

## ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Разработаны методы экспертных оценок для прогнозирования и продления срока эксплуатации сложных технических систем. Задача рассматривается в двух постановках, когда техническая система представляется как многопараметрическая система с взаимозависимыми характеристиками и когда оценка возможности продления срока эксплуатации элементов технической системы проводится с использованием функции предпочтения.

Розроблені методи експертних оцінок для прогнозування і продовження строку експлуатації складних технічних систем. Завдання розглядається у двох постановках, коли технічна система представляється як багатопараметрична система із взаємозалежними характеристиками і коли оцінка можливості продовження строку експлуатації елементів технічної системи проводиться з використанням функції переваги.

Methods of expert evaluation for prediction and prolongation of service life of complicated engineering systems are developed. Two approaches are examined, when the engineering system is considered as a multi-parameter system with interdependent characteristics and when evaluation of the possibility of service life prolongation of the engineering system elements is carried out using preference functions.

В настоящее время достаточно четко просматривается тенденция, заключающаяся в том, что у многих сложных технических систем, изготовленных в Советском Союзе, закончились гарантийные сроки эксплуатации. Возможность продления срока эксплуатации этих изделий в дальнейшем представляет серьезный резерв для экономии средств, материалов, энергии и трудовых затрат.

В связи с отсутствием во многих случаях статистической и другой информации об объекте исследования, а также надежных методов определения соответствия математических моделей реальным объектам экспертные оценки являются одними из возможных средств решения многих задач.

Методы экспертных оценок также используются для прогнозирования событий будущего, если отсутствуют статистические данные или их недостаточно. Они применяются для количественного измерения таких событий, для которых не существует других способов измерения [1 – 6].

Методы экспертных оценок для указанного класса задач позволяют определять численные значения оцениваемых величин в условиях неопределенности или неполной информации.

К основным функциям продления срока эксплуатации технической системы сверх назначенного срока можно отнести:

- проведение комплексного обследования технической системы (по программе, разработанной эксплуатирующей организацией) и сбор данных (целью этого обследования является оценка фактического состояния ее элементов и определение их остаточного ресурса);
- проведение испытаний элементов технической системы, необходимых для подтверждения соответствия их техническим требованиям;
- принятие решения по оценке возможности продления срока эксплуатации сверх назначенного срока, включая обоснование остаточного ресурса элементов (должно быть выполнено с учетом изменения параметров технологического режима в течение предыдущего срока эксплуатации), замену элементов, выработавших свой ресурс;
- определение и реализацию необходимых мер по восстановлению ресурса элементов, влияющих на безопасность эксплуатации технической системы: достаточность технических и организационных мер обосновывает эксплуатирующая организация;

– обоснование и обеспечение необходимого контроля текущего состояния систем и элементов технической системы после корректировки остаточного срока эксплуатации;

– оперативное управление для проведения работ по подготовке технической системы к эксплуатации в течение дополнительного срока эксплуатации.

Важнейшим элементом оценки возможности продления срока эксплуатации сложной технической системы является получение достоверной информации с помощью технических средств диагностирования.

В нормативно-технической документации под ресурсом подразумевают наступление предельного состояния, после которого его эксплуатация является опасной или нецелесообразной. Предельное состояние может наступить, в одних случаях, из-за морального износа, в других – из-за чрезмерного снижения показателей эффективности, которое делает дальнейшую эксплуатацию экономически неоправданной, в третьих – из-за снижения показателей безопасности ниже предельно допустимого уровня.

Прогнозирование ресурса технической системы позволяет не только предупредить возможные отказы, но и правильно планировать режимы дальнейшей эксплуатации, профилактические мероприятия и снабжение запасными частями.

Информацию, которая служит основой прогнозирования ресурса технической системы, условно можно разделить на три части.

Первая часть информации может быть получена по данным текущего поиска дефектов в процессе эксплуатации технической системы. Следует отметить, что диагностическая информация, в принципе, ограничена по объему и носит лишь косвенный характер. Существующие средства неразрушающего контроля не позволяют обнаружить все повреждения, которые в дальнейшем могут стать причиной наступления предельного состояния элементов оборудования.

Вторая часть информации обусловлена условиями эксплуатации технической системы.

Третий вид информации для прогнозирования возможного срока продления дает весь объем априорных данных о материалах, элементах, нагрузках за весь предшествующий период времени.

Применительно к прогнозированию продления срока эксплуатации сложной технической системы основную роль играют данные о нагрузках, изменении свойств материалов и условиях эксплуатации.

Понятие срока продления в случае экспертного оценивания представляет собой математическую формализацию интуитивных представлений, которые использует группа экспертов при обсуждении вопроса о возможности дальнейшей эксплуатации конкретного вида технической системы.

Целесообразность использования метода экспертных оценок для прогнозирования срока продления эксплуатации сложной технической системы обуславливается тем, что он позволяет определять конкретные численные значения оцениваемой величины, несмотря на разнородность информации количественного и качественного характера.

Экспертная оценка продления срока эксплуатации технической системы проводится в два этапа.

На первом этапе формируется группа квалифицированных экспертов, которая дает оценку возможности срока продления эксплуатации элементов технической системы, а на втором этапе проводится математическая обработка полученных экспертных оценок.

Техническая система рассматривается как многопараметрическая система с взаимозависящими характеристиками, поэтому для прогнозирования ее возможного срока продления необходим математический аппарат, позволяющий решать задачи, связанные с получением информации, определением значений параметров и их оптимизацией.

Рассмотрим два возможных подхода к решению этой задачи.

### Первый подход

Техническая система рассматривается как система, состоящая из ряда элементов.

Проводится оценка возможного срока продления эксплуатации каждого элемента по значениям некоторого набора свойств.

В процессе экспертной процедуры оценивается либо степень возможности продления срока эксплуатации  $l$ -го элемента оборудования по  $j$ -му свойству на заданную величину, либо максимально возможные величины продления срока эксплуатации  $l$ -го элемента оборудования по  $i$ -му свойству.

Для учета неравнозначности влияния свойств на решение задачи о продлении срока эксплуатации элемента вводится показатель весомости  $j$ -го свойства в  $l$ -м элементе оборудования  $w_j$ .

Для учета неравнозначности влияния элементов оборудования на решение задачи о продлении срока эксплуатации вводится показатель важности  $l$ -го элемента  $S_l$ .

Для оценки величин коэффициентов компетентности экспертов  $\alpha_{0j}$  при оценивании ими срока продления эксплуатации элемента  $t_{jl}$  выбирается шкала компетентности экспертов от 1 до 10.

При использовании этой шкалы наиболее компетентному в данной области эксперту выставляется высший балл – 10, а всем остальным экспертам выставляются баллы в сравнении с этим экспертом, т.е. компетентность экспертов ранжируется друг относительно друга.

Рассчитывается оценка коэффициентов компетентности экспертов методом взаимной оценки экспертами друг друга по формуле

$$\alpha_{vjэ} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \alpha_{ivjэ} . \quad (1)$$

Величины  $\alpha_{ivjэ}$  первоначально оцениваются экспертной группой, для чего ею заполняется таблица 1.

Таблица 1 – Коэффициенты компетентности экспертов  $\alpha_{ivjэ}$

Номер эксперта	Коэффициенты компетентности экспертов по свойствам				
	1	...	$j$	...	$n$
1	$\alpha_{i11э}$	...	$\alpha_{i1jэ}$	...	$\alpha_{i1nэ}$
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	...	$\vdots$
$v$	$\alpha_{iv1э}$	...	$\alpha_{ivjэ}$	...	$\alpha_{ivnэ}$
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	...	$\vdots$
$m$	$\alpha_{im1э}$	...	$\alpha_{imjэ}$	...	$\alpha_{imnэ}$

Коэффициент компетентности определяется по формуле

$$\alpha_{ij} = 0,4\alpha_{ij\varepsilon} + 0,3(\alpha_{ij\rho} + \alpha_{ij\varepsilon}) . \quad (2)$$

Для оценки величин продления срока эксплуатации (СЭ) элементов технической системы по свойствам эксперты используют данные, полученные об условиях эксплуатации системы, действующих нагрузках и состоянии отдельных узлов и агрегатов, и заполняют таблицу 2.

Таблица 2 – Оценки величин продления СЭ элементов по свойствам

Номер эксперта	Оценки величин продления СЭ элементов по свойствам				
	1	...	$l$	...	$L$
1	$t_{i11}$	...	$t_{i1l}$	...	$t_{i1L}$
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
$j$	$t_{ij1}$	...	$t_{ijl}$	...	$t_{ijL}$
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
$m$	$t_{in1}$	...	$t_{inl}$	...	$t_{inL}$

Полагая, что величины  $t_{ijl}$  являются результатами независимых испытаний и распределены по нормальному закону, экспертная группа определяет параметры распределения случайных величин  $t_{jl}$ .

Для этого составляется функция максимального правдоподобия в виде

$$Q = \prod_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{\alpha_{ij}}}{\sigma_i} \exp \left[ -\frac{(t_{ijl} - m_{tijl})^2}{2\sigma_i^2} \alpha_{ij} \right], \quad (3)$$

где параметр  $\sigma_i$  учитывает случайный характер ошибки  $i$ -го эксперта при оценке величины продления срока эксплуатации оборудования.

Для повышения точности получаемых результатов проводится проверка согласованности мнений экспертов, которая заключается в том, что каждая реализация оценки  $t_{ijl}$  проверяется на принадлежность некоторому отрезку от  $t_{jl}$ . При этом, если реализация оценки  $t_{ijl}$  принадлежит данному отрезку, построенному по определенному правилу, то считается, что мнение  $i$ -го эксперта при оценке им  $t_{jl}$  согласовано с мнениями других экспертов, и наоборот.

Математически эта проверка основана на том, что с доверительной вероятностью  $\gamma$  реализация  $t_{ijl}$  принадлежит к данной  $\{j, l\}$  генеральной совокупности, если выполняется неравенство

$$|t_{ijl} - m_{tjl}| \leq r_\gamma \sqrt{\frac{m}{m-1}} \sigma_{tjl}, \quad (4)$$

где  $r_\gamma$  – квантиль  $r$  распределения с  $m - 2$  степенями свободы, отвечающая доверительной вероятности  $\gamma$

$$r_\gamma = \frac{\sqrt{m-1} \cdot t_\gamma}{\sqrt{t_\gamma^2 + (m-2)}}, \quad (5)$$

где  $t_\gamma$  – квантиль распределения Стьюдента с  $m - 2$  степенями свободы, отвечающая доверительной вероятности  $\gamma$ , которую целесообразно назначать из условия  $\gamma \geq 0,8$ .

Методика предполагает корректировку реализации  $t_{kjl}$ , если не выполняется условие (4). Корректировка производится следующим образом. Если  $t_{kjl} > m_{tjl}$ , то величине  $t_{kjl}$  присваивается значение:

– первый вариант:  $t_{kjl} =$  (первый знак после запятой величины  $m_{tjl} + 0,1$ );

– второй вариант:  $t_{kjl} =$  (целочисленная часть величины  $m_{tjl} + 1$ ).

Если  $t_{kjl} < m_{tjl}$ , то:

– первый вариант:  $t_{kjl} =$  (первый знак после запятой величины  $m_{tjl} - 0,1$ );

– второй вариант:  $t_{kjl} =$  (целочисленная часть величины  $m_{tjl} - 1$ ).

На этом этапе проводится корректировка коэффициентов компетентности экспертов  $\alpha_{ivj\partial}$  по формуле

$$\alpha_{ivj\partial} = \alpha_{ijl}(1 - \delta_{ijl}), \quad (6)$$

где

$$\delta_{kjl} = \frac{(t_{kjl} - m_{tjl})^2}{\sum_{k=1}^m (t_{kjl} - m_{tjl})^2}. \quad (7)$$

Величина  $\delta_{kjl}$  характеризует удаленность оценки  $t_{kjl}$  от  $m_{tjl}$ .

В формуле (7) должны быть представлены значения  $t_{kjl}$  до корректировки, и корректировке подвергаются коэффициенты компетентности всех экспертов.

При решении вопроса по определению срока эксплуатации с учетом показателей весомости свойств в элементах  $w_{ij}$  необходимо учитывать, что компетентность экспертов базируется на одной и той же области знания. Поэтому по предварительному решению экспертной комиссии может быть принято

$$\beta_{ij} = \alpha_{ijl} \left( i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n} \right). \quad (8)$$

В противном случае  $\beta_{ij}$  может определяться способом, аналогичным способу определения  $\alpha_{ijl}$ .

После определения экспертной комиссией величины  $\beta_{ij}$  эксперты оценивают величины  $w_j$  и заполняют таблицу 3.

Таблица 3 – Оценки показателей весомости свойств в элементах

Свойство	1	...	$j$	...	$n$
Оценка показателя весомости	$w_{i1}$	...	$w_{ij}$	...	$w_{in}$

Параметры  $m_{wj}$  и  $\sigma_{wj}$  определяются с использованием функции максимального правдоподобия (3):

$$m_{wj} = \frac{\sum_{i=1}^m \beta_{ij} w_{ij}}{\sum_{i=1}^m \beta_{ij}}, \quad (9)$$

$$\sigma_{wj}^2 = \frac{1}{m-1} \frac{\sum_{i=1}^m \beta_{ij} (w_{ij} - m_{wj})^2}{\sum_{i=1}^m \beta_{ij}}. \quad (10)$$

Проверка согласованности мнений экспертов, корректировка мнений экспертов и корректировка коэффициентов компетентности экспертов при определении  $w_i$  производится аналогично, как и при определении  $t_{jl}$ , по формуле

$$|w_{ij} - m_{wj}| > r \sqrt{\frac{m}{m-1}} \sigma_{wj}. \quad (11)$$

Корректировка величины  $w_{ij}$  проводится по принципу:

- если  $w_{ij} > m_{wj}$ , то  $w_{ij} = (\text{целочисленная часть величины } m_{wj} + 1)$ ;
- если  $w_{ij} < m_{wj}$ , то  $w_{ij} = (\text{целочисленная часть величины } m_{wj} - 1)$ .

В этом случае величины  $\beta_{ijp}$  определяются как

$$\beta_{ijp} = \beta_{ij} (1 - \delta w_{ij}), \quad (12)$$

где

$$\delta w_{ij} = \sqrt{\frac{(w_{kj} - m_{wj})^2}{\sum_{k=1}^m (w_{kj} - m_{wj})^2}}. \quad (13)$$

Окончательно определение величины возможного продления срока эксплуатации элементов технической системы  $T_l$  проводится по формуле

$$T_l = \frac{\sum_{j=1}^m t_{jl} w_j}{\sum_{j=1}^m w_j}. \quad (14)$$

Параметры распределения величин  $T_l$  определяются из выражений:

$$m_{T_l} = \frac{\sum_{j=1}^n m_{t_{jl}} m_{w_j}}{\sum_{j=1}^n m_{w_j}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{T_l}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \{ \sigma_{t_{jl}}^2 \sigma_{w_j}^2 + m_{t_{jl}}^2 \sigma_{w_j}^2 + m_{w_j}^2 \sigma_{t_{jl}}^2 \} - m_{T_l}^2 \sum_{j=1}^n \sigma_{w_j}^2}{\sum_{j=1}^n \sigma_{w_j}^2 + \sum_{j=1}^n m_{w_j}^2}. \quad (16)$$

### Второй подход

Оценка возможности продления срока эксплуатации элементов технической системы проводится с использованием функции предпочтения.

Пусть элементы рассматриваемого оборудования характеризуются  $n$  свойствами, которые обозначим через  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . С возможными значениями каждого свойства свяжем функцию предпочтения  $R(x)$ , монотонно изменяющуюся в пределах от 0 до 1. Значение  $R = 0$  соответствует неприемлемому значению этих свойств, а  $R = 1$  – полностью удовлетворяет требованиям по эксплуатации, которые содержатся в технической документации.

Границы уменьшения функции предпочтения в этом случае устанавливаются в виде

$$R^* = R(x_*), \quad R^{**} = R(x_{**}), \quad (17)$$

где  $x_*$  и  $x_{**}$  – значения натуральных показателей свойств элементов, которые выставляются экспертами на основе требований технической документации по использованию данного вида систем.

Для каждого свойства элемента технической системы устанавливаются свои значения  $x_*$  и  $x_{**}$  и уровни предпочтения  $R^*$ ,  $R^{**}$ .

Полагаем, что  $R^*$  изменяется в диапазоне от 0,01 до 0,3 и  $R^{**}$  изменяется в диапазоне от 0,7 до 0,99.

В качестве функции предпочтения (желательности) может использоваться любое из известных распределений. На наш взгляд, более удобной для этих целей является функция распределения Вейбулла

$$R(x) = 1 - \exp(-\lambda x^\beta). \quad (18)$$

Параметры этой функции  $\lambda$  и  $\beta$  могут быть найдены из уравнений

$$R^*(x) = 1 - \exp(-\lambda x_*^\beta), \quad (19)$$

$$R^{**}(x) = 1 - \exp(-\lambda x_{**}^\beta). \quad (20)$$

Из соотношений (19) и (20) получим

$$\beta = \frac{\ln \left[ \frac{\ln(1 - R^*)}{\ln(1 - R^{**})} \right]}{\ln \frac{x_*}{x_{**}}}, \quad (21)$$

$$\lambda = -\frac{\ln(1 - R^*)}{x_*^\beta}. \quad (22)$$

Для каждого свойства элемента технической системы приводятся значения  $x_{ij}$  ( $i = \overline{1, n}; j = \overline{1, k}$ ), где  $n$  – число свойств элемента оборудования,  $k$  – количество рассматриваемых элементов.

Далее вычисляются частные значения функции предпочтения.

Если эксперты считают, что все свойства элементов технической системы имеют одинаковую важность, то обобщенная функция предпочтения определится как среднее геометрическое из частных функций предпочтения

$$r_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n R_{ij}}. \quad (23)$$

Если эксперты считают, что свойства элементов оборудования имеют разную значимость, то формула (21) принимает вид

$$r_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n R_{ij}^{d_i}}. \quad (24)$$

При этом коэффициент важности свойства может вычисляться по формуле

$$d_i = \frac{i}{2^{i-1}}, \quad (25)$$

где  $i$  – место, занимаемое свойством, при ранжировании всех свойств элементов оборудования.

Для каждого из  $k$  элементов технической системы вычисляется обобщенная функция предпочтения  $r_j$ . Максимум полученной функции определяет значения срока продления эксплуатации элемента оборудования  $t_i$ .

Далее рассчитываются параметры распределения величины продления срока эксплуатации технической системы в целом

$$T = \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{k}, \quad (26)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (t_j - T)^2} . \quad (27)$$

Предлагаемые подходы могут быть использованы при принятии наиболее предпочтительных управленческих решений в условиях неопределенности, когда информация об объекте исследования ограничена или недостаточна [6].

1. *Башильков А. А.* Экспертные системы принятия решений в энергетике / *А. А. Башильков, А. П. Еремеев.* – М. : МЭИ, 1994. – 216 с.
2. *Бешелев С. Д.* Математико-статистические методы экспертных оценок / *С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич.* – М. : Статистика, 1980. – 263 с.
3. Вопросы кибернетики. Принятие решений и анализ экспертной информации. – М. : ВИНТИ, 1989. – 180 с.
4. *Еремеев А. П.* Экспертные модели и методы принятия решений / *А. П. Еремеев.* – М. : МЭИ, 1995. – 110 с.
5. *Ларичев О. И.* Качественные методы принятия решений / *О. И. Ларичев, Е. М. Мошкович.* – М. : Физматлит, 1996. – 278 с.
6. *Переверзев Е. С.* Принятие предпочтительных управленческих решений / *Е. С. Переверзев, В. П. Пошивалов* // Методы менеджмента качества. – 2002. – №5. – С. 41 – 43.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 03.10.11,  
в окончательном варианте 25.10.11