3. С помощью программного комплекса были получены результаты вычислений оптимального интервала предупредительных замен (ремонта) для подвесок металлических пролетных строений ПСК с расчетными пролетами 33–110 м при вероятности безотказной работы 0,9845 и 0,9515.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. — М.: Советское радио, 1971. — 272 с.
2. Бокарев С. А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений на железных дорогах России на основе новых информационных технологий. — Новосибирск: СГУПС, 2002. — 276 с.
3. Иосилевский Л. И. Практические методы управления надежностью железобетонных мо-

стов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: НИЦ «Инженер», 2001. – 295 с.

4. Круглов В. М., Устинов В. П., Бобылев К. Б., Бокарев С. А. Обеспечение надежности инженерных сооружений // Транспортное строительство. – 2003. – № 1.

5. Осипов В. О. Долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.

6. Смирнов В. Ю., Смирнова О. В. Управление техническим состоянием моста с учетом усталостных повреждений // Вестник МИИТ. – 2003. – № 9.

7. Ашпиз Е. С. Подход к расчету показателей надежности элементов пути // Мир транспорта. – 2011. – № 5 (38). – С.34–41.

8. Коваленко Н. И., Гринь Е. Н. Технология предотвращает угрозу // Мир транспорта. – 2012. – № 5 (43). – С. 138–142. ●

OPTIMUM TIME SPANS OF PREVENTIVE REPLACEMENTS FOR RAILWAY ENGINEERING STRUCTURES

Smirnov, Vladimir Yu. – Ph.D. (Tech), associate professor of the department of automated design engineering systems of transport facilities and structures of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Kos, Oxana I. – Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

As total length of engineering structures within the railway network of Russian Federation exceeds some thousand km, their reliability has a direct impact on the traffic safety.

The reliability and safety of their operation depends on correct maintenance. Two approaches prevail in calculating of time spans of maintenance of a bridge: the permanent one that uses mean values for bridge maintenance works, and the flexible one that uses the results of the assessment of actual state of a bridge. The trend to use the least approach now dominates.

The authors use the method of probabilistic model of a structure as of a complex technical system to forecast the limits of faultless operation. So the control of technical state of engineering structure is considered under the conditions of damage accumulation till the determined level [1–5].

Automation of the control with the help of a specially designed software package permits flexible interventions when the real state of a structure demands replacement or reinforcement works. The model under the study demonstrates the advanced

accumulation of damages in one of the bridge span elements and the control of the safety of the whole construction uses two levels of limit states [6].

The programming language for software package is C#. Installation package facilitates the operations assisting to design a new construction or to generate a construction based on standard prototypes.

The software package of computation of optimum time spans for preventive replacements of the elements of engineering structures has some special features: high generality as it fits any kind of engineering structures, interactivity while computing. It conforms to any moment of operation of structures (from the beginning of operation or at any other moment), suits rowing function of failures, considers all possible variants of replacements. It also takes into account different optimization scenarios (minimum visits to the structure, resources saving, climate specific conditions). Invariance as for train types is also of importance.

All the organizations that design or operate railway structures can efficiently use the software.

Key words: transport structure, technical state, reliability, safety, control, automation, software, replacement time spans.

REFERENCES

1. Barzilovich, E. Yu., Kashtanov, V. A. Some Mathematical Issues of the Theory of Maintenance of Complex Systems [Nekotorye matematicheskiye voprosy teorii obsluzhivaniya slozhnykh sistem]. Moscow, Sovetskoye radio publ., 1971, 272 p.

2. Bokarev, S. A. Control of Technical State of Railway Structures based on New Information Technology [Upravlenie tehnikeskim sostoyaniem iskusstvennykh sooruzheniy na zheleznykh dorogah Rossii na osnove novykh informatsionnykh tekhnologiy]. Novosibirsk, Sibir State University of Railway Engineering publ., 2002, 276 p.

3. Iosilevsky, L. I. Practical Methods of Control of Reliability of Concrete Bridges [Prakticheskie metody upravleniya nadezhnostiu zhelezobetonnykh mostov]. 2d ed., rev. and enlarged. Moscow, Research Center Engineer, 2001, 295 p.

4. Kруглов, В.М., Устинов, В.П., Бобылев, К.Б., Бокарев, С. А. Reliability Control of Engineering Structures

[Obespechenie nadezhnosti inzhenernykh sooruzheniy]. *Transportnoe Stroitelstvo* [Transport Construction Journal], 2003, No 1.

5. Osipov, V. O. Operating Life of Metallic Spans of Operated Railway Bridges [Dolgovechnost metallicheskih proletnykh stroeniy ekspluatiruemykh zheleznodorozhnykh mostov]. Moscow, Transport publ., 1982, 288 p.

6. Smirnov, V. Yu., Smirnova, O. V. Control of Technical State of a Bridge subject to Fatigue Damage [Upravlenie tehnikeskim sostoyaniem mosta s uchietom ustalostnykh povrezhdeniy]. *Vestnik MIIT* [Bulletin of Moscow State University of Railway Engineering], 2003, No.9.

7. Ashpiz, E. S. An Approach to Computation of Track Elements Reliability Indices. *Mir Transporta Journal*, 2011, Vol. 38, No 5, pp. 34–41.

8. Kovalenko, N.I., Grin, Ye.N. Engineering Prevents Threats. *Mir Transporta Journal*, 2012, Vol. 43, No 5, pp. 138–142.

Координаты авторов (contact information): Смирнов В. Ю. (Smirnov, V. Yu.) – vl-smirnov@mail.ru,

Кос О. И. (Kos, Oxana I.) – kosoksana90@gmail.com

Поступила в редакцию / received 02.11.2012

Принята к публикации / accepted 05.02.2013

