

Сборник докладов на Международной конференции «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС», Киев, 2003

СПОСОБЫ ОЦЕНИВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

METHODS OF ESTIMATION OF RESIDUAL RESOURCE OF SAFETY SYSTEMS

Белов В. П., Голяков А. Д., Сычѳв В. А.

Belov V.P., Golyakov A.D., Sichjov V.A.

Based on implemented studies and experimental researches of the estimation methods of residual resource, it is shown that the use of the prediction methods of individual and group resources based on the self-organization principle is the most advantageous for an atomic power plant safety system.

Safety, estimation, residual resource, self-organization principle

В современных условиях существует и углубляется противоречие между необходимостью выполнения возрастающих по своей сложности задач по обеспечению безопасной эксплуатации АЭС и ограниченными возможностями по восстановлению технического ресурса стареющего оборудования. Одним из способов устранения этого противоречия является определение фактического состояния систем безопасности, входящих в состав оборудования АЭС, путѳм оценивания их ресурса.

В научно-исследовательском институте точной механики, непосредственно участвующем в разработке систем безопасности, пожаро-взрывопреждения и тушения ракетно-космической техники, а также систем обеспечения безопасности управления движением поездов метрополитена, накоплен многолетний опыт при решении многих задач, связанных с разработкой и продлением сроков дальнейшей эксплуатации потенциально опасных систем и объектов. Результаты эксплуатации разработанных систем безопасности, благодаря присущим этим системам свойствам самоорганизации и саморегулирования при возникновении угрозы, подтверждают высокий уровень их надёжности в широком диапазоне внешних возмущающих факторов.

Потребность в оценивании технического ресурса систем обеспечения безопасности возникает на двух этапах: на этапе определения назначенных показателей технического ресурса и на этапе продления этих показателей. Первый из названных этапов получил название априорного оценивания долговечности, а второй – апостериорного оценивания долговечности потенциально опасных объектов и систем, к которым, безусловно, относятся АЭС.

Обоснованное решение при назначении или продлении ресурса таких объектов базируется на результатах оценивания его остаточных значений. Под остаточным ресурсом понимается суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние [1].

Этап априорного оценивания долговечности обусловлен острой необходимостью более полного использования технического ресурса, заложенного

при проектировании и изготовлении систем обеспечения безопасности потенциально опасных объектов.

В тех случаях, когда назначенные показатели долговечности систем обеспечения безопасности по результатам их эксплуатации оказались заниженными, проводится этап апостериорного оценивания. Это вызвано современной потребностью более эффективного использования материальных средств, затраченных на всех этапах жизненного цикла таких систем.

В настоящее время разработан достаточно большой арсенал методов оценивания остаточного ресурса, т.е. методов прогнозирования момента перехода технического объекта в предельное состояние. Проведённый анализ этих методов показал, что их можно классифицировать по трём признакам:

- по виду оцениваемого показателя;
- по категории ресурсного отказа;
- по способу получения исходных данных.

Вид оцениваемого показателя определяется требуемой формой представления результатов прогноза. Эта форма может иметь параметрический или вероятностный вид. Поэтому различают параметрическое и вероятностное оценивание.

При параметрическом оценивании искомый результат формируется в виде конкретного показателя долговечности систем обеспечения безопасности. Параметрическое оценивание подразделяется на детерминированное и стохастическое.

В случае вероятностного оценивания определяется вероятность того, что показатель долговечности не выйдет за установленные границы.

Ресурсные отказы в зависимости от скорости изменения значений одного или нескольких параметров систем обеспечения безопасности объекта различаются на две категории: постепенные и внезапные. Постепенные отказы присущи, как правило, таким системам, у которых параметры, определяющие предельное состояние, изменяются достаточно монотонно, поддаются измерениям и, самое главное, измеряются при эксплуатации. Всем другим системам свойственны внезапные отказы. В соответствии с этим признаком классификации различаются методы оценивания момента наступления постепенного и внезапного отказов.

Для оценивания остаточного ресурса применяются два способа получения исходных данных. Основой одного способа является сбор сведений об оцениваемом параметре с помощью некоторой группы однотипных объектов. Другой способ заключается в наблюдении за поведением конкретного объекта. Поэтому методы оценивания остаточного ресурса с учётом этого признака подразделяются на групповые и индивидуальные.

При использовании групповых методов оценивается так называемый статистический остаточный ресурс, а при использовании индивидуальных методов – индивидуальный остаточный ресурс.

Приведённая классификация не исчерпывает всего многообразия возможных методов оценивания остаточного ресурса. В частности, к классификационным признакам относятся: возможность использования априорной информации, этапы жизненного цикла системы обеспечения безопасности объекта, продолжительность времени прогноза и т.п.

Эксплуатацию наиболее важных и ответственных объектов, к которым относятся системы обеспечения безопасности АЭС, целесообразно проводить по их фактическому состоянию. Специфической особенностью этих систем является их высокий уровень надёжности, обусловленный целевыми функциями, которые они выполняют при функционировании. Для такого типа систем применяются методы прогнозирования индивидуального ресурса.

В настоящее время разработан и продолжает совершенствоваться достаточно большой арсенал методов прогнозирования индивидуального ресурса технических объектов и систем. К группе этих методов, например, относятся:

- метод Заде-Рагазини;
- метод Бокса-Дженикса;
- метод экспоненциального сглаживания;
- метод сплайн-аппроксимации и др.

В основе этих методов лежит задача экстраполяции стационарного или нестационарного случайного процесса. При этом детерминированная компонента случайного процесса, т.е. его математическое ожидание, аппроксимируется полиномами первой, второй и третьей степени.

В связи с необходимостью построения адекватных моделей прогноза индивидуального ресурса высоконадёжных систем в научно-исследовательском институте точной механики (НИИ ТМ) был проведён комплекс исследований данной группы методов. В результате исследований установлено, что для построения моделей прогноза индивидуального ресурса целесообразно использовать методы, основанные на принципе самоорганизации, в частности метод группового учёта аргументов А. Г. Ивахненко [2].

Сущность метода группового учёта аргументов заключается в целенаправленном переборе многих моделей-претендентов различной сложности по выбранному критерию. В качестве основных критериев используются критерии регулярности, т.е. критерий минимума относительной квадратической погрешности (или максимума коэффициента корреляции) на отдельной проверочной последовательности исходных данных.

При использовании критерия регулярности для построения математической модели определяющего параметра все имеющиеся на данный момент времени исходные данные разделяются на две части: на обучающую и проверочную последовательности. В случае достаточно большого объёма исходных данных выделяется также ещё одна дополнительная их часть, которая называется экзаменационной.

Математическая модель параметра, определяющего предельное состояние системы обеспечения безопасности объекта, строится в области полиномов вида

$$y(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i + \sum_{j=2}^n b_j t^{j-1}, \quad n \leq n_{\max}, \quad (1)$$

где a_i и b_j - неизвестные коэффициенты;

n_{\max} - установленное значение максимальной степени полинома. В результате исследований показано, что в большинстве случаев максимальная степень полиномов не превышает шести.

Расчёт коэффициентов математической модели производится методом наименьших квадратов с помощью обучающей части исходных данных объёмом k_o .

В качестве показателей точности (адекватности) математических моделей определяющего параметра системы обеспечения безопасности выбираются относительные квадратические погрешности временных трендов

$$\Delta_n^2(y) = \frac{\sum_{j=1+k_o}^k (y_{jn} - \tilde{y}_j)^2}{\sum_{j=1+k_o}^k \tilde{y}_j^2}, \quad (2)$$

где \tilde{y}_j - измеренное значение определяющего параметра;

y_{jn} - значение определяющего параметра в j -ый момент времени, полученное с помощью v -ой модели;

k - объём исходных данных: $k = k_n + k_o$;

k_n - объём проверочной части исходных данных.

Наиболее адекватной признаётся модель, у которой относительная квадратическая погрешность принимает наименьшее значение. Высокой степенью адекватности обладают модели, имеющие относительную квадратическую погрешность менее 1%.

Показателями остаточного ресурса являются средний остаточный ресурс $T(t)$ и гамма-процентный остаточный ресурс $T_g(t)$. Для расчёта этих показателей используются следующие известные соотношения [1]

$$T(t) = \int_0^{\infty} P_t(t) dt, \quad (3)$$

$$P_t[t + T_g(t)] = \frac{g}{100}, \quad (4)$$

где $P_t(t)$ - условная вероятность недостижения предельного состояния в течение прогнозируемого периода;

t - момент времени проведения последнего измерения определяющего предельное состояние параметра.

При наличии у системы обеспечения безопасности объекта нескольких определяющих предельное состояние параметров условная вероятность $P_t(t)$ определяется из выражения

$$P_t(t) = \prod_{r=1}^M P_{rt}(t) = \prod_{r=1}^M \frac{P_r(t+t)}{P_r(t)}, \quad (5)$$

где $P_{rt}(t)$ - условная вероятность недостижения предельного состояния в течение прогнозируемого периода по r -му определяющему параметру;

$P_r(t+t)$ - вероятность недостижения предельного состояния по r -му определяющему предельное состояние параметру в момент времени $t+t$;

M - количество определяющих предельное состояние параметров системы обеспечения безопасности объекта.

В зависимости от вида допуска определяющего предельное состояние параметра вероятность $P_r(t+t)$ находится по формулам:

при двухстороннем допуске

$$P_r(t+t) = \frac{1}{\sqrt{2pS_r^2(t+t)}} \int_{y_r^u}^{y_r^e} \exp\left\{-\frac{[y_r - \bar{y}_r(t+t)]^2}{2S_r^2(t+t)}\right\} dy_r, \quad (6)$$

при одностороннем допуске с верхней границей

$$P_r(t+t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2pS_r^2(t+t)}} \int_{y_r^e}^{\infty} \exp\left\{-\frac{[y_r - \bar{y}_r(t+t)]^2}{2S_r^2(t+t)}\right\} dy_r; \quad (7)$$

при одностороннем допуске с нижней границей

$$P_r(t+t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2pS_r^2(t+t)}} \int_{-\infty}^{y_r^e} \exp\left\{-\frac{[y_r - \bar{y}_r(t+t)]^2}{2S_r^2(t+t)}\right\} dy_r; \quad (8)$$

где y_r^e и y_r^u - верхняя и нижняя границы допуска r -го определяющего предельное состояние параметра системы обеспечения безопасности объекта;

$\bar{y}_r(t)$ - наиболее адекватная модель r -го определяющего параметра;

$S_r^2(t+t)$ - дисперсия r -го определяющего параметра, математическая модель которой строится также с помощью метода группового учёта аргументов.

При проведении работ по продлению ресурса (срока службы) системы обеспечения безопасности объекта, изготовленного в одном экземпляре, оценка дисперсии определяющего предельное состояние параметра рассчитывается по формуле

$$S_i^2 = S_{ocm}^2 X_i (X_i^T X_i)^{-1} X_i^T, \quad (9)$$

где S_{ocm}^2 - остаточная дисперсия:

$$S_{ocm}^2 = \frac{1}{n - k_o} \sum_{i=1}^{k_o} (y_{in} - \tilde{y}_i)^2,$$

X_i - вектор-строка значений функций $x_h = t^h$, $h = \overline{0, n}$ и $x_m = t^{m-1}$, $m = \overline{2, n}$

соответствующих моменту времени t_i , т.е. $X_{ai} = [1 \ t_i \ t_i^2 \ \dots \ t_i^n \ \sqrt{t_i} \ \sqrt[3]{t_i} \ \dots \ \sqrt[n]{t_i}]$.

Прогнозирующие модели определяющих параметров и дисперсий, полученные с помощью методов самоорганизации, имеют объективный характер, так как строятся на основе имеющихся данных наблюдений при минимальном участии человека и его субъективного представления о техническом объекте.

Проведенные в научно-исследовательском институте точной механики экспериментальные исследования, показали достаточно высокую эффективность разработанного метода. По результатам многолетних наблюдений за находящимися в эксплуатации покупными изделиями, а также приборами и датчиками, разработанными в НИИ ТМ, построены математические модели их определяющих параметров.

Например, математические модели определяющего параметра и его дисперсии генератора импульсов, входящего в состав одной из систем безопасности, имеют соответствующий вид

$$T_{ГН}(t) = 3,117 - 0,009\sqrt[3]{t}; \quad (10)$$

$$S_{ГН}^2(t) = 1,401 + 0,580t - 0,084t^2 + 0,001t^5. \quad (11)$$

Анализ полученных результатов показывает, что математическая модель периода следования импульсов генератора построена с достаточно высокой

точностью. Значения относительных погрешностей не превышают (0,5 – 1)%. Модель дисперсии определяющего параметра генератора импульсов имеет меньшую степень адекватности. Относительное среднее квадратическое отклонение погрешности этой модели составляет (5 – 10)%.

На основании проведённых исследований для решения вопросов о продлении назначенных показателей ресурса (срока службы) технических объектов в НИИ ТМ разработана Методика. В этой Методике используется метод индивидуального оценивания при наличии текущих наблюдений параметров, определяющих техническое состояние систем обеспечения безопасности объекта.

При отсутствии таких параметров в Методике предусмотрена реализация методов группового оценивания ресурса по измерениям наработки (календарной продолжительности эксплуатации объекта) и по результатам ускоренных испытаний на безотказность.

Ускоренные испытания технических объектов на безотказность проводятся в форсированных режимах при климатических и механических воздействующих факторах в испытательном центре НИИ ТМ. Этот центр сертифицирован Госстандартом РФ в части проведения испытаний электронной техники, электротехнических изделий, приборов и средств автоматики. В состав оборудования центра входят стенды для механических испытаний, климатические и вакуумные камеры, а также установки для электрических испытаний, в том числе на безопасность.

Апробация способов оценивания остаточного ресурса выполнена на ряде изделий НИИ ТМ и других организаций, в частности организаций Министерства РФ по атомной энергетике.

Литература

1. Надежность и эффективность в технике: Справочник: т.6: Экспериментальная отработка и испытания / Под ред. Р. С. Судакова, О. И. Тескина. - М.: Машиностроение, 1989. - 376с.

2. Ивахненко А. Г., Зайченко Ю. П., Дмитриев В. Д. Принятие решений на основе самоорганизации - М.: Сов. Радио, 1976. - 220с.