



Схема управления техническим состоянием искусственных сооружений



Оксана КОС

Oksana I. KOS

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.

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

В соответствии с ГОСТ Р 54257-2010 [1] надёжность 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 надёжности 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]. Да-

лее 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:

$$F(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^v \frac{e^{-(v-m)^2}}{2\sigma^2} dv, \quad (1)$$

где v — 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-



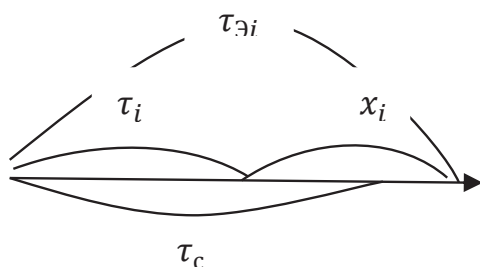


Рис. 1. Соотношение интервалов $\tau_{\Delta i}$, τ_i , τ_c , x_i

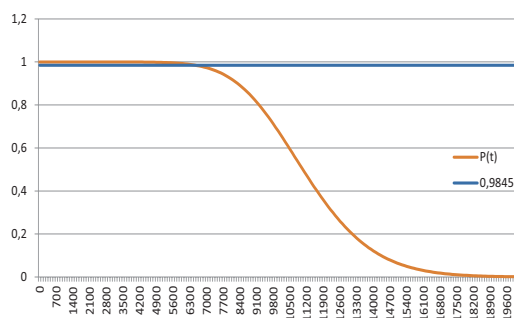


Рис. 2. Вероятность безотказной работы пролетного строения моста через р. Нерусса

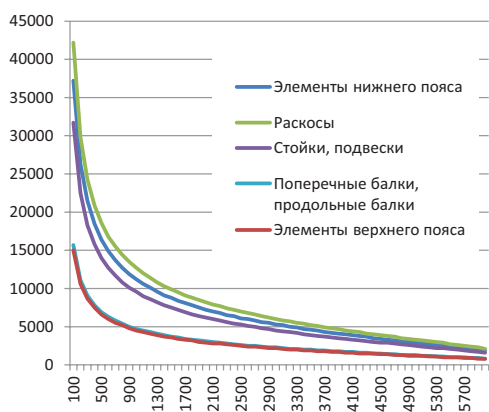


Рис. 3. Зависимость оптимального интервала τ_i от предупредительного интервала x_i

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 $\tau_1, \tau_i, \dots, \tau_n$, 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:

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

где x_i — предупредительный интервал для i -го элемента;

$\tau_i, i = 1, \dots, n$ — оптимальный интервал для i -го элемента;

$\tau_{\Delta i}, i = 1, \dots, n$ — 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 $\tau_{\min}$ и, следовательно, с наименьшим интервалом $\tau_{\text{эmin}}$, равным сумме $\tau_{\min}$ 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 $\tau = \tau_{\text{эmin}} - \tau_c$. Таким образом, получаем:

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

где $x_{\min}$ — предупредительный интервал для такого элемента;

$\tau_{\min}$ — наименьший оптимальный интервал;

$\tau_{\text{эmin}}$ — сумма оптимального интервала $\tau_{\min}$ 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 $\tau_c = 6536$ 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 $\tau_{\min} = 6000$ млн т

при предупредительном интервале $x_{\min} = 600$ млн т.

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

