

УДК 621.039.56

К.Н. Маловик, канд. техн. наук, доц., Севастоп.
нац. ун-т ядерной энергии и промышленности

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

К.М. Маловик. Аналітичне прогнозування часу граничного стану складних об'єктів. Отримано аналітичні вирази для прогнозування часу граничного стану і визначення діапазону допустимих змін граничного значення λ -характеристики складного об'єкта. Запропоновано алгоритм аналітичного зворотного прогнозування, що дозволяє нормувати час граничного стану складного об'єкта.

Ключові слова: інтенсивність відмов, прогноз, ресурсоспроможність, λ -характеристика.

К.Н. Маловик. Аналитическое прогнозирование времени предельного состояния сложных объектов. Получены аналитические выражения для прогнозирования времени предельного состояния и определения диапазона допустимых изменений предельного значения λ -характеристики сложного объекта. Предложен алгоритм аналитического обратного прогнозирования, позволяющий нормировать время предельного состояния сложного объекта.

Ключевые слова: интенсивность отказов, прогноз, ресурсоспособность, λ -характеристика.

K.N. Malovik. Analytical forecasting of time for the complex objects' limiting state. Analytical expressions for forecasting the limiting state time, and for determining the complex object's admissible maximum changes range of λ -characteristic value, are obtained. The algorithm of the analytical reverse forecasting, allowing to normalize the time of complex object's limiting condition, is proposed.

Keywords: failure rate; forecast; resource ability; λ -characteristic.

Введение

Предельное состояние принято считать одной из основных характеристик работоспособности сложных объектов [1], к которым можно отнести оборудование АЭС, машиностроительных и металлургических комплексов, транспортных и других предприятий. Проблема прогнозирования предельного состояния сложных объектов становится все более актуальной, особенно при индивидуальном оценивании ресурсных характеристик по результатам наблюдений за их функционированием в периоды нормальной эксплуатации и старения [2]. При этом наибольший интерес представляет исследование одной из определяющих ресурсных характеристик сложного объекта — времени достижения его предельного состояния [3].

Динамику временных характеристик при прогнозировании ресурсоспособности сложных объектов, используя материалы работ [4, 5], можно показать с помощью рис. 1, где обозначено:

t_H — назначенный ресурс;

P_γ — заданная вероятность обеспечения γ -процентного ресурса t_γ ;

f_t — плотность вероятности случайной величины наработки сложного объекта;

λ_H^H и λ_H^B — нижнее и верхнее значения интенсивности отказов при заданном t_H ;

λ_γ^H и λ_γ^B — нижнее и верхнее значения интенсивности отказов при заданном t_γ ;

λ_Π^H и λ_Π^B — нижнее и верхнее значения интенсивности отказов, соответствующие прогнозируемому предельному состоянию;

П и О — пессимистический и оптимистический прогнозы поведения $\lambda(t)$;

интенсивности отказов: эксплуатационных (1), конструктивных внезапных (2), конструктивных постепенных (3), деградационных (4), ресурсных (5);

T_{Π}^H и T_{Π}^B — нижнее и верхнее прогнозируемые значения времени предельного состояния при пессимистическом поведении $\lambda(t)$;

T_O^H и T_O^B — нижнее и верхнее прогнозируемые значения времени предельного состояния при оптимистическом поведении $\lambda(t)$.

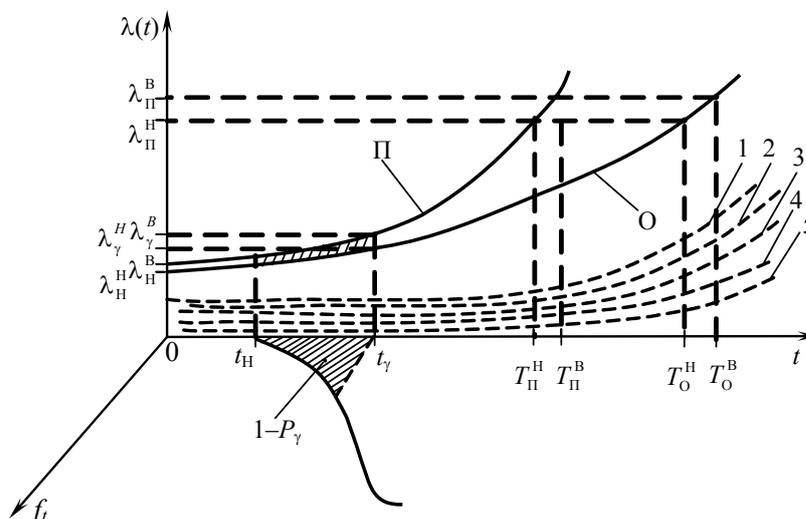


Рис. 1. Динамика временных характеристик при прогнозировании ресурсоспособности сложных объектов

Ресурсоспособность как комплексное свойство сложного объекта должна закладываться при проектировании, обеспечиваться на этапе изготовления и поддерживаться при его эксплуатации. К сожалению, существующая практика проектно-конструкторских работ в полной мере не обеспечивает необходимый уровень ресурсоспособности [1], так как:

- срок эксплуатации сложного объекта не связан с технологией обоснования его ресурса;
- недостаточно учитывается необходимость определения предельных значений количественных характеристик ресурсоспособности сложного объекта, что объясняется отсутствием общепринятой единой методологии и научного обозначения технологии ресурсного проектирования, а также трудностями изучения физических процессов, предшествующих возникновению отказов (которые являются редкими событиями) уникального, высоконадежного оборудования сложных объектов, например АЭС [2].

Можно также отметить, что в технической литературе и нормативно-технической документации недостаточно полно рассмотрены вопросы количественной оценки допустимых изменений интенсивности отказов, соответствующих назначенному и гамма-процентному ресурсу (см. рисунок 1), и их влияния на изменение времени предельного состояния сложного объекта.

Рассматривая вопросы оценивания ресурсоспособности сложных объектов, необходимо учитывать наличие старения, как неизбежного природного феномена. Известно, что этот термин наиболее часто употребляется в качестве синонима термина деградация вследствие старения [6]. При этом используется термин нефизическое старение, как процесс устаревания вследствие эволюции знаний и технологий, или технологическое устаревание, а также термин физическое старение вследствие физических, химических и/или биологических процессов (механизмов старения) или старение материала. Можно считать, что процесс исследования проблем ресурсоспособности должен включать [7]:

- анализ тренда рассматриваемых характеристик сложного объекта;
- анализ влияния отказов на определение возможности продления срока эксплуатации (что показано на рисунке 1 с помощью интенсивностей 1...5);
- анализ изменения параметров, характеризующих наибольшую степень деградации;

— оценивание предельных значений рассматриваемых параметров;
— проведение изыскательных работ в стендовых условиях, которые являются наиболее активными и глубокими (например, на АЭС могут проводиться только пассивные испытания, в которых стрессоры изменить нельзя [7]).

Таким образом, необходимы исследования механизмов старения и эффектов, вызываемых старением, которые проводятся, начиная с этапа разработки сложного объекта, не только на нем непосредственно, но и за его пределами. В связи с этим, следует использовать понятие менеджмента старения, что позволяет выполнять уточненную оценку ресурсных характеристик сложного объекта и вскрывать резервы для обоснования возможности продолжения его эксплуатации [1].

Целью работы является предложение подхода для усовершенствования технологии ресурсного проектирования сложных объектов путем уточнения параметров надежности для оценивания их ресурсоспособности, а также получение аналитических выражений для нормирования времени предельного состояния сложных объектов.

Основные результаты

Известно, что последовательность операций по выбору аппроксимирующей функции при прогнозировании исследуемой характеристики в общем состоит из [2]:

- определения вида тренда при содержательном анализе рассматриваемого процесса;
- получения окончательного вида функции;
- расчета требуемых параметров в выбранной исследуемой зависимости.

Тогда можно предложить следующий подход для поставленной задачи исследования изменения интенсивности отказов как одного из показателей долговечности сложного объекта. Используя эксплуатационную информацию, например, об одной из систем, важных для безопасности АЭС, — системы радиационного контроля [8, 9], можно показать, что в период нормальной эксплуатации сложного объекта, переходящий в стадию технологического устаревания или старения материалов, исследуемый процесс является стабильным и монотонно возрастающим, что типично для большинства сложных объектов. При этом, для повышения точности и достоверности результатов целесообразно применить непараметрический метод ядерной оценки расчета интенсивности отказов по формуле [10]

$$\lambda(t) = \frac{f_{\xi,n}(t)}{1 - F_{\xi,n}(t)}, \quad (1)$$

где $F_{\xi,n}(t)$ и $f_{\xi,n}(t)$ — ядерные оценки функции и плотности распределения, соответственно;

n — общее число наблюдений;

ξ — случайная величина выборки $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$.

Для дальнейшего анализа рассматриваемого процесса необходимо иметь данные о назначенном t_H и гамма-процентном ресурсе t_γ , которые определяются на этапе проектирования сложного объекта [4]. Одновременно для этих ресурсных характеристик должны быть указаны диапазоны изменений интенсивности отказов $\lambda_H^H - \lambda_H^B$ и $\lambda_\gamma^H - \lambda_\gamma^B$, предусматривающие пессимистический и оптимистический прогноз, что показано на рисунке 1.

Тогда состав функций для определения вида тренда $\lambda(t)$ (1) можно ограничить совокупностью двух параметрических семейств [2]

$$\lambda_1(t) = a + bt, \quad \lambda_2(t) = at^b, \quad \lambda_3(t) = ae^{bt}, \quad \lambda_4(t) = e^{at}t^b. \quad (2)$$

Последующее изложение можно рассмотреть на примере показательной функции $\lambda_3(t)$, которая является характерной и наиболее распространенной для подавляющего большинства сложных объектов. Используя операции логарифмирования и замены переменных, получим выражение для определения исследуемого времени предельного состояния T_{II} сложного объекта

$$T_{II} = \ln \frac{\lambda_{II}}{a} / b, \quad (3)$$

где λ_{Π} — значение исследуемой интенсивности $\lambda(t)$, соответствующее предельному состоянию сложного объекта;

a, b — неизвестные параметры аппроксимирующих функций, которые подлежат оценке по имеющимся экспериментальным данным,

$$a = \lambda_{\Pi} \left(\frac{t_{\Pi}}{t_{\gamma}} \right)^{\frac{t_{\Pi}}{t_{\gamma} - t_{\Pi}}}, \quad b = \frac{\ln \lambda_{\Pi} - \lambda_{\gamma}}{t_{\Pi} - t_{\gamma}}.$$

Следовательно, для расчета T_{Π} необходимо определить предельное значение λ_{Π} . Нижнее и верхнее значения λ_{Π} определяются выражениями [10,11]

$$\lambda_{\Pi}^H = \lambda_{\Pi}^C - \Delta\lambda_{\Pi}, \quad \lambda_{\Pi}^B = \lambda_{\Pi}^C + \Delta\lambda_{\Pi}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\Pi}^C = \frac{M_{\eta}(t)}{1-F(t)}$ — среднее значение λ -характеристики, в котором $F(t)$ — функция распределения наработки до отказа, а $M_{\eta}(t)$ — математическое ожидание случайной величины η , которая определяется как $\eta = \frac{1}{\sigma} G\left(\frac{t-\xi_i}{\sigma}\right)$, σ — параметр локальности, $G(\xi)$ — ядро разложения;

$$\Delta\lambda_{\Pi} = t_{n,\alpha/2} \sqrt{\frac{D_{\eta}(t)}{n}} \cdot \frac{1}{1-F(t)} \text{ — допустимое отклонение } \lambda \text{-характеристики от } \lambda_{\Pi}^C,$$

$D_{\eta}(t)$ — дисперсия случайной величины η ,

$t_{n,\alpha/2}$ — расчетное значение критерия Стьюдента при выборке объема n и заданном уровне значимости $\alpha/2$.

Заданные при проектировании значения назначенного и гамма-процентного ресурса, как оговорено, для построения исследуемой λ -характеристики позволяют получить следующие исходные координаты:

$$t_{\Pi}, \lambda_{\Pi}^H; t_{\Pi}, \lambda_{\Pi}^B; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^H; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^B, \quad (5)$$

для построения семейства исследуемых λ -характеристик при прогнозировании времени предельного состояния сложных объектов (рис. 2), где обозначено: И и Э — иллюстрация интенсивной и экстенсивной деградации, соответственно, С — усредненный характер поведения $\lambda(t)$.

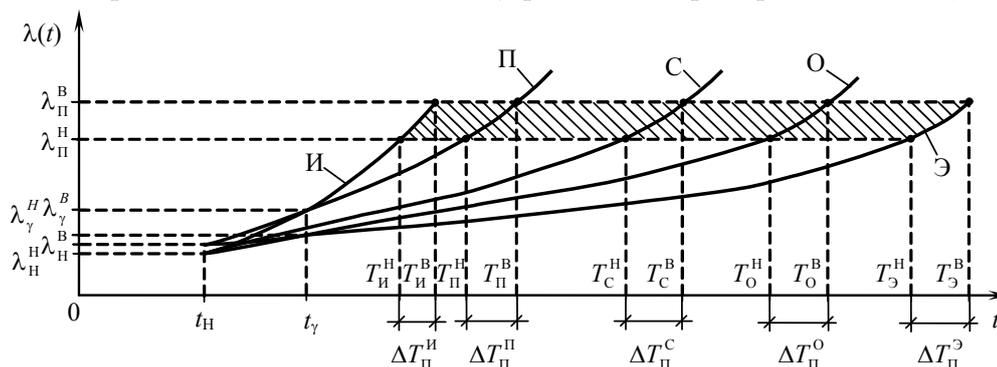


Рис. 2. Иллюстрация прогнозирования времени предельного состояния сложных объектов

Тогда, используя выражения (4), можно на основании формулы (3) определить значения времени предельного состояния сложного объекта, указанные на рисунке 2, с помощью данных, указанных в таблице.

Значения времени предельного состояния сложного объекта

$\lambda(t)$	исходные координаты	установка	T_{Π}
И	$t_H, \lambda_H^H; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^B$	λ_{Π}^H	$T_{И}^H$
		λ_{Π}^B	$T_{И}^B$
П	$t_H, \lambda_H^B; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^B$	λ_{Π}^H	$T_{П}^H$
		λ_{Π}^B	$T_{П}^B$
С	$t_H, \lambda_H^C; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^C$	λ_{Π}^H	$T_{С}^H$
		λ_{Π}^B	$T_{С}^B$
О	$t_H, \lambda_H^H; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^H$	λ_{Π}^H	$T_{О}^H$
		λ_{Π}^B	$T_{О}^B$
Э	$t_H, \lambda_H^B; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^H$	λ_{Π}^H	$T_{Э}^H$
		λ_{Π}^B	$T_{Э}^B$

Таким образом, можно определить область допустимых изменений времени предельного состояния сложного объекта в зависимости от поведения его характеристики λ , что позволяет нормировать значения T_{Π} с помощью допусков $\Delta T_{\Pi}^И, \Delta T_{\Pi}^П, \Delta T_{\Pi}^С, \Delta T_{\Pi}^О, \Delta T_{\Pi}^Э$.

В результате для формализации процесса аналитического обратного прогнозирования времени предельного состояния можно предложить следующий алгоритм:

- Вычисление предельных значений λ_{Π}^H и λ_{Π}^B по формуле (4).
- Определение координат точек аппроксимирующих функций

$$t_H, \lambda_H^H; t_H, \lambda_H^B; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^H; t_{\gamma}, \lambda_{\gamma}^B.$$

- Вычисление времени предельного состояния по формулам (2), (3).

— Оценивание и нормирование времени предельного состояния на основании допусков $\Delta T_{\Pi}^И, \Delta T_{\Pi}^П, \Delta T_{\Pi}^С, \Delta T_{\Pi}^О, \Delta T_{\Pi}^Э$, определенных в соответствии с таблицей.

Выводы

Получены аналитические выражения для нормирования времени предельного состояния сложного объекта.

Показан подход для аналитического обратного прогнозирования времени предельного состояния.

Предложен алгоритм для оценивания времени предельного состояния сложного объекта.

Литература

1. Ресурс и надежность оборудования и трубопроводов АЭС / Г.В. Аркадов, А.Ф. Гетман, К.Н. Маловик, С.Б. Смирнов // Учеб. пособие. — Севастополь: СТУЭиП, 2012. — 348 с.
2. Острейковский, В.А. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ / В.А. Острейковский, Н.Л. Сальников. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 416 с.
3. Маловик, К.Н. Анализ ресурсных характеристик при неоднородном потоке отказов изделий / К.Н. Маловик // Методи та прилади контролю якості. — Івано-Франківськ, 2011. — № 26. — С. 85 — 89.
4. Острейковский, В.А. Эксплуатация атомных станций: учеб. для вузов / В.А. Острейковский. — М.: Энергоатомиздат, 1999. — 928 с.
5. Антонов, А.В. Статические методы в теории надежности: Учеб. пос. / А.В. Антонов, М.С. Никулин. — М.: Абрис, 2012. — 390 с.

6. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам ядерной безопасности. Международное агентство по атомной энергии. — Вена, 2008. — 295 с.
7. Ястребенецкий, М.А. Управление старением критических систем / М.А. Ястребенецкий // Радиоэлектрон. і комп'ютер. системи. — Харків, 2008. — № 6(33). — С. 114 — 121.
8. Антонов, А.В. Анализ показателей долговечности элементов систем радиационного контроля АЭС / А.В. Антонов, К.Н. Маловик, И.А. Чумаков // Ядер. физика и инженерия / Нац. исслед. ядер. ун-т “Моск. инж.-физ. ин-т”. — М.: НИЯУ МИФИ, 2011. — Т. 2. — № 5. — С. 414 — 420.
9. Антонов, А.В. Интервальная оценка характеристик надежности уникального оборудования / А.В. Антонов, К.Н. Маловик, И.А. Чумаков // Фундаментальные исследования АН России. — 2011. — № 12. — С. 71 — 76.
10. Антонов, А.В. Системный анализ: учеб. для вузов. — 3-е изд. — М.: Высш. шк., 2008 — 454 с.
11. Зюляева, Н.Г. Определение характеристик надежности оборудования АЭС непараметрическими методами: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Н.Г. Зюляева. — Обнинск, 2010. — 177 с.

References

1. Resurs i nadezhnost' oborudovaniya i truboprovodov AES [Resource and Reliability of the Equipment and Pipelines at NPPs] / G.V. Arkadov, A.F. Getman, K.N. Malovik, S.B. Smirnov: Study guide. — Sevastopol: SNUNEI, 2012. — 348 p.
2. Ostreykovsky, V.A. Veroyatnostnoe prognozirovaniye rabotosposobnosti elementov YAEU [Probabilistic Forecasting of the NEI Elements Operability] / V.A. Ostreykovsky, N.L. Salnikov. — M: Energoatomizdat, 1990. — 416 p.
3. Malovik, K.N. Analiz resursnykh kharakteristik pri neodnorodnom potoke otkazov izdelij [The Analysis of Resource Characteristics in Case of a Heterogeneous Flow of Products Failures] / K.N. Malovik // Metody ta prylady kontrolyu yakosti [Methods and Devices of Quality Control]. — Ivano-Frankivs'k, 2011. — # 26. — Pp. 85 — 89.
4. Ostreykovsky, V.A. Ekspluataciya atomnykh stancij [Operation of Nuclear Power Plants: Manual for high school] / V.A. Ostreykovsky. — M: Energoatomizdat, 1999. — 928 p.
5. Antonov A.V. Statische metody v teorii nadezhnosti [Static Methods in the Reliability Theory: Education guidance] / A.V. Antonov, M.S. Nikulin. — M: Abris, 2012. — 390 p.
6. Glossarij MAGATE po voprosam yadernoj bezopasnosti. Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoj energii [IAEA Glossary Concerning Nuclear Safety. International Atomic Energy Agency]. — Vienna, 2008. — 295 p.
7. Yastrebenetsky, M.A. Management of Critical Systems Aging / M.A. Yastrebenetsky // Radioelektronni kompyuterni sistemi [Radioelectronic Computer Systems]. — Kharkov, 2008. — # 6(33). — Pp. 114 — 121.
8. Antonov, A.V. Analiz pokazatelej dolgovechnosti elementov system radiacionnogo kontrol'a AES [Analysis of Life Ratios of Radiation Control Systems Elements at NPP] / A.V. Antonov, K.N. Malovik, I.A. Chumakov // Nuclear Physics and Engineering / National Nuclear Research University “Moscow Engineering and Physics Institute”. — M: NIYU MEPHI, 2011. — V.2. — # 5. — Pp. 414 — 420.
9. Antonov, A.V. Интервальная оценка характеристик надежности уникального оборудования [Interval Estimation of Unique Equipment Reliability Characteristics] / A.V. Antonov, K.N. Malovik, I.A. Chumakov // Basic Research of Russian AS. — 2011. — # 12. — Pp. 71 — 76.
10. Antonov, A.V. Sistemnyj analiz [System Analysis: Manual for high school]. — 3rd ed. — M: Visshaya shkola, 2008 — 454 p.
11. Zyulyaeva, N.G. Opredelenie kharakteristik nadezhnosti oborudovaniya AES neparametricheskimi metodami [Characterization of NPP Equipment Reliability Characteristics by Nonparametric Methods]: Dis. ... Candidate. tech. Sciences: 05.13.01 / N.G. Zyulyaeva. — Obninsk, 2010. — 177 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 17 октября 2012 г.