

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕКУЩИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА САМООРГАНИЗАЦИИ

*Белов В. П., Голяков А. Д.
(Научно-исследовательский институт точной механики,
г. Санкт-Петербург, Россия)*

В современных условиях существует и углубляется противоречие между необходимостью выполнения возрастающих по своей сложности задач и ограниченными возможностями по восстановлению технического ресурса стареющего оборудования. Одним из способов устранения этого противоречия является определение фактического состояния технических объектов, входящих в состав оборудования, путём оценивания их ресурса.

Потребность в оценивании технического ресурса 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 технических объектов.

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

Этап априорного оценивания долговечности обусловлен острой необходимостью более полного использования технического ресурса, заложенного при проектировании и изготовлении объектов.

В тех случаях, когда назначенные показатели долговечности технических объектов 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 объектов.

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. 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 объекта различаются на две категории: постепенные и внезапные. Постепенные отказы присущи таким объектам, у которых параметры, определяющие предельное состояние, изменяются достаточно монотонно и поддаются измерениям. Всем другим объектам 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 объекта, продолжительность времени прогноза и т.п.

Эксплуатацию наиболее важных и ответственных объектов целесообразно проводить по их фактическому состоянию. В число этих объектов входят разрабатываемые в НИИ ТМ системы управления спуском космических аппаратов, системы пожаро-взрывопреупреждения ракетно-космических комплексов, системы обеспечения безопасности и автоматизированного управления движением поездов метрополитенов и т.п. Для такого типа технических объектов применяются методы прогнозирования индивидуального ресурса.

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

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

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

Наряду с этими методами синтеза математических моделей индивидуального ресурса, весьма перспективными являются методы, которые базируются на принципе самоорганизации, в частности метод группового учёта аргументов Алексея Григорьевича Ивахненко [2, 3].

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 объекта, строится в области полиномов вида

$$y(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i, \quad i \in Z^+, \quad n \leq n_{\max},$$

где a_i - неизвестные коэффициенты;

Z^+ - множество положительных чисел;

n_{\max} - установленное значение максимальной степени полинома.

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

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

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

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_n - объём проверочной части исходных данных:

$$k_n = k - k_o;$$

k - объём 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 соотношения [1]

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

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

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 технического объекта нескольких определяющих предельное состояние параметров условная вероятность $P_t(t)$ определяется из выражения

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

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 объекта.

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

при двухстороннем допуске

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

при одностороннем допуске с верхней границей

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

при одностороннем допуске с нижней границей

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

где y_r^g и y_r^h - верхняя и нижняя границы допуска r -го определяющего предельное состояние параметра объекта;

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

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

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 имеют соответствующий вид

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

$$S_r^2(t) = 1,401 + 0,580t - 0,084t^2 + 0,001t^5.$$

Относительные погрешности полученных моделей показаны на рисунках 1 и 2.

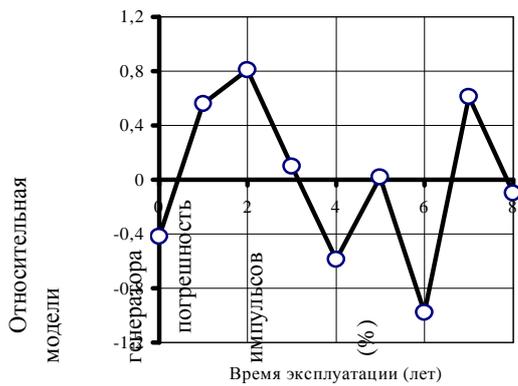


Рис.1. Зависимость относительной погрешности модели периода следования импульсов генератора от времени его эксплуатации

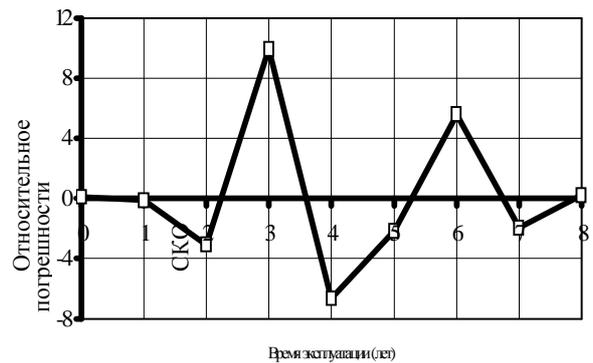


Рис.2. Зависимость относительного среднего квадратического отклонения погрешности модели дисперсии периода следования импульсов генератора

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)%.

При наличии значительных отклонений в обучающей и проверочной частях исходных данных погрешности математических моделей, построенных с помощью критерия регулярности, увеличиваются. Например, соответствующие модели прибора критического давления (ПКД), полученные по результатам измерений давления срабатывания (таблица 1) имеют вид:

$$D_{cp}(t) = 284,68 - 0,625\sqrt{t} ;$$

$$S_D^2(t) = 6,61 + 9,845t - 50,979\sqrt{t} + 38,19\sqrt[3]{t} .$$

Таблица 1

Время эксплуатации (лет)	0	0,6	1,6	2,8	4,0	6,0	10,3	13,6	16,1	17,7
Давление срабатывания (мм рт. ст.)	285	287	278	287	281	285	270	270	270	265

Погрешности этих моделей (рисунки 3 и 4) достигают соответственно (6–7)% и (20–30)%.

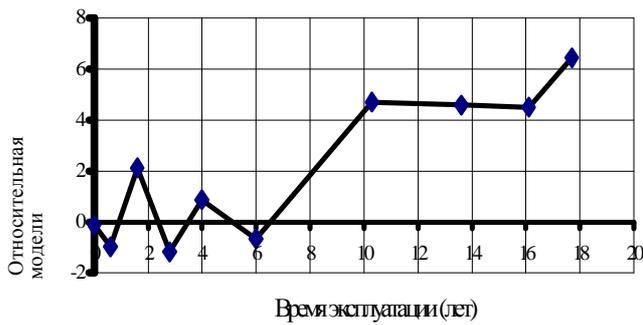


Рис.3. Зависимость относительной погрешности модели давления срабатывания ПКД от времени его эксплуатации

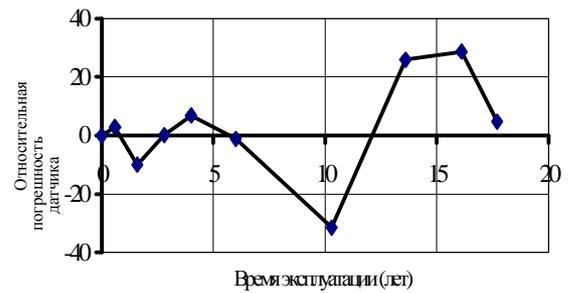


Рис. 4. Зависимость относительного среднего квадратического отклонения погрешности модели дисперсии давления срабатывания ПКД

В этих случаях повышение точности достигается путём применения других критериев, например, минимума смещения [3]. Поэтому объективный характер методов самоорганизации ограничивается выбором критерия селекции.

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 объекта.

При отсутствии таких параметров в Методике применяются методы группового оценивания ресурса объектов по измерениям наработки (календарной продолжительности эксплуатации) и по результатам ускоренных испытаний на безотказность.

Ускоренные испытания изделия 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.

Вид форсированных испытаний определяется на основании зависимости вероятности наступления предельного состояния от типа воздействующего фактора и значения коэффициента его вариации. Коэффициенты форсирования для каждого вида испытаний рассчитываются по формуле

$$K_j^\phi = \left[\frac{1 + V_j \Psi^{-1}(\bar{Q}_{aj}^\phi)}{1 + V_j \Psi^{-1}(\bar{Q}_a^n)} \right]^{s_j},$$

где V_j - коэффициент вариации воздействующего фактора при ϕ -ом виде испытаний;

$\Psi^{-1}(P)$ - квантиль распределения воздействующего фактора по уровню вероятности P ;

\bar{Q}_{aj}^ϕ и \bar{Q}_a^n - значения верхних доверительных границ вероятности достижения предельного состояния объекта при форсированных и нормальных испытаниях соответственно:

$$\bar{Q}_{aj}^\phi = 1 - P_{aj}^\phi,$$

$$\bar{Q}_a^n = 1 - \underline{P}_a^n;$$

\underline{P}_{aj}^ϕ и \underline{P}_a^n - значения нижних доверительных границ вероятности недостижения предельного состояния объекта при форсированных и нормальных испытаниях соответственно;

s_j - коэффициент, учитывающий условия транспортирования при испытании объекта (при испытаниях на транспортирование $s_j = 2$, при других видах испытаний $s_j = 1$).

Для определения нижней границы доверительного интервала вероятности недостижения предельного состояния объекта по результатам форсированных испытаний используется соотношение

$$\underline{P}_{an}^\phi = N^\phi \sqrt{1-a},$$

где N^ϕ - количество образцов в партии, подвергаемой форсированным испытаниям.

С помощью этого метода производится оценивание остаточного ресурса таких объектов, отказы которых носят внезапный характер, в том числе объектов, применение которых происходит после длительного периода хранения (или ожидания применения).

При необходимости определения назначенных показателей долговечности технических объектов применяется комбинированный априорный метод оценивания. Основой комбинированного метода является оценивание выбранных показателей методами самоорганизации после проведения форсированных испытаний. Апробация комбинированного метода проводится 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.
3. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. - К.: Техніка, 1975. - 312с.