

ОЦЕНИВАНИЕ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

Антонов А.В., Дагаев А.В.

Обнинский институт атомной энергетики, Россия

В настоящее время ряд энергоблоков атомных станций либо выработали назначенный ресурс, либо близки к этому. В отрасли вопросу управления ресурсными характеристиками с целью обоснования возможности эксплуатации энергоблоков за рамками установленного ресурса уделяется большое внимание. Так, подготовлены и действуют документы: “Нормативно-методические требования к управлению ресурсными характеристиками элементов энергоблоков АС” (РД-ЭО-0039-95), “Типовые положения по управлению ресурсными характеристиками элементов энергоблоков АС” (РД-ЭО-0096-98), “Типовые технические требования к методикам оценки технического состояния и остаточного ресурса элементов энергоблоков АС”. Утверждены федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии “Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции” (НП-017-2000). Большой интерес вопросам управления ресурсными характеристиками уделяется и в мировой практике эксплуатации АС. Так в 2000 году МАГАТЭ подготовлен документ “Management of ageing of I&C equipment in nuclear power plants”, в котором обосновывается необходимость решения вопросов управления ресурсными характеристиками оборудования АС. Следовательно, тематика работы, обсуждаемая в докладе представляется достаточно актуальной.

В работе проведена классификация методов оценки остаточного ресурса. Отмечено, что основное внимание уделяется исследованию статистических методов, основанных на информации об эксплуатации объектов. Во многих случаях решение о продлении срока службы, основанное на фактическом состоянии оборудования подсистем и накопленных статистических данных об отказах, является экономически оправданным и не приводит к снижению уровня безопасности ЯЭУ. Статистические методы оценки и прогнозирования ресурса оборудования АС подразделяются следующим образом:

1. Методы оценки остаточного ресурса, основанные на расчете прямого остаточного времени.
2. Методы, основанные на анализе функции распределения ресурса как случайной величины.
3. Методы оценки остаточного ресурса оборудования атомных станций на основе анализа выходных параметров объектов как функции времени (интенсивности отказов, коэффициент готовности и т.п.).
4. Авторегрессионный метод.

В описываемой работе в качестве параметра управления выступает остаточный ресурс оборудования, который определяет возможную продолжительность эксплуатации объекта с данного момента времени до достижения параметром технического состояния его предельного значения.

Необходимо отметить, что оборудование АЭС является, как правило, уникальным, дорогостоящим и высоконадежным. Элементы подсистем за весь период эксплуатации отказывают редко либо не отказывают вовсе, что затрудняет определение ресурсных характеристик. При прогнозировании остаточного ресурса необходимо учитывать наличие технического обслуживания и ремонтов, оптимальная схема которых позволяет свести к минимуму возможность возникновения отказов элементов и подсистем. В работе разработаны методы анализа характеристик надежности и ресурса с учетом старения оборудования. Проводятся исследования разработанных моделей с целью оценки влияния мероприятий по обслуживанию объектов, а также параметров обслуживания на ресурсные характеристики.

Перед эксплуатирующими органами стоит задача принять решение либо о продлении срока службы подсистем, либо о немедленной их замене. Это решение должно быть полностью обоснованным и экономически оправданным. Основанием для принятия такого решения должно быть реальное состояние оборудования подсистем, его остаточный ресурс.

Предположим, что исследуемая система безотказно проработала время t . Под *остаточной наработкой* будем понимать оставшуюся случайную наработку оборудования до отказа. Под *остаточным ресурсом* - математическое ожидание (среднее значение) остаточной наработки. Таким образом, остаточный ресурс является вероятностной характеристикой надежности оборудования АЭС. К другим важным вероятностным характеристикам надежности оборудования необходимо отнести в первую очередь вероятность безотказной работы до момента времени t (ВБР), функцию распределения наработки до отказа (ФР), интенсивность отказов (ИО). Необходимо отметить, что остаточный ресурс функционально связан с другими показателями надежности и оценивается в основном через них и, следовательно, наилучшее оценивание остаточного ресурса возможно при условии качественного оценивания тех показателей, через которые он определяется.

При эксплуатации элементов и систем ЯЭУ возникает необходимость в определении их характеристик надежности с высокой степенью достоверности и в кратчайшие сроки. Сложность и ответственность задач, решаемых системами ЯЭУ, предъявляют к их надежности высокие требования. Эффективность функционирования таких систем во многом зависит от своевременного и достоверного знания характеристик надежности систем, а также их комплектующих элементов. Чем быстрее будут получены достоверные и точные показатели надежности аппаратуры, тем эффективнее можно их применить для проведения мероприятий, связанных с повышением уровня надежности оптимизацией обслуживания систем.

Оптимальное решение вопросов, связанных с выбором состава ЗИП элементов, назначением времени проведения контроля работоспособности элементов и систем, времени профилактического обслуживания систем ведет в конечном итоге к повышению эффективности функционирования всей реакторной установки.

Эксплуатационная информация об отказах наиболее достоверно отражает процессы, происходящие в системе. Для проведения качественных расчетов показателей надежности объектов ЯЭУ необходимо иметь, по возможности, наиболее полную информацию об отказах изучаемого объекта или объекта аналога, проводить дополнительные исследования изучаемого объекта. Статистически точность оцениваемых характеристик надежности в первую очередь зависит от объема и полноты исходной информации. Поэтому особые требования должны предъявляться к качеству ведения “Журнала дефектов” или баз данных об отказах. Среди дополнительных видов информации можно отметить информацию, полученную в результате эксплуатации однотипных объектов на других установках путем проведения аналитических расчетов, и информацию, представленную в технических описаниях и паспортах.

Оценивание показателей надежности изучаемого объекта проводится на основании статистических данных об отказах. Необходимо привести основные показатели надежности.

1. *Вероятность безотказной работы* (ВБР)- это вероятность того, что в пределах заданной наработки (t) отказ объекта не возникнет, случайное время наработки до отказа (ξ) окажется не меньше t :

$$P(t) = P(\xi \geq t), t \geq 0. \quad (1)$$

2. *Вероятность отказа* (ВО)- это вероятность того, что отказ произойдет за время меньшее заданной наработки (t). Фактически, это *функция распределения* (ФР) наработки до отказа, как случайной величины:

$$Q(t) = P(\xi < t) = 1 - P(t) = F_{\xi}(t) \quad (2)$$

3. Если функция распределения $F_{\xi}(t)$ дифференцируема, то ее производная есть *плотность распределения* (ПР) наработки до отказа:

$$f_{\xi}(t) = dF_{\xi}(t)/dt \quad (3)$$

4. *Средняя наработка* до отказа (СН)- это математическое ожидание наработки до отказа:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f_{\xi}(t) dt \quad (4)$$

5. *Гамма- процентная наработка* до отказа (ГПН) - это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах. Эта характеристика определяется при условии существования функции обратной к функции распределения- $F_{\xi}(t)$:

$$T_{\gamma} = P^{-1}\left(\frac{\gamma}{100}\right) = Q^{-1}\left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) = F_{\xi}^{-1}\left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) \quad (5)$$

6. *Интенсивность отказов* (ИО) - это отношение условной вероятности того, что случайная наработка до отказа будет принимать значения из полуинтервала бесконечно малой длины $[t; t + dt)$ при условии, что отказа до момента времени t не было, к длине этого полуинтервала dt . Другими словами, ИО- это отношение ПР наработки до отказа к ВБР:

$$\lambda(t) = \frac{P(t \leq \xi < t + dt / t \leq \xi)}{dt} = \frac{f_{\xi}(t)}{1 - Q(t)} = \frac{f_{\xi}(t)}{P(t)} \quad (6)$$

7. *Остаточный ресурс* (ОР) - это величина, характеризующая среднее оставшееся после некоторого момента времени τ время работы системы до отказа при условии, что до τ отказа не было:

$$T(\tau) = \frac{\int_{\tau}^{\infty} P(t) dt}{P(\tau)} \quad (7)$$

Расчет остаточного ресурса по формуле (7) применяется при соответствующем анализе характеристик невосстанавливаемых элементов.

Все перечисленные показатели надежности являются функциональными (1, 2, 3, 6, 7) или числовыми характеристиками (4, 5) закона распределения случайной наработки до отказа и связаны уравнениями с ФР или с ПР наработки до отказа. Следовательно, качество оценивания этих характеристик будет в первую очередь зависеть от того, насколько качественно проведено оценивание ФР и ПР. Последние могут быть оценены в ситуации, когда имеется статистическая информация о наработках до отказа- в лучшем случае это выборки полных наработок, в худшем, это цензурированные или группированные данные. Но, к сожалению, чаще всего приходится иметь дело со статистическими данными, из которых практически невозможно извлечь информацию о наработках до отказа. Они представляют собой в лучшем случае массивы времен отказов элементов, подлежащих оценке с точки зрения надежности, а, в худшем случае, цензурированные данные о количестве отказов группы однотипных элементов за

некоторый период эксплуатации (год). В этой ситуации статистику приходится иметь дело с потоком отказов. Этот суммарный поток отказов формируют потоки отказов каждого элемента оборудования из некоторой совокупности однотипных элементов и в качестве функциональных характеристик потока выбираются такие показатели надежности как ведущая функция потока и параметр потока отказов.

8. *Ведущая функция потока отказов* (ВФПО)- это математическое ожидание количества отказов ($n(t)$) к моменту времени t (среднее число отказов до момента t):

$$\Omega(t) = Mn(t) \quad (8)$$

9. *Параметр потока отказов* (ППО)- это производная ВФПО. Фактически, это скорость увеличения среднего количества отказов:

$$w(t) = \Omega'(t) \quad (9)$$

10. *Остаточная наработка восстанавливаемой системы* (ОН)- это математическое ожидание остаточного времени восстанавливаемой системы, проработавшей время t .

$$M(V_t) = \bar{\mu}_1 + \mu \cdot \Omega(t) - t \quad (10)$$

где V_t - остаточное время (остаточный ресурс) системы, имеющей наработку t ,

μ_1 - математическое ожидание наработки объекта до первого отказа,

μ - математическое ожидание наработки объекта до последующих отказов ($k > 1$),

$$\bar{\mu}_1 = \int_0^{\infty} t \cdot f_1(t) dt \quad (11)$$

$$\mu = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (12)$$

f_1 - плотность распределения наработки до первого отказа,

f - плотность распределения наработки до первого отказа > 1 .

В частном случае можно положить:

$$\mu = \mu_1, \quad f = f_1 \quad (13)$$

Для оценки надежности восстанавливаемых объектов, на основании статистических данных, как известно, применяются два основных показателя надежности: средняя наработка на отказ и параметр потока отказов.

Параметр потока отказов определяется как отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки. Параметр потока отказов связан с плотностью распределения наработки до отказа уравнением:

$$f_{\xi}(t) = \omega(t) - \int_0^t f_{\xi}(t - \tau) \omega(\tau) d\tau. \quad (14)$$

С функцией распределения уравнением:

$$F_{\xi}(t) = \int_0^t (1 - F_{\xi}(t - \tau)) \omega(\tau) d\tau. \quad (15)$$

Решение интегральных уравнений (14), (15) позволяет по известному параметру потока отказов оценивать плотность распределения или функцию распределения наработки до отказа. По известной плотности распределения можно определить такие показатели надежности объекта как средний ресурс и срок службы, гамма- процентный ресурс и срок службы и т.д. (7, 10). Другими словами, плотность распределения

наработки до отказа является важнейшей характеристикой, необходимой для расчёта основных показателей надёжности.

В докладе приводятся результаты расчетов параметра потока отказов на основании статистических данных, полученных из опыта эксплуатации элементов СУЗ Билибинской и Курской АЭС. Эксплуатационная информация представлена в виде наблюдений за функционированием группы однотипных объектов. В процессе наблюдений фиксировалось количество отказавших объектов из числа наблюдаемых на интервале времени равным одному году. По результатам наблюдений производилась оценка параметра потока отказов гистограммным методом и методом ядерного оценивания. Далее, решая уравнение Вольтерра 2-го рода, используя зависимость (14) рассчитываем плотность распределения. На основании плотности распределения производим оценивание остаточного ресурса. В качестве примера на рис. 1-4 приведены результаты расчета перечисленных показателей для одного из элементов СУЗ (блока релейно-транзисторных элементов аварийной защиты) Билибинской АЭС. На рис. 1 изображен график параметра потока отказов, рассчитанный по статистическим данным гистограммным методом и методом ядерного оценивания. На рис. 2 изображена плотность распределения, полученная как результат решения уравнения Вольтерра. График плотности представлен для двух случаев, гистограммной и ядерной оценки. На рис.3 показаны результаты расчетов функции распределения и вероятности безотказной работы, проведенные на основании ядерной оценки плотности распределения. На рис. 4 приведены результаты расчетов остаточного ресурса для группы рассматриваемых элементов. В ходе расчетов показано, что метод ядерного оценивания гарантирует более высокую точность расчетов.

В заключение можно отметить, что авторами разработан методический подход, позволяющий на основании эксплуатационных данных оценивать остаточный ресурс элементов. Методика апробирована на данных, полученных из опыта эксплуатации элементов СУЗ Билибинской и Курской АЭС. Проведены расчеты для большой группы элементов.

Результаты расчетов для блока релейно-транзисторных элементов аварийной защиты (БРТЭ АЗ)

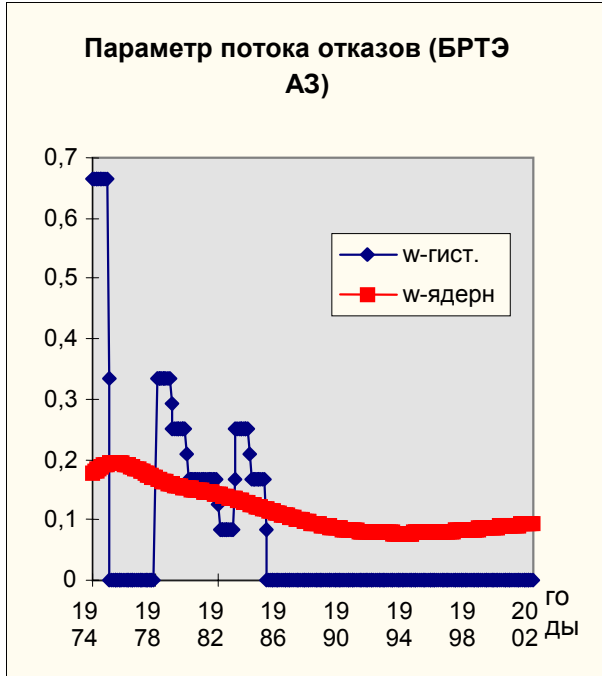


Рис.1.



Рис.2.

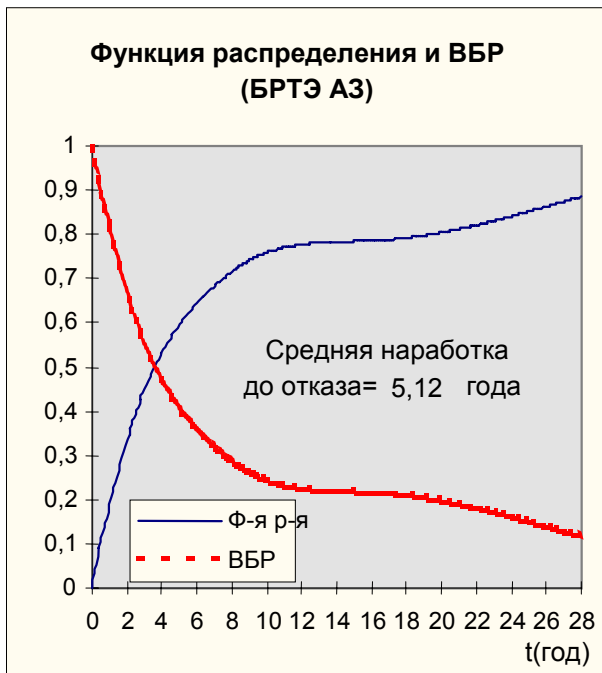


Рис.3.

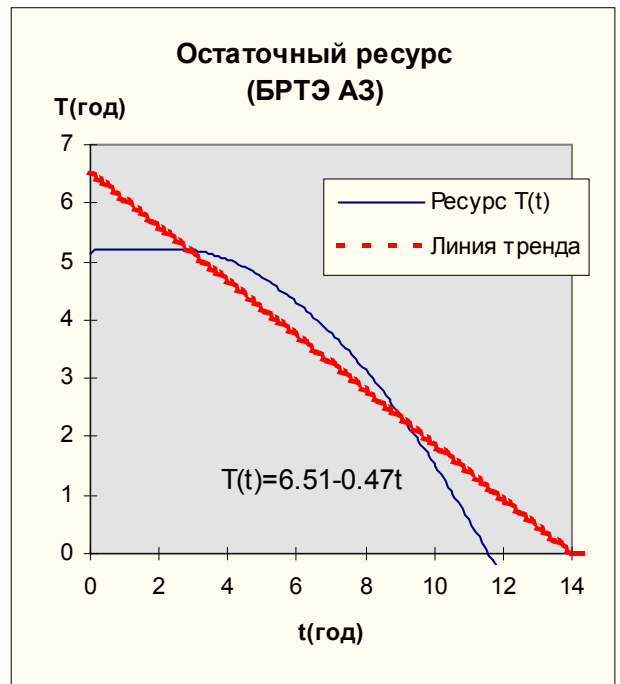


Рис.4.