

## РАСЧЕТ ВРЕМЕН ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАМЕН ИЛИ РЕМОНТОВ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

О. И. КОС, В. Ю. СМИРНОВ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Для обеспечения эксплуатационной надежности и эффективности функционирования сложных технических систем (СТС) при планировании частоты обслуживания можно выделить два принципиально разных подхода:

– с постоянным периодом между обслуживаниями, рассчитанным по некоторым усредненным для систем показателям, т. е. обслуживание по нормативу;

– с переменным периодом, определяемым на основе оценки фактического состояния систем, т. е. обслуживание по фактическому состоянию.

В настоящее время периодичность замен или ремонтов элементов СТС, например таких как искусственные сооружения на железных дорогах, определяется на основании среднестатистических данных. Нормативные сроки, определенные на основании этих данных, представлены в соответствующих документах.

Поставим задачу управления техническим состоянием СТС по фактическому состоянию. Рассмотрим в качестве объекта управления СТС, например, железнодорожный мост, состоящий из большого количества элементов, таких как пролетные строения, опорные части, подферменные блоки, устои, ригели, опоры.

Субъектом управления будет эксплуатирующая организация, например, дистанция пути.

Исходными данными для управления являются результаты обследования технического состояния, а также пропущенная нагрузка.

Механизмом управления будем считать проводимые в определенные моменты времени замены и ремонты элементов конструкции СТС, причем эти определенные моменты времени должны рассчитываться не на основе нормативных сроков, а на основе математических методов, учитывающих фактическое техническое состояние СТС и всю предыдущую историю эксплуатации СТС.

Целевой функцией управления техническим состоянием будет величина затрат на эксплуатацию СТС, т. е. функция приспособленности. Критерием эффективности управления будем считать минимум целевой функции при выполнении заданных ограничений, то есть минимизацию затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности. Это фактически означает эксплуатацию СТС в соответствии с критерием «надежность – затраты», что обеспечивает экономический эффект и безопасность эксплуатации одновременно.

Рассмотрим метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, который позволяет осуществлять замены или ремонты элементов через оптимальные интервалы времени [1, 2].

Задача расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС ставится математически следующим образом.

Пусть  $t$  – время эксплуатации СТС;  $T_1$  – средняя длительность плановой предупредительной замены или ремонта элемента;  $T_2$  – средняя длительность внеплановой аварийной замены или ремонта элемента;  $x$  – интервал безотказности элемента;  $F(t)$  – функция распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами, возникающими при обнаружении отказа, т. е. функция отказов элемента;  $G(t)$  – функция распределения интервалов времени между плановыми заменами или ремонтами;  $H(t)$  – математическое ожидание числа отказов за время от 0 до  $t$ ;  $p(x, t)$  – коэффициент оперативной готовности [3, 4].

Пусть заданы времена  $T_1, T_2, x$ , функции  $F(t)$  и  $H(t)$ .

Найти: оптимальный интервал замены или ремонта элемента:

$$\tau_0 = \arg \max_{G(t)} p(x, t). \quad (1)$$

В качестве показателя надежности СТС возьмем коэффициент оперативной готовности  $p(x, t)$ , т. е. вероятность того, что в момент  $t$  элемент будет в работоспособном состоянии и после момента  $t$  проработает время  $x$ . Ограничениями при решении задачи будут требования следующие:  $T_2 > T_1$ ;  $\lambda'(t) > 0$ , где  $\lambda(t) = f(t) / (1 - F(t))$ ,  $f(t) = F'(t)$ ;  $x << T_0$ , где  $T_0$  – среднее время безотказной работы элемента. Критерий оптимальности решения задачи: максимизация выбранного показателя надежности  $p(x, t)$ .

В рассматриваемой задаче под оптимальным решением будем понимать оптимальный интервал замены (ремонта)  $\tau_0$  для данного элемента СТС. Максимизация выбранного показателя надежности обеспечивается за счет выбора  $G(t)$ . Коэффициент оперативной готовности  $p(x, t)$  при  $t \rightarrow \infty$  можно представить в виде [4]

$$p(x) = \frac{\int_0^\infty [1 - G(t)][1 - F(t+x)]dt}{\int_0^\infty [1 - G(t)][1 - F(t)]dt + T_1 \int_0^\infty G(t)dF(t) + T_2 \int_0^\infty F(t)dG(t)}. \quad (2)$$

Максимум дробно-линейного функционала (2) ищется на вырожденном распределении вида

$$G(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq \tau, \\ 1 & \text{при } t > \tau. \end{cases} \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (2) приводится к виду (4):

$$p(x, \tau) = \frac{\int_0^\tau [1 - F(t+x)]dt}{\int_0^\tau [1 - F(t)]dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau)}. \quad (4)$$

Дифференцируя (4) по  $\tau$  и приравнивая полученный результат к нулю, получаем уравнение (5), из которого определяется точка экстремума функции  $p(x, \tau)$ :

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = \lambda(\tau) \int_0^\tau [1 - F(t)] dt - F(\tau). \quad (5)$$

С учетом заданных ограничений единственным решением этого уравнения является  $\tau_0$  – величина оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС.

Решение уравнения (5) находится с помощью численного метода Симпсона для каждого элемента СТС. В результате получаются оптимальные интервалы замен (ремонтов) для всех элементов СТС.

## 2 Расчеты для эксплуатируемых объектов.

Проведены расчеты оптимальных интервалов замен или ремонтов элементов для ряда эксплуатируемых в настоящее время СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами. В частности, для разнородных типов элементов металлического пролетного строения моста, пропускающего реку Нерусса, расположенного на 478 км II пути участка Брянск – Суземка Брянской дистанции пути, рассчитаны оптимальные интервалы замен или ремонтов этих элементов.

## Список литературы

- 1 **Кос, О. И.** Оптимальный интервал предупредительных замен для искусственных сооружений железных дорог / О. И. Кос, В. Ю. Смирнов // Мир транспорта. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 152–155.
- 2 **Кос, О. И.** Схема управления техническим состоянием искусственных сооружений / О. И. Кос // Мир транспорта. – 2016. – Т. 4, № 5. – С. 199–201.
- 3 **Smirnov, V. U.** Program module for calculating the optimal interval of preventive substitutions / V. U. Smirnov, O. I. Kos // Quality management, Transport and information. Security Information Technologies (IT&QM&IS). – Saint Petersburg, Russia, 24–30 September, 2017. – DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085811.
- 4 **Kos, O. I.** Mathematical Model of Control of the Technical Condition of Elements of Complex Technical Systems on the Basis of the Distribution Law of the Function of Element Failures / O. I. Kos, V. U. Smirnov // Journal of Computer and Systems Sciences International. System Theory and General Control Theory. Springer Nature. Pleiades Publishing. – 2022. – Vol. 61. – P. 885–892.