УДК 629.4:519.873

Т.С. Гришечкина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Введение

Проблема обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте появилась одновременно с самим транспортом и до сих пор не потеряла своей актуальности.

При этом первоочередной является задача управления надежностью тягового подвижного состава (ТПС), так как массовые сбои перевозочного процесса на дорогах происходят зачастую по причине неудовлетворительного технического состояния локомотивного парка. Для этого необходимо проводить совершенствование системы содержания ТПС.

Исследования на данную тему представлены в работах А.А. Босова, А.В. Горского, Б.Е. Боднаря, Е.Е. Косова, В.С. Наговицына, Е.С. Павловича и других ученых [1–3].

Постановка проблемы

Современные системы содержания базируются на информации о ресурсах элементов технических объектов. Данная база дает возможность планировать объемы, последовательность и периодичность технических обслуживаний и ремонтов локомотива в зависимости от наработок до отказа его деталей. Однако этот подход заключает в себе ряд существенных недостатков, одним из которых является отсутствие учета зависимых отказов, когда отказ одного элемента прямо или косвенно влияет на работоспособность других элементов или системы в целом [4]. Возникает необходимость изучения зависимых отказов, их влияния на затраты на неплановые ремонты ТПС.

Целью данной работы является моделирование зависимых отказов элементов сложных технических систем.

Основная часть

Проведем математическое моделирование влияния зависимых отказов на надежность системы. Рассмотрим два подхода – детерминированный и вероятностный. В первом случае отказ элемента с необходимостью влечет за собой отказы зависимых элементов системы. Во втором случае учитывается вероятностная природа отказов зависимых элементов.

Рассмотрим систему, состоящую из M элементов. Для каждого элемента известна $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов и Ω_i – множество зависимых элементов.

Вероятность отказа i-го элемента определяется через ξ из соотношения:

$$1-\exp\left\{-\int_0^t \lambda_i(x)dx\right\}=\xi,$$

где ξ – реализация случайной величины, равномерно распределенной на [0; 1].

Время возникновения отказа i-го элемента определяется из уравнения:

$$\int_0^t \lambda_i(x)dx=-\ln\left(1-\xi\right).$$

В качестве примера рассмотрим объект с линейной функцией $\lambda_i = a_i t_i$, тогда момент наступления отказа i-го элемента:

$$t_i=\sqrt{-\frac{2}{a_i}\ln\left(1-\xi\right)},\quad i=\overline{1,M}. \tag{1}$$

Определяем момент наступления отказа для каждого элемента системы и, выбирая $t_k=\min\left\{t_1,t_2,...,t_M\right\}$, получим номер k – первого отказавшего элемента. Ему соответствует Ω_k – множество повреждаемых элементов. Для элементов локомотива данные множества берутся согласно технолого-экономической карте ремонта [1].

При детерминированном подходе считаем, что после отказа k-го элемента необходимо восстанавливать множество $\left\{k,\Omega_k\right\}$. И время полного восстановления каждого элемента из множества Ω_k будет равно времени восстановления k-го элемента:

$\tilde{t}_{i\in\Omega_k}=t_k$ – время восстановления поврежденных элементов.

Затем повторно определяем моменты наступления отказов элементов системы, находим первый отказавший элемент и множество его зависимых элементов. Время их восстановления добавляется к времени восстановления, полученному на предыдущем этапе.

При вероятностном подходе считаем, что отказ *k*-го элемента приводит к возможному отказу элементов из множества Ω_k.

Продолжаем процедуру до тех пор, пока выполняется условие $t_k < \tau$, где τ – время полного восстановления системы.

В итоге, за время τ для каждого элемента получаем количество его отказов (зависимых и независимых) и формируем множество $\{N_1, N_2, ..., N_M\}$.

Согласно технолого-экономической карте ремонта (ТЭК) определяем набор элементарных технологических операций, необходимых для восстановления каждого элемента. Зная стоимость проведения каждой операции, определяем общие затраты на неплановые ремонты с учетом технологии ремонта:

$$C_{неп}(\tau) = \sum_{i=1}^{M}\left(\sum_{j=1}^{J} c_j T_{ij}\right) N_i(\tau), \qquad (2)$$

где c_j – затраты на *j*-ю элементарную операцию;

$$T_{ij} = \begin{cases} 1, & \textit{если } j\textit{-я операция участвует} \\ & \textit{при восстановлении } i\textit{-го элемента;} \\ 0, & \textit{в обратном случае} \end{cases}$$

J – количество элементарных операций;

M – количество элементов в системе.

Для различных τ получаем различные значения затрат. По полученным точкам определяем функцию $C_{неп}(\tau)$ – средние затраты на неплановые ремонты.

Для построения рациональной системы содержания необходимо решить задачу:

$$\frac{C_п}{\tau} + C_{неп}\tau \to \min,$$

где $C_п$ – затраты на плановые восстановления;

$C_{неп}$ – затраты на неплановые ремонты.

В итоге получаем оптимальное время (периодичность) полного восстановления технической системы:

$$\tau = \sqrt{\frac{C_п}{C_{неп}}}.$$

Рассмотрим предложенное моделирование зависимых отказов на следующем примере. Пусть система состоит из 10 элементов. Для каждого элемента задаются (табл. 1):

a_i – величина, характеризующая интенсивность отказов данного элемента;

Ω_i – множество зависимых элементов;

p_i – вероятность повреждения элементов из множества Ω_i при отказе *i*-го элемента;

$\sum_{j=1}^{J} c_j T_{ij}$ – стоимость восстановления *i*-го элемента с учетом технологии ремонта.

Таблица 1

Характеристики элементов системы

i	a_i	Ω_i	$\sum_{j=1}^{J} c_j T_{ij}$	p_i
1	0.1	$\{3\}$	2	0.6
2	0.2	$\{5,7\}$	3	0.3
3	0.3	$\{5,6,7\}$	1	0.7
4	0.4	$\{2\}$	4	0.1
5	0.5	$\{4\}$	2	0.2
6	0.6	$\{\}$	4	0.2
7	0.5	$\{8\}$	3	0.5
8	0.4	$\{\}$	5	0.4
9	0.3	$\{1\}$	2	0.6
10	0.2	$\{\}$	1	0.4

1 вариант – детерминированная модель.

При отказе *i*-й элемент с необходимостью повреждает элементы из множества Ω_i. В данном случае $p_i = 1$, $i = \overline{1,M}$.

Так, например, если откажет первый элемент, то это приведет к отказу третьего элемента, а отказ третьего элемента приводит к отказу 5-го, 6-го и 7-го элемента. Отказ пятого элемента повлечет за собой отказ 4-го. Отказ 6-го последствий не имеет, а 7-й приводит к отказу 8-го и т.д.

Определяем по формуле (1) время наступления отказа для каждого элемента (табл. 2.):

Таблица 2

Время наступления отказа

i	$t(i)$
1	7.11
2	2.74
3	4.47
4	0.506
5	3.74
6	1.7
7	1.5
8	4.8
9	1.75
10	3.38

Выбираем первый отказавший элемент, а также множество номеров элементов, повреждаемых при его отказе: w_4, $\Omega_4 = \{2\}$.

Получаем время наступления первого отказа для каждого элемента:

$$\left[0, 0.506, 0, 0.506, 0, 0, 0, 0, 0, 0\right].$$

И количество отказов к данному моменту времени:

$$N = \left[0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0\right].$$

Далее повторяем процедуру определения времени наступления отказов. Следующим по результатам моделирования первым отказавшим элементом стал элемент w_7 со временем $\tau_7 = 0.863$. С учетом зависимого множества $\Omega_7 = \{8\}$, время отказа которого будет таким же, получаем времена отказов:

$$\left[0, 0.506, 0, 0.506, 0, 0, 0.863, 0.863, 0, 0\right]$$

и количество отказов для каждого элемента:

$$N = \left[0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0\right].$$

При третьем испытании минимальное время отказа также получилось у седьмого элемента, и оно составило $\tau_7 = 0.747$. При этом время отказов для w_7 и w_8 составило $0.863 + 0.747 = 1.61$.

Полагая, что восстановление после отказа происходит мгновенно, получаем времена восстановлений элементов:

$$\left[0, 0.506, 0, 0.506, 0, 0, 1.61, 1.61, 0, 0\right]$$

Количества отказов:

$$N = \left[0, 1, 0, 1, 0, 0, 2, 2, 0, 0\right]$$

Продолжаем моделирование до тех пор, пока минимальное время отказа не превысит заданное время полного восстановления системы *T*.

2 вариант – вероятностная модель.

В этом случае при моделировании учитываем p_i – вероятность повреждения зависимых элементов.

Например, при отказе элемента w_2 получили следующую картину – вероятность повреждения зависимого элемента w_5 составила 0.14, что меньше заданной $p_5 = 0.2$. Вероятность повреждения зависимого элемента w_7 составила 0.63 (что больше заданной $p_7 = 0.5$).

Таким образом, w_5 в данном случае остался работоспособным, а элементы w_2 и w_7 отказали.

Как и в первом случае, продолжаем моделирование до тех пор, пока минимальное время отказа не превысит заданное время полного восстановления системы *T*.

Для разных *T* получили количества отказов элементов. Зная затраты на восстановление каждого элемента (формула (2)) определим функции затрат на восстановление объекта с учетом зависимых отказов его элементов (табл. 3).

Таблица 3

Результаты моделирования

Время полного восстановления системы (*T*)	Затраты на восстановления после отказов (C_1). Детерминированнная модель	Затраты на восстановления после отказов (C_2). Вероятностная модель
0,5	202	70
1	284	104
2	354	128
3	374	198
4	566	334
5	666	414
6	786	466

Функция затрат для детерминированной модели:

$$C_1 = 145 + 103t .$$

Функция затрат для вероятностной модели:

$$C_2 = 10.2 + 76.4t .$$

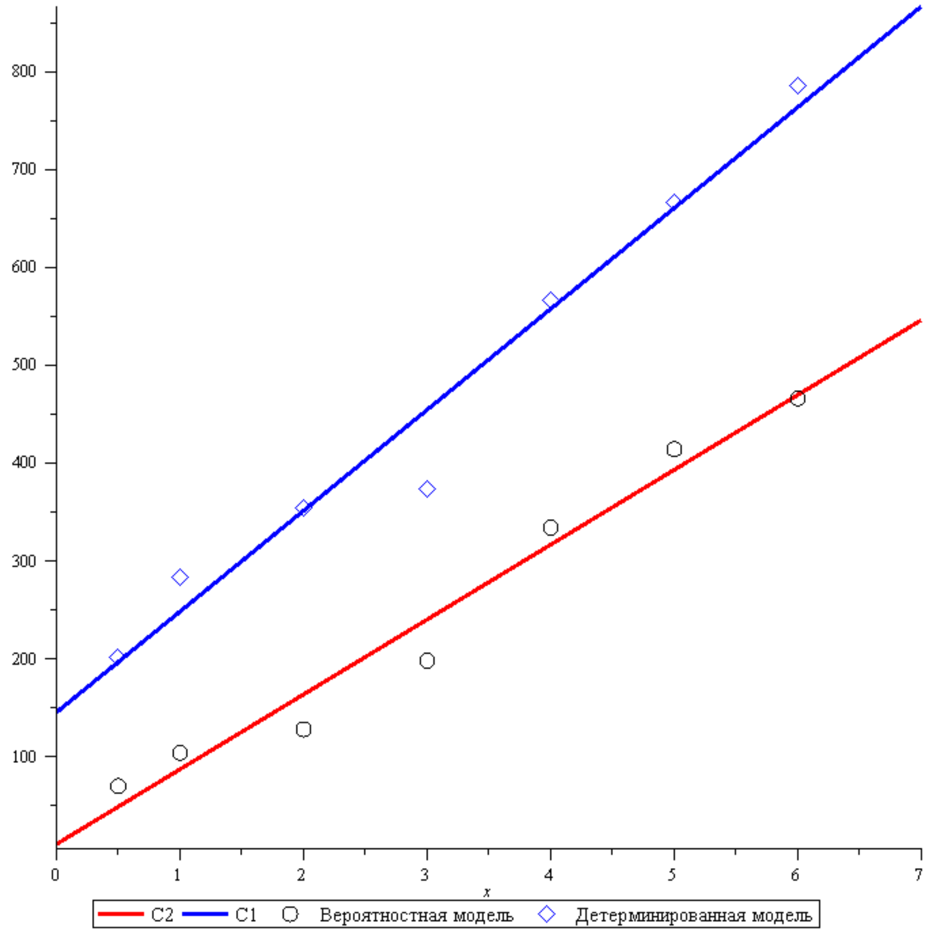

Рис. 1. Затраты на восстановления после отказов (по оси *x* – время; по оси *y* – затраты)

Выводы

Проведено математическое моделирование зависимых отказов элементов технической системы. В рамках моделирования было рассмотрено два подхода – детерминированный и вероятностный.

Получена зависимость, с помощью которой можно оценивать и прогнозировать затраты на неплановые ремонты технической системы.

Библиографический список

1 **Босов, А.А.** Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог : монография / А.А. Босов, П.А. Лоза. – Днепропетровск : Дриант, 2015. – 252 с.

2 **Горский, А.В.** Стратегия интеллектуального ремонта локомотивов / А.В. Горский, А.А. Воробьев, А.В. Скребков // Локомотив. – 2012. – № 7. – С. 33–35.

3 **Боднарь, Б.Е.** Основные пути развития технической диагностики локомотивов / Б.Е. Боднарь, М.И. Капица, Я.Е. Савич // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2003. – № 9(67). – С. 96–100.

4 **Босов, А.А.** Влияние зависимых отказов на безопасность технических систем: анализ транспортных происшествий с 2005 по 2008 гг. / А.А. Босов, Т.С. Гришечкина, Л.Н. Савченко // Локомотив-информ. – 2010. – № 1. – С. 5–9.