

УДК 621.039.56

## АНАЛИЗ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ ОТКАЗОВ ИЗДЕЛИЙ

*К. Н. Маловик*

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности,  
Институт нанотехнологий информационно-измерительных и специализированных  
компьютерных систем в энергетике, ул. Курчатова, 7, Севастополь, 99015*

*На підставі контрольного і граничного рівнів надійності виробів, песимістичного і оптимістичного прогнозів їх ресурсних характеристик, системної концепції забезпечення ресурсу проаналізовані процеси оцінювання і прогнозування ресурсних характеристик і показані зони прогнозування працездатності і ресурсоспроможності виробів.*

*Ключові слова: виріб, надійність, прогноз, ресурсна характеристика, зона прогнозування працездатності, ресурсоспроможність.*

*На основании контрольного и предельного уровней надежности изделий, пессимистического и оптимистического прогнозов их ресурсных характеристик, системной концепции обеспечения ресурса проанализированы процессы оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик и показаны зоны прогнозирования работоспособности и ресурсоспособности изделий.*

*Ключевые слова: изделие, надежность, прогноз, ресурсная характеристика, зона прогнозирования работоспособности, ресурсоспособность.*

*On the basis of control and maximum levels of reliability of wares, pessimistic and optimistic prognoses of their resource descriptions, system conception of providing resource, the processes of evaluation and prediction of resource descriptions are analyzed and the areas of prognostication capacity and resourceability wares are rotined.*

*Keywords: product reliability, weather, resource characteristics, area of forecasting performance, resourceability.*

Известны ресурсные характеристики, определяющие наступление предельных состояний изделий при исследовании их долговечности [1, 2]. Под изделием можно понимать элементы оборудования энергоблоков атомных станций, комплексов металлургических и машиностроительных предприятий, установок тепловой энергетики и нефтегазопроводов. Такие изделия являются, как правило, уникальными, дорогостоящими и высоконадежными. Элементы этих изделий при эксплуатации отказывают редко либо вообще не отказывают, что затрудняет определение их ресурсных характеристик. Поэтому относительно такого, конкретного, находящегося в эксплуатации изделия наибольший интерес представляет прогнозирование его индивидуального остаточного ресурса. Любое такое восстанавливаемое изделие в каждый момент времени характеризуется двумя составляющими ресурса [1]:

- первая составляющая определяет возраст изделия, т.е. израсходованную к данному

моменту времени часть ресурса;

- вторая составляющая показывает оставшуюся часть ресурса до перехода изделия в предельное состояние.

Для определения ресурсных характеристик изделий используются данные об отказах при их эксплуатации. Эти данные в силу объективных и субъективных причин представляют собой неоднородный поток событий [3, 4]. Поэтому оценивание и прогнозирование ресурсных характеристик в предположении независимости и одинаковой распределенности наработок до отказа приводит к серьезным ошибкам. Для устранения этого недостатка необходимо развитие методов, позволяющих оценивать и прогнозировать по потоку отказов с учетом возможных неоднородностей, показателей долговечности изделий. При этом можно выделить две группы задач при анализе ресурсных характеристик изделий:

- прямые ресурсные задачи, позволяющие прогнозировать ресурсные характеристики и обосновывать технические мероприятия, которые обеспечивают требуемый ресурс

эксплуатации изделий;

- обратные ресурсные задачи, которые решаются при анализе причин повреждения изделия и причин, обуславливающих непроектные темпы истощения проектного ресурса. Целью решения обратных задач является воссоздание процесса истощения ресурса эксплуатации изделия.

Поэтому при исследовании долговечности изделий можно выделить для решения прямых ресурсных задач такие ресурсные характеристики, как среднее прямое остаточное время и остаточный ресурс; а для решения обратных ресурсных задач – среднее обратное остаточное время [3, 4].

Для анализа указанных ресурсных характеристик необходимо рассмотреть поведение интенсивности отказов изделия в процессе его эксплуатационного периода. При этом, учитывая заданные техническими требованиями контролируемые параметры по оцениванию показателей надежности изделия, следует предусмотреть определение области прогноза параметрической надежности и долговечности изделия [1].

Для этого необходимо более детально рассмотреть поведение зависимости интенсивности отказов изделия от времени  $\lambda(t)$ , которая показана на рис.1 в виде полного эксплуатационного периода, условно разбитого на четыре этапа:

I - время «приработки» и опытной эксплуатации;

II - время «нормальной» эксплуатации в

соответствии с требованиями нормативной и проектной документации;

III - время «физического старения», характеризующееся ростом интенсивности отказов, проявлением накопления различных дефектов ввиду старения элементов изделия;

IV - время «прекращения» эксплуатации изделия в «прежнем виде».

На рис.1 отмечен начальный уровень надежности  $\lambda_n$ , характерный для совокупности изделий, прошедших период приработки. Далее имеет место период нормальной эксплуатации, когда идет медленное ухудшение параметров работоспособности изделия. За ним начинается период старения. Приведены также устанавливаемые значения контрольного  $\lambda_k$  и предельного  $\lambda_p$  уровней надежности. Контрольный уровень характеризует наработку изделия, выработав которую изделие начинает интенсивно стареть. Иными словами в изделии начинают интенсивно развиваться необратимые процессы накопления повреждений. Предельный уровень характеризует наработку, за пределами которой эксплуатация изделия нецелесообразна. Поскольку в процессе эксплуатации решается задача прогнозирования поведения интенсивности отказов как статистическая задача, основанная на обработке исходной информации, то, следовательно, прогноз имеет некоторый разброс. Поэтому на рис.1 показана средняя линия прогнозируемого проведения интенсивности отказов и две линии, характеризующие пессимистический (1) и оптимистический (2) прогноз.

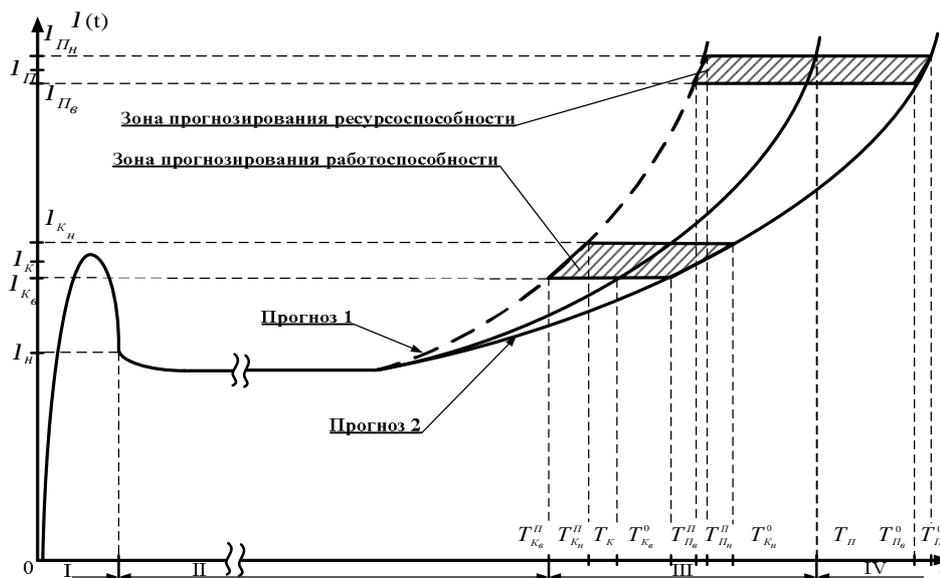


Рисунок1 – Определение зон прогнозирования ресурсных характеристик изделия

Кроме того, при исследовании зависимости  $\lambda(t)$  учтена системная концепция обеспечения ресурса изделий [5, 6], при которой надежность оценивается по следующим критериям:

- надежность 1-го рода – по критерию сопротивления полному разрушению изделия или его элемента;

- надежность 2-го рода – по критерию сопротивления частичному разрушению элемента;

- надежность 3-го рода – по критерию сопротивления возникновения дефекта в элементе изделия;

- надежность 4-го рода – по критерию, определяемому сопротивлением зарождению дефекта в элементе изделия.

Следовательно, при оценивании контрольного и предельного уровней надежности изделий целесообразно предусматривать диапазон их возможных изменений, что позволяет устанавливать предельные значения  $\lambda_{K_H}$ ,  $\lambda_{П_H}$ ,  $\lambda_{K_B}$ ,  $\lambda_{П_B}$  в виде ограниченной снизу и сверху, соответственно, что показано на рис.1. Кроме того, на рис.1 показана зависимость этапов II, III, IV от моментов времени  $T_K$  и  $T_{П}$ , которые при проверке  $\lambda_k$  характеризуют предупредительную наработку, когда в изделии начинают развиваться необратимые процессы накопления повреждений и уровень наработки, за пределами которой эксплуатация изделий недопустима (т.е. предельный уровень наработки), соответственно. Поэтому для учета пессимистического и оптимистического прогноза при исследовании ресурсных характеристик изделий:

- относительно восстановления изделия после отказа можно использовать диапазон времени  $T_K^o \div T_K^п$ ;

- относительно определения возможности эксплуатации изделия, состояние которого характеризуется его ресурсоспособностью [6] – диапазон времени  $T_{П}^o \div T_{П}^п$ .

Соответствующие моменты времени указаны на рис.1, который иллюстрирует также зоны прогнозирования ресурсоспособности и работоспособности, предлагаемые для исследования ресурсных характеристик изделий.

Таким образом, на основании контрольного  $\lambda_k$  и предельного  $\lambda_{п}$  уровней надежности изделий, пессимистического и оптимистического прогнозов их ресурсных характеристик и системной концепции обеспечения ресурса исследуемых объемов, на рис.1 показано поведение зависимости интенсивности отказов изделий во времени, учитывающее определение соответствующих моментов времени и зон прогнозирования работоспособности и ресурсоспособности изделий.

На основании проведенного анализа, можно более подробно рассмотреть такие основные ресурсные характеристики изделий, как: среднее обратное остаточное время, среднее прямое остаточное время и остаточный ресурс. Для этого на рис.2 представлена иллюстрация процессов оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик изделия, где:  $B$  – возраст изделия;  $OH$  – остаточная наработка изделия;  $OP$  – остаточный ресурс изделия.

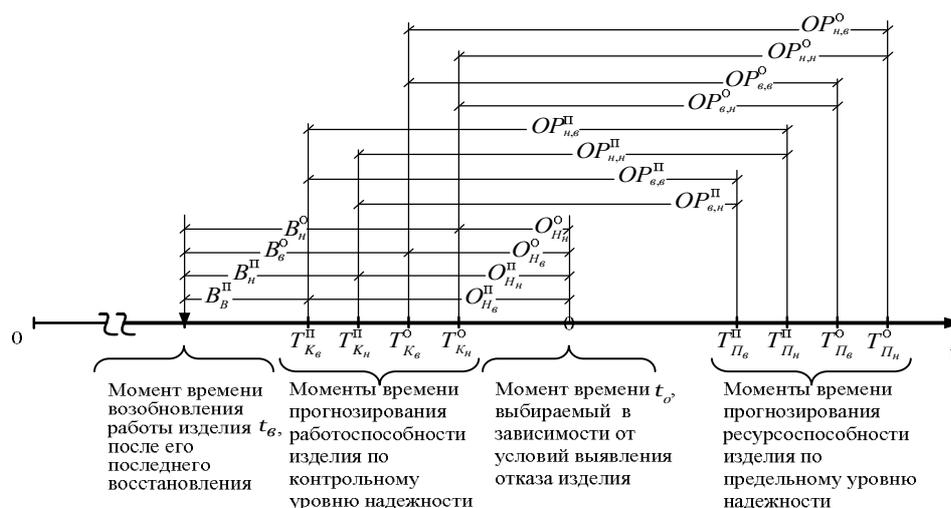


Рисунок 2 – Иллюстрация процессов оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик изделия

Тогда, используя обозначения, принятые на рис.1, можно показать [4, 7], что совокупность процессов оценивания и прогнозирования  $B_e''$ ,  $B_n''$ ,  $B_e^o$ ,  $B_n^o$  характеризуют среднее обратное остаточное время, где  $R(t)$  – совокупность процессов  $OH_e''$ ,  $OH_n''$ ,  $OH_e^o$ ,  $OH_n^o$  – среднее прямое остаточное время  $V(t)$ , а совокупность  $OP_{e,n}''$ ,  $OP_{e,e}''$ ,  $OP_{n,n}''$ ,  $OP_{n,e}''$ ,  $OP_{e,n}^o$ ,  $OP_{e,e}^o$ ,  $OP_{n,n}^o$ ,  $OP_{n,e}^o$  – остаточный ресурс изделия.

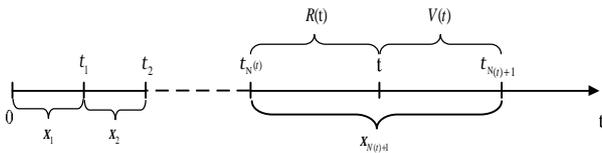


Рисунок 3 – Обратное и прямое остаточное время

Для определения характеристик  $R(t) = t - \tau_{N(t)}$  и  $V(t) = \tau_{N(t)+1} - t$ , показанных на рис. 3, которые являются однородными марковскими процессами, могут применяться следующие аналитические выражения [4, 7]:

$$R(t) = \Phi_0^R [\Psi^{-1}(t)] + \int_0^{\infty} f_{\xi}(x) g^R(x, t) dx,$$

$$V(t) = \Phi_0^V [\Psi^{-1}(t)] + \int_0^{\infty} f_{\xi}(x) g^V(x, t) dx,$$

где  $g^R(x, t) = \frac{\Psi^{-1}(t)}{[\Psi^{-1}(t)-x]V0} \int [t - \Psi(x)] v(\tau) d\tau,$

$$g^V(x, t) = \frac{\Psi^{-1}(t)}{[\Psi^{-1}(t)-x]V0} \int [\Psi(t+x) - t] n(t) dt,$$

$$\Phi_0^R [\Psi^{-1}(t)] = t \int_{\Psi^{-1}(t)}^{\infty} f_{\xi}(x) dx,$$

$$\Phi_0^V [\Psi^{-1}(t)] = \int_{\Psi^{-1}(t)}^{\infty} [\Psi(x) - t] f_{\xi}(x) dx,$$

в которых приняты следующие обозначения:  
 $\Psi(t)$  - нормализующая функция потока отказов;  
 $f_x(x)$  - плотность распределения наработки до отказа;  
 $t$  - текущий момент

времени;  $\tau$  – предшествующее времени  $t$  событие «искаженного» потока отказов;  
 $v(\tau)$  – интенсивность выпрямленного потока отказов;  
 $\xi_i$  –  $i$ -тая наработка между отказами.

Таким образом, можно прогнозировать возраст и остаточную наработку изделий. Однако для определения остаточного ресурса как основной ресурсной характеристики изделия такая возможность отсутствует. Это связано с тем, что в этой области к настоящему времени еще не решен ряд фундаментальных задач, в том числе и задача прогнозирования индивидуального ресурса изделий [1, 3]. В то же время следует отметить, что осуществляется устранение существующих недостатков в области процессов оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик путем определения ресурсоспособности изделий [6].

Кроме того, анализируемые ресурсные характеристики изделий, представленные на рис. 2, показывают, что полученные наблюдения можно интерпретировать как случайную выборку из некоторой генеральной совокупности. Так как рассматриваемые изделия уникальны, неидентичны, их количество не обеспечивает массовость исследуемой совокупности, то условие сбора статистических данных не укладывается в рамки статистического ансамбля и для их оценки приходится отказываться от вероятностной природы обрабатываемых данных. Это подтверждается также тем, что, например, в атомной энергетике при оценивании показателей надежности оборудования АЭС существует пробел, который обусловлен [2, 6]:

- недостатком проектной информации;
- несоответствием проектных и реальных условий эксплуатации оборудования;
- отсутствием единой нормативной базы, восполняющей указанные недостатки.

Поэтому для получения репрезентативной выборки предлагается использовать оценки экспертов, которые используют методы математической теории нечетких множеств, важными преимуществами которых являются [3]:

- большая гибкость и адекватность реальным условиям эксплуатации;
- более быстрое получение окончательного результата,
- сравнительную (относительно традиционных методов математической статистики) простоту используемых нечетких операций.

В заключение следует отметить, что анализ ресурсных характеристик изделий показывает

целесообразность создания системы метрологического обеспечения для измерения среднего обратного остаточного времени, среднего прямого остаточного времени и остаточного ресурса.

### ВЫВОДЫ

Применение контрольного и предельного уровня надежности 1-го, 2-го, 3-го и 4-го рода совместно с пессимистическим и оптимистическим прогнозом позволяет экстраполировать поведение изделия в будущем и устанавливать моменты времени, определяющие среднее обратное остаточное время, среднее прямое остаточное время и остаточный ресурс. Построены зоны прогнозирования и ресурсоспособности, необходимые при исследовании индивидуального остаточного ресурса изделий. Показана целесообразность совершенствования определений ресурсоспособности изделия и процессов ресурсометрии.

Для совершенствования процессов оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик изделий необходимо:

- нормирование контрольных и предельных уровней надежности 1, 2, 3 и 4 рода при индивидуальном прогнозировании остаточного ресурса изделий;
- выявление моментов времени, характеризующих вероятность наступления отказов при пессимистическом и оптимистическом прогнозировании индивидуального остаточного ресурса изделий;
- формирование требований к зонам прогнозирования ресурсоспособности изделий;
- совершенствование стандартизации в

области определений ресурсоспособности изделия и процессов ресурсометрии.

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций : Учебник для вузов / В.А. Острейковский. - М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с. 2. Гетман А.Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС / А.Ф. Гетман.- М.: Энергоатомиздат, 2000. – 427 с. 3. Антонов А.В. Системный анализ : Учебник для вузов. : 2-е издание / А.В. Антонов.- М.: Высшая школа, 2006. – 454 с. 4. Скиба М.А. О среднем ресурсе и остаточных временах неоднородного потока отказов / М.А. Скиба // Сб. научн. трудов кафедры АСУ №18 «Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем». – Обнинск: ИАТЭ. – 2009.- С.41-56. 5. Системная концепция обеспечения прочности ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов атомных электростанций РД СК-01-04.ЭО. – М., 2004. 6. Аркадов Г.В. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы) / Г.В. Аркадов, А.Ф. Гетман, А.Н. Родионов.- М.: Энергоатомиздат, 2010.- 424 с. 7.Чепурко В.А. Характеристики надежности систем с учетом неоднородности потока отказов / В.А. Чепурко // Сб. науч. трудов кафедры АСУ №17, «Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем». – Обнинск: ИАТЭ.- 2007.- С.29-40.

Поступила в редакцію 13.05.2011р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Кісіль І. С.