

# Оценка регламентированного срока дальнейшей эксплуатации технических систем

*Предлагается методика оценки регламентированного срока дальнейшей эксплуатации технических систем на основе данных об отказах в процессе эксплуатации и использования вероятностно-физической модели отказов (DN-распределения).*

В. П. Стрельников

## Оцінка регламентованого терміну подальшої експлуатації технічних систем

*Пропонується методика оцінки терміну подальшої експлуатації технічних систем на основі даних про відмови під час експлуатації та використання ймовірно-фізичної моделі відмов (DN-розподілу).*

Остаточный ресурс (остаточная наработка до отказа, остаточный срок службы) — индивидуальный показатель надежности, отражающий фактическую продолжительность эксплуатации определенного объекта до момента, когда объект достигнет предельного состояния, откажет или дальнейшая его эксплуатация станет нецелесообразной. Правила целесообразности строятся по экономическим критериям и критериям безопасности.

Предельное состояние технических систем может характеризоваться: снижением эффективности использования объекта вследствие ухудшения надежности; экономической нецелесообразностью дальнейшей эксплуатации; моральным старением аппаратуры и оборудования. В качестве критерия наступления предельного состояния восстанавливаемых технических систем используют снижение средней наработки между отказами до минимального допустимого уровня  $T_{дон}$ . Минимальный допустимый уровень средней наработки  $T_{дон}$  устанавливают исходя из соображений безопасности и экономичности, по согласованию с заказчиком из рекомендуемого ряда:  $0,75T_1$ ;  $0,5T_1$ ;  $0,33T_1$ ;  $0,25T_1$  ( $T_1$  — значение средней наработки до отказа). Иногда минимальный допустимый уровень средней наработки между отказами по согласованию с заказчиком принимают:  $T_{дон} \leq T_{ППР}$  ( $T_{ППР}$  — период планово-предупредительного ремонта).

Информация об остаточном ресурсе (остаточном сроке службы) необходима для использования в системе технического обслуживания, а также для выработки решений о возможности дальнейшей эксплуатации. Для выработки решения о дальнейшей эксплуатации объекта, сроках и объемах проведения ремонтных воздействий на основе информации об остаточном сроке службы необходимо определять следующие величины:

средний остаточный срок службы  $T_{0сл}$ ;

точность прогнозирования остаточного срока службы (доверительную вероятность  $q$  и относительную ошибку  $\xi$ ).

Точность прогнозирования остаточного ресурса (срока службы) в большей степени зависит от принятой функции распределения остаточного ресурса (срока службы).

При исследовании надежности, в частности электротехнического оборудования АЭС (системы контроля и управления, электродвигатели, турбогенераторы, компрессоры, трансформаторы, выключатели и другие изделия, содержащие электротехнические и электронные компоненты, которые в основном обуславливают отказы приборов и аппаратуры), на основании рекомендаций стандартов [1, 2] в качестве теоретической модели принимают диффузионное немонотонное распределение (DN-распределение).

Существующие методики анализа надежности оборудования АЭС типа «анализ тренда потока отказов» [3], предшествующие прогнозированию остаточного ресурса (срока службы) и назначению регламентированного срока эксплуатации, основаны на использовании однопараметрического экспоненциального распределения. Поэтому данные методики не приводят к количественным оценкам показателей надежности эксплуатируемого оборудования и дают весьма грубые качественные оценки и прогноз. Отсутствуют оценки достоверности (доверительной вероятности) и точности (относительной ошибки) как определяемых, так и прогнозируемых показателей надежности оборудования АЭС. Сама гипотеза, лежащая в основе метода «анализ тренда», противоречит элементарному физическому понятию об износе и старении любого оборудования при длительной эксплуатации.

Рассматриваемая ниже методика основана на использовании вероятностно-физической модели отказов ( $DN$  - распределения), позволяет решать поставленную задачу, эффективно используя априорную информацию о физических процессах деградации, обуславливающих отказы объектов, и прогнозировать остаточный срок службы в условиях малой статистики отказов. При этом все количественные оценки показателей надежности оборудования имеют оценки достоверности и точности, соответствующие статистическим данным, получаемым за определенный интервал наблюдений.

Если исследуются достаточно длительно эксплуатируемые, восстанавливаемые технические системы с целью оценки технического состояния и определения регламентированного срока дальнейшей эксплуатации, то общее время наблюдений разбивают на два примерно равных по числу отказов интервала. И первый, и второй интервалы наблюдений принимают достаточно продолжительными (не менее 1–3 лет), чтобы наблюдалось не менее 5–10 отказов на каждом интервале.

При малом числе отказов значение коэффициента вариации  $\tilde{v}$  наработки на отказ определяют согласно известным рекомендациям [1, 2]. По имеющимся статистическим данным определяют значение средней наработки на отказ (между отказами), соответственно, на первом интервале  $\tilde{T}_{12}$  на момент эксплуатации  $t_1$  и на втором интервале  $\tilde{T}_{22}$  на момент эксплуатации  $t_2$  ( $t_1 \ll t_2$ ).

Если процедура наблюдений при эксплуатации осуществляется по планам [NMT] или [NM r], то вычисляют суммарную наработку всех объектов по формуле  $S_j = \sum_{i=1}^N s_{ij}$ , где  $s_{ij}$  – общая наработка  $i$ -го образца за время наблюдений в  $j$ -м интервале ( $j = 1, 2$ ).

Средняя наработка на отказ в первом и во втором интервалах

$$\tilde{T}_{12} = \frac{S_1}{m_1}; \quad \tilde{T}_{22} = \frac{S_2}{m_2},$$

где  $m_1, m_2$  – число отказов в первом и во втором интервалах наблюдений, соответственно.

Остаточный срок службы, в годах, вычисляют по формуле [4]

$$T_{0cl} = \frac{1}{8760 \cdot K_3} \left[ \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\tilde{T}_{12}}{\tilde{T}_{22}}} (\ln \tilde{T}_{12} - \ln T_{дон}) + t_1 \right],$$

где  $K_3$  – коэффициент интенсивности эксплуатации.

Приведенные формулы применяют при естественном условии для эксплуатируемого оборудования, когда  $\tilde{T}_{22} \leq \tilde{T}_{12} \leq T_1$  при  $0 \ll t_1 \ll t_2$ .

Распределение остаточного срока службы  $t_{0cl}$  имеет вид

$$F(t_{0cl}) = DN(t_{0cl}; \mu_{cl}, \nu_{cl}) = \Phi \left( \frac{t_{0cl} - \mu_{cl}}{\nu_{cl} \sqrt{\mu_{cl} t_{0cl}}} \right) + \exp \left( \frac{2}{\nu_{cl}^2} \right) \cdot \Phi \left( - \frac{t_{0cl} + \mu_{cl}}{\nu_{cl} \sqrt{\mu_{cl} t_{0cl}}} \right),$$

где  $\Phi(\cdot)$  – функция нормированного нормального распределения;  $t_{0cl}$  – время эксплуатации после момента контроля  $\tau = t_2$ ;  $\mu_{cl} = T_{0cl}$ ;  $\nu_{cl} = \tilde{v} / \sqrt{T_{0cl} / \tilde{T}_{22}}$ .

Если на определенный момент эксплуатации  $\tau$  определены характеристики остаточного срока службы с доверительной вероятностью  $q$ , то, задаваясь соответствующим значением уровня достоверности (гарантии)  $\gamma_p$ , вычисляют регламентированный срок дальнейшей эксплуатации. Значение доверительной вероятности  $\gamma_p$  принимают из сообщений безопасности и экономической целесообразности из ряда: 0,7; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95. При этом  $\gamma_p$  должно быть менее  $q$  ( $\gamma_p < q$ ).

Значение регламентированного срока дальнейшей эксплуатации, в годах, вычисляют по формуле

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \frac{1}{8760 \cdot K_3} \left[ \mu_{cl} \cdot x(1 - \gamma_p^q; \nu_{cl}) \right],$$

где значение  $x(1 - \gamma_p^q; \nu_{cl})$ , равное относительной наработке

$x = \frac{t_{0cl}}{\mu_{cl}}$ , определяют из таблиц функции  $DN$ -распределения

[4] по значениям  $F = 1 - \gamma_p^q$  и  $\nu = \nu_{cl}$  или решая уравнение

$$F = \Phi \left( \frac{x-1}{\nu \sqrt{x}} \right) + \exp \left( \frac{2}{\nu^2} \right) \Phi \left( - \frac{x+1}{\nu \sqrt{x}} \right)$$

относительно  $x$ ;  $\gamma_p^q = \gamma_p / q$ ;  $q = q_1 \cdot q_2$ ;  $q_1$  – доверительная вероятность оценки коэффициента вариации (если коэффициент вариации определялся из таблиц стандартов [1, 2], принимают  $q_1 = 0,9$ );  $q_2$  – доверительная вероятность оценки параметра масштаба  $\mu_{cl}$ , которая может быть вычислена по формуле

$$q_2 = \Phi \left( \frac{\xi \sqrt{2m}}{\tilde{v} \sqrt{1 + \xi^2}} \right); \quad m \text{ – объем статистики отказов, использованной для оценки параметра масштаба } (m = \min[m_1, m_2]);$$

$\xi$  – относительная погрешность оценки параметра масштаба (принимают из ряда: 0,1; 0,2; 0,3).

**Пример.** Группа агрегатов в количестве 6 штук эксплуатировалась в течение 8 лет – с 01.01.1996 г. по 01.01.2004 г. Агрегаты работали по графику переходов, в соответствии с которым переключение происходило попарно, каждые 10 дней. В работе постоянно находились четыре агрегата, а на двух проводилось техническое обслуживание. Необходимо было определить средний остаточный срок службы  $T_{0cl}$  и регламентированный срок дальнейшей эксплуатации  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$  на момент контроля 01.01.2004 г.

Решение. Исследовались резервированные восстанавливаемые объекты. Поскольку объекты содержат электротехнические элементы, в качестве теоретической модели распределения наработки на отказ принималось  $DN$ -распределение.

1. Определялся коэффициент вариации наработки на отказ исследуемых агрегатов. Из анализа механизмов отказов компонентов объекта и с учетом статистики отказов аналогов принято среднее значение коэффициента вариации наработки на отказ  $\tilde{v} = 0,7$ .

2. Общее время наблюдений разбивалось на два интервала: первый – с 01.01.1996 г по 31.12.1999 г; второй – с 01.01.2000 г по 01.01.2004 г.

3. На основании статистики отказов первого интервала вычислялось значение средней наработки между отказами  $\tilde{T}_{12}$  для момента эксплуатации  $t_1 = 35040$  ч:

а) рассчитывалась суммарная наработка 6 насосных агрегатов за первые четыре года:  $S_1 = n_1 \cdot (4 \cdot 365 \cdot 24) = 140160$  ч, где  $n_1$  — число агрегатов, находящихся постоянно в работе ( $n_1 = 4$ );

б) вычислялась средняя наработка на отказ в первом интервале:

$$\tilde{T}_{12} = \frac{S_1}{m_1} = 28032 \text{ ч},$$

где  $m_1$  — число отказов в первом интервале ( $m_1 = 5$ ).

4. Аналогично вычислялась средняя наработка на отказ во втором интервале наблюдений  $\tilde{T}_{22}$  для времени эксплуатации  $t_2 = 70080$  ч ( $S_2 = S_1 = 140160$  ч):

$$\tilde{T}_{22} = \frac{S_2}{m_2} = 23360 \text{ ч},$$

где  $m_2$  — число отказов во втором интервале ( $m_2 = 6$ ).

5. В качестве критерия предельного состояния принято значение  $T_{дон} = 1$  год = 8760 ч.

6. Вычислялся остаточный срок службы (после 01.01.2004 г.) по приведенной выше формуле (коэффициент интенсивности эксплуатации  $K_э$  учтен при определении времени  $t_1$  и  $t_2$ ):

$$T_{0сл} = \frac{1}{8760} \left[ \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\tilde{T}_{12}}{\tilde{T}_{22}}} (\ln \tilde{T}_{12} - \ln T_{дон}) + t_1 \right] =$$

$$= \frac{1}{8760} \left[ \frac{70080 - 35040}{\ln \frac{28032}{23360}} (\ln 28032 - \ln 8760) + 35040 \right] = 29,5 \text{ года}.$$

7. Вычислялся параметр масштаба распределения остаточного срока службы  $t_{0сл}$ :  $\mu_{сл} = T_{0сл} = 29,5$  года.

8. Рассчитывался параметр формы распределения остаточного срока службы:

$$\nu_{сл} = \tilde{\nu} / \sqrt{T_{0сл} / \tilde{T}_{22}} = 0,7 / \sqrt{29,5 \cdot 8760 / 23360} = 0,21.$$

9. Вычислялась доверительная вероятность оценки остаточного срока службы (принято:  $\xi = 0,3$ ;  $q_1 = 0,9$ ;  $m = \min [m_1, m_2] = 5$ ):

$$q = q_1 \cdot q_2 = 0,9 \cdot \Phi \left( \frac{\xi \sqrt{2m}}{\tilde{\nu} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \xi^2}}} \right) =$$

$$= 0,9 \cdot \Phi \left( \frac{0,3 \cdot \sqrt{10}}{0,7 \cdot 1,43} \right) = 0,9 \cdot \Phi(0,948) = 0,9 \cdot 0,823 = 0,74.$$

10. Принято  $\gamma_p = 0,7$  и определено  $\gamma_p^q = \frac{\gamma_p}{q} = \frac{0,7}{0,74} = 0,945$ .

11. Вычислялся регламентированный срок дальнейшей эксплуатации  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$  (коэффициент интенсивности эксплуатации  $K_э$  учтен при определении времени  $t_1$  и  $t_2$ ):

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \mu_{сл} \cdot x(1 - \gamma_p^q; \nu_{сл}) = 29,5 \cdot x(0,055; 0,21) =$$

$$= 29,5 \cdot 0,71 = 20,9 \text{ года}.$$

## Литература

- ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. — Введ. 01.01.99. — 43 с.
- ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. — Введ. 01.01.96. — 122 с.
- Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы / М. А. Ястребенецкий, В. Н. Васильченко, С. В. Виноградская и др.; Под ред. М. А. Ястребенецкого. — К.: Техніка, 2004. — 472 с.
- Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. — К.: Логос, 2002. — 486 с.