

## **ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДО ПРОВЕДЕНИЯ ПЛАНОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ КОНЦЕПЦИИ РЕМОНТА ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

Разработана модель прогнозирования длительности до проведения планового технического обслуживания и ремонта редко отказывающего оборудования АЭС на основании оценок гамма-процентной наработки до отказа. При этом учитываются данные по отказам, тенденция изменения определяющих параметров технического состояния оборудования и экспертная оценка наработки до отказа оборудования.

*Ключевые слова:* ремонт по техническому состоянию, DN-распределение, параметр технического состояния, наработка до отказа, атомная электростанция, физико-статистический метод оценки надежности, байесовская оценка, экспертная оценка.

### **Актуальность вопроса**

В настоящее время на АЭС Украины проведение планового ремонта и технического обслуживания (ТОиР) оборудования определяется проектно-конструктивными и нормативными документами, а также требованиями заводов-изготовителей. В связи с этим плановые работы по ТОиР зачастую выполняются чаще, чем это необходимо, исходя из реального технического состояния оборудования.

Стратегия планового ТОиР с начала ввода оборудования в работу и до накопления данных по его надежности является определяющей стратегией ТОиР, применяемой для систем, важных для безопасности (СВБ). После уточнения фактических характеристик надежности систем и оборудования, при наличии необходимого диагностического обеспечения и технической документации, допускается применять ТОиР по техническому состоянию (п. 6.11 [1]).

Стратегия перехода на ремонт по техническому состоянию (РТС) оборудования означает принятие решений и проведение организационно-технических мероприятий по плановым ТОиР и послеремонтным испытаниям на основе результатов фактической оценки технического состояния и влияния оборудования АЭС на условия безопасности и эффективности выработки электроэнергии.

Общая концепция планирования ремонтов в условиях применения РТС состоит в следующем: оборудование необходимо ремонтировать тогда, когда определяющие параметры его технического состояния близки к предельно-допустимым значениям. При этом следует учитывать возможную неопределенность (погрешность) анализа. Поэтому чем значительнее оборудование влияет на безопасность и эффективность эксплуатации энергоблока, тем с большим запасом по времени (заранее) должен назначаться плановый ремонт оборудования.

Планирование проведения ТОиР возможно на основании различных эксплуатационных данных. Однако оборудование АЭС является в большинстве высоконадежным, редко отказывающим и малосерийным. Кроме того, периодически проводимые ТОиР частично или полностью восстанавливают оборудование, и это препятствует реализации постепенных отказов. Это приводит к недостаточности (для непосредственного статистического анализа) количества отказов и недостоверности наработки до отказа (по причине периодических плановых восстановлений элемента), что делает неприемлемыми классические методы математической статистики по анализу множества отказов (наработок до отказа).

Следует отметить, что в случае реализации отказа его необходимо учитывать в анализе (при планировании ТОиР), а если отказа не было, то это вовсе не говорит о высокой надежности элемента (и о возможности реже проводить его ТОиР). Отсутствие отказа может

быть связано, например, с тем, что применяемая стратегия плановых ремонтов всегда вовремя восстанавливала элемент и не доводила его до отказа (до критического ухудшения характеристик). Поэтому в условиях плановых ТОиР и планово-предупредительных ремонтов (ППР) наработка на отказ отражает не столько надежные характеристики самого элемента, сколько эффективность системы плановых восстановлений элемента.

Ниже будет показано, как, учитывая специфику оборудования АЭС, модифицировать известные физико-статистические методы (на базе диффузионных распределений) с целью учесть как имеющие место отказы оборудования, так и тенденцию изменения определяющих параметров технического состояния (ОПТС) оборудования, либо применить экспертные оценки.

### Общие положения

В качестве основного показателя, определяющего длительность до проведения плановых работ по ТОиР, применим показатель безотказности – гамма-процентная наработка до отказа (наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, [2]).

Выбор гамма-процентной наработки до отказа основывается на следующем.

Показатель применим для оценок безотказности любых групп оборудования и систем АЭС (табл. 3 [3]).

Имеется возможность изменять значения гамма-процентного запаса  $\gamma$  в зависимости от влияния оборудования на безопасность. То есть изменяя значение  $\gamma$ , можно изменять степень упреждения проведения планового ТОиР по отношению к моменту возникновения отказа. При этом показатель средней наработки до отказа является частным случаем гамма-процентной наработки до отказа [4].

Гамма-процентный показатель наработки до предельного состояния нормативно закреплён в России в качестве основного показателя при оценках остаточного ресурса оборудования [5].

Имеются сертифицированные методики расчета гамма-процентной наработки до отказа как на основании данных по отказам [6, 7], так и на основании изменения ОПТС (процессов деградации) [7 – 9].

Цель и задачи исследования определяют особенности, которые необходимо учесть при разработке методик оценки наработки до отказа.

1. График проведения плановых ТОиР устанавливается для каждой единицы оборудования отдельно (или для группы однотипных элементов). В границы оборудования обычно входят элементы, не имеющие внутреннего дублирования. В анализе может рассматриваться несколько элементов единицы оборудования (например, несколько подшипников одного насосного агрегата), однако, отказ будет происходить при отказе любого элемента и отказ элемента можно рассматривать как отказ оборудования в целом. Нарботка до отказа элемента будет наработкой до отказа оборудования.

Таким образом, в рамках данного исследования нецелесообразно рассматривать нюансы оценок наработки до отказа, учитывающие структурные связи элементов.

2. Методики оценки наработки до отказа будут значительно различаться в зависимости от типа, качества и количества исходных данных, на основании которых производится оценка. Возможны следующие основные варианты:

а) имеется достаточно данных по отказам оборудования с известными признаками и датами/временем возникновения отказа;

б) данные по отказам отсутствуют, но есть данные по изменению определяющих численных характеристик ОПТС, а также известны граничные значения ОПТС, при выходе за которые оборудование необходимо выводить в ремонт;

в) имеется незначительное количество отказов (не позволяющее корректно оценить наработку) и данные по изменению численных характеристик ОПТС;

г) данные по отказам отсутствуют (либо их недостаточно), а ОПТС не является численной характеристикой. Например, состояние определенных участков элементов может оцениваться по результатам осмотра во время плановых ТОиР (без замеров и расчетов) и фиксироваться как удовлетворительное/неудовлетворительное.

Для различных типов, качества и количества исходных данных используются различные схемы расчета и модели надежности, а именно:

строго вероятностные (статистические) модели отказов (для группы данных а);

вероятностно-физические модели отказов (для групп б и в);

экспертная оценка на основании операций с нечеткими множествами (для группы г).

### **Оценка наработки до отказа при достаточном количестве данных по отказам оборудования**

При наличии достаточной статистики по отказам оборудования оценка наработки до отказа проводится на основании известных методов теории надежности [6, 7]. Поэтому для данного случая будут представлены лишь отдельные специфические аспекты, связанные с особенностями функционирования оборудования АЭС.

В общем случае при проведении оценки необходимо выполнить следующие шаги:

- 1) определение, установление вида закона распределения случайной величины;
- 2) определение, установление вида плана испытаний, которому максимально соответствуют условия эксплуатации анализируемого оборудования;
- 3) оценка достаточности статистических данных;
- 4) проведение оценок среднего значения и гамма-процентного значения наработки до отказа.

Для экспериментальной оценки определения вида закона распределения с высокой достоверностью требуется в общем случае большое количество отказов [7, 10], поэтому выбор закона распределения целесообразно выполнять на основании качественного анализа в соответствии с условиями применения того или иного закона распределения.

Режим эксплуатации тепломеханического оборудования наиболее близок к планам испытаний [NRT] и [NMT]. В соответствии с планом [NRT] испытанию (в нашем случае – контролю) подвергаются  $N$  однотипных элементов в течение времени  $T$ , отказавшие элементы восстанавливаются (заменяются новыми). В соответствии с планом [NMT] также контролируются  $N$  элементов в течение времени  $T$ , отказавшие элементы ремонтируются (без замены).

Достаточность статистических данных, полученных по результатам эксплуатации оборудования АЭС (для планов [NRT] и [NMT]) определяется общим количеством зафиксированных отказов  $d$  в течение времени  $T$ . Исходными данными для оценки минимально необходимого количества отказов  $d_{min}$  являются:

доверительная вероятность одностороннего доверительного интервала  $q$ ;

предельная относительная ошибка оценки соответствующего показателя надежности (ПН)  $\xi$ ;

коэффициент вариации основных процессов деградации (приводящих к переходу оборудования в отказное состояние)  $v$ ;

регламентированное значение вероятности (степень запаса) гамма-процентного ПН  $\gamma$ ;

закон распределения случайной величины, используемый при оценке соответствующего ПН.

Коэффициент вариации основных процессов деградации  $v$  – это отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию наработок до отказа, и, в частности, для распределения Вейбулла имеет вид

$$\nu = \frac{\sqrt{\Gamma(1+2/b) - \Gamma^2(1+1/b)}}{\Gamma(1+1/b)}, \quad (1)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  – табулируемая гамма-функция;  $b$  – степенной параметр распределения Вейбулла.

Проведем сравнение необходимого количества отказов  $d_{min}$  для всех законов распределения, регламентируемых ДСТУ 3004 [6], и наиболее применимых исходных данных ( $q, \xi, \nu, \gamma$ ) при оценках ПН оборудования АЭС. Коэффициент вариации  $\nu$  в зависимости от вида разрушения может изменяться в широком диапазоне от 0,05 до 1,5. В качестве первого приближения наиболее часто используется значение  $\nu = 0,75$  [11]. Результаты сведены в табл. 1.

**Таблица 1. Минимально необходимое количество зафиксированных отказов  $d_{min}$  за время наблюдения  $T$  для оценок ПН по результатам эксплуатации оборудования АЭС**

Для оценки ПН		Элементы/оборудование систем, важных для безопасности $q = 0,95; \xi = 0,05; \nu = 0,75$					Остальные элементы/оборудование $q = 0,90; \xi = 0,10; \nu = 0,75$				
		EX	DM,	DN	LN	WE	EX	DM	DN	LN	WE
Средних		1169	609	609	591	650	194	93	93	90	109
Гамма-процентных	$\gamma = 50 \%$	2252	1218	772	759	1240	342	185	117	115	188
	$\gamma = 70 \%$	3646	2030	1287	839	2008	553	309	196	127	305
	$\gamma = 90 \%$	10835	6091	3862	1411	5965	1644	926	587	214	905
	$\gamma = 95 \%$	21649	12183	7725	2157	11922	3285	1852	1175	327	1809

Примечание. EX – экспоненциальное распределение; DM – диффузионно-монотонное распределение; DN – диффузионно-немонотонное распределение; LN – логарифмически-нормальное распределение; WE – распределение Вейбулла.

Необходимое количество отказов для проведения оценок ПН только по эксплуатационной статистике отказов возможно получить только для некоторых видов электротехнического оборудования и оборудования информационных и управляющих систем АЭС. Для теплотехнического оборудования и трубопроводов АЭС получение необходимого количества отказов (особенно для оценок элементов/оборудования СВБ) не представляется возможным.

Следует отметить, что наиболее приемлемыми, с точки зрения минимальных требований к количеству отказов, являются диффузионно-немонотонное и логарифмически-нормальное распределения.

При подтверждении достаточности количества зафиксированных отказов элементов  $d \geq d_{min}$  оценка среднего значения и гамма-процентного значения наработки до отказа возможна по методике разд. 9 [6].

### **Оценка наработки до отказа по изменению ОПТС при отсутствии данных по отказам оборудования**

Данная оценка базируется на расчете показателей надежности на основании физических процессов деградации (разд. 6 [8]).

Такую схему расчета можно применить для оценок наработки до отказа, когда: известны превалирующие процессы деградации, приводящие к отказам; установлены ОПТС; имеются необходимые численные значения ОПТС:

начальное значение  $x_0$ ;

текущее значение (на момент проведения анализа)  $x_N$ ;

промежуточные значения  $x_i, i = 1, 2, \dots, N$ ;

граничное значение параметра, при пересечении которого требуется вывод в ремонт  $x_{пр}$ .

Для расчета наработки до отказа ДСТУ 2862 [8] рекомендует использовать: диффузионно-монотонное распределение (DM-распределение);

диффузионно-немонотонное распределение (DN-распределение).

Для окончательного выбора между этими двумя видами распределений проведем:

1) анализ сути математического моделирования случайных процессов с помощью DM- и DN-распределений (на основе [12 – 14]);

2) обобщенный анализ реальных процессов поведения ОПТС оборудования АЭС и сравнение их с процессами, которые моделируют DM- и DN-распределения.

DM- и DN-распределения относятся к непрерывным марковским диффузионным процессам (МДП). Для задач надежности интерес представляют аналитические решения о пересечении случайного процесса заданной границы. При этом граница может быть прозрачной или поглощающей. Задачи с прозрачной границей соответствуют случаю, когда при выходе за границу параметр не изменяет характер дальнейшего поведения и может трактоваться как появление предупреждающего сигнала, а не как отказ оборудования. При поглощающей границе достижение параметром данной границы можно трактовать как отказ системы.

Плотность вероятности  $p(x, t, x_0)$  МДП описывается уравнением Колмогорова и в случае постоянных коэффициентов сноса и диффузии имеет вид

$$\frac{\partial p(x, t, x_0)}{\partial t} = -\mu \frac{\partial p(x, t, x_0)}{\partial x} + \frac{\nu}{2} \frac{\partial^2 p(x, t, x_0)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где  $x$  – текущее значение анализируемого ОПТС;  $t$  – момент времени, в который значение ОПТС равно  $x$ ;  $\mu$ ,  $\nu$  – коэффициенты сноса и диффузии МДП соответственно.

Область изменения ординаты процесса в задачах с прозрачной границей – вся бесконечная ось  $x \in (-\infty; +\infty)$ , а в задачах с поглощающей границей – полубесконечная ось  $x \in (-\infty; x_{\text{пр}}]$ ,  $x_{\text{пр}}$  – граничное значение параметра  $x$ .

После подстановки данных условий в уравнение (2) получаем:

вероятность непересечения прозрачной границы

$$p_1(t, x_{\text{пр}}, x_0) = \Phi\left(-\frac{\mu t - (x_{\text{пр}} - x_0)}{\sqrt{\nu t}}\right); \quad (3)$$

вероятность недостижения непрозрачной границы

$$p_2(t, x_{\text{пр}}, x_0) = \Phi\left(-\frac{\mu t - (x_{\text{пр}} - x_0)}{\sqrt{\nu t}}\right) - \exp\left(-\frac{2\mu(x_{\text{пр}} - x_0)}{\nu}\right) \Phi\left(-\frac{\mu t + (x_{\text{пр}} - x_0)}{\sqrt{\nu t}}\right). \quad (4)$$

Выражение (3) представляет собой функцию DM-распределения, а (4) – функцию DN-распределения.

Таким образом, DM-распределение является вероятностью непересечения прозрачной границы, а DN-распределение – недостижения поглощающей границы.

Перейдем к обобщенному анализу реальных процессов поведения ОПТС и сравнению их с процессами, которые моделируют DM- и DN-распределения.

Поведение ОПТС в общем случае может быть описано моделью поведения случайных процессов монотонного и немонотонного характера  $z(t) = x_0 + u(t)$ :

а) монотонный процесс, описываемый DM-распределением,  $du/dt \geq 0$ ;

б) немонотонный процесс, описываемый DN-распределением,  $du/dt < 0$ .

Из свойств DM-распределения вытекает, что изменение ОПТС не может иметь обратного характера, то есть значения ОПТС либо не изменяются, либо приближаются к предельно допустимой границе  $x_{\text{пр}}$ . Для DN-распределения допустима ситуация, когда текущие значения ОПТС временно улучшаются.

Из анализа различных эксплуатационных данных по различным характеристикам (таким как значение утечки из гермообъема реакторной установки, сопротивление изоляции, сопротивление обмоток, время/скорость открытия/закрытия и т.д.) следует, что контролируемые значения ОПТС носят скорее немонотонный характер. Это связано как с изменением

свойств самого оборудования, так и с наложением внешних возмущений типа изменения условий окружающей среды, замены связанного оборудования, колебаний в пределах точности и достоверности измерительных приборов. В ряде случаев наблюдались ситуации, когда текущие значения ОПТС были лучше начальных.

В терминах случайных процессов такое поведение контролируемого параметра можно объяснить наложением на случайный процесс изменения ОПТС другого случайного процесса, который обычно в литературе называют «белый шум» [15]. В результате такого наложения контролируемые системы могут зафиксировать любое значение параметра из области, созданной «белым шумом» (рис. 1). Полученная реализация изменения результатов контроля ОПТС вполне может иметь немонотонный характер (пунктирная линия на рис. 1). Поэтому модель немонотонных случайных процессов является более общей и лучше описывает эксплуатационные данные по изменению ОПТС.

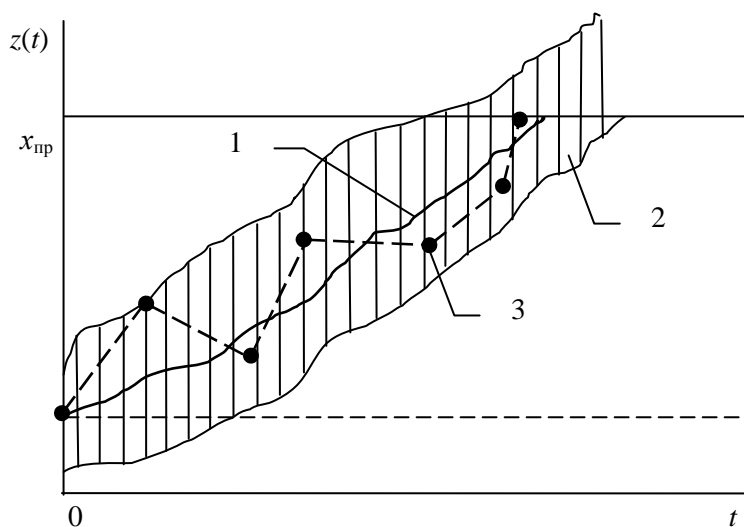


Рис. 1. Модель поведения монотонного случайного процесса с наложением «белого шума»: 1 – монотонный процесс изменения ОПТС; 2 – область изменения контролируемого параметра при наложении «белого шума»; 3 – результаты контроля ОПТС.

Таким образом, на основании анализа двух видов (теоретического и практического) можно заключить, что для оценки наработки до отказа на основе физических процессов деградации оборудования АЭС наиболее подходящей является модель с немонотонными реализациями, описываемая DN-распределением.

Диффузионно-немонотонное распределение (DN-распределение) также называют распределением Вальда, распределением Твиди и обратным гауссовским распределением. Данное распределение описывает решение о пересечении поглощающей границы (предельно допустимого значения ОПТС) непрерывным однородным марковским диффузионным процессом с постоянными коэффициентами сноса и диффузии (постоянным коэффициентом параметра масштаба  $\mu$  и параметра формы  $\nu$ ) и фиксированным началом. Параметр, который подпадает под описание данным распределением, должен быть случайным процессом с независимыми гауссовскими стационарными приращениями с немонотонными реализациями случайной величины.

Оценка наработок до отказа для DN-распределения возможна по прил. Г ДСТУ 2862 [8]. Средняя и гамма-процентная наработка до отказа составит

$$T_{cp} = \mu \frac{x_{np} - x_0}{a}, \quad T_{\gamma} = \mu X_{\gamma} = X_{\gamma} \frac{x_{np} - x_0}{a}, \quad (5)$$

где коэффициент  $X_{\gamma}$  определяется из уравнения  $F_{DN}(X_{\gamma}, \mu = 1, \nu) = 1 - \gamma/100$ , в котором  $F_{DN}(X_{\gamma}, \mu=1, \nu)$  – функция распределения DN-распределения (вероятность отказа);  $a$  – средняя скорость изменения ОПТС;  $\mu$  – параметр масштаба DN-распределения;  $\nu$  – параметр

формы DN-распределения, равен коэффициенту вариации скорости изменения определяющего параметра и определяется по коэффициенту вариации основного процесса деградации, (по прил. В [6]);  $\gamma$  – регламентированное значение вероятности (степень запаса) гамма-процентной наработки до отказа (выражено в процентах).

Оценка средней скорости изменения ОПТС возможна известным методом наименьших квадратов

$$a = \frac{\sum_{i=0}^N t_i x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N t_i \sum_{i=0}^N x_i}{\sum_{i=0}^N t_i^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=0}^N t_i \right)^2}, \quad (6)$$

где  $x_i$  – текущее значение ОПТС, начиная от начального  $x_0$  до конечного  $x_N$ ,  $i = 0, \dots, N$ ;  $N$  – количество оценок ОПТС;  $t_i$  – моменты времени оценки ОПТС,  $i = 0, \dots, N$ .

Упрощенно среднюю скорость изменения ОПТС можно оценить по начальному и последнему значениям

$$a = \frac{x_N - x_1}{t_N - t_1}. \quad (7)$$

В связи с различным способом контроля (непрерывный, периодический) и влиянием проведения плановых ТОиР на процесс изменения ОПТС имеется ряд особенностей расчета средней скорости изменения ОПТС  $a$  и начального значения параметра  $x_0$  (рис. 2).

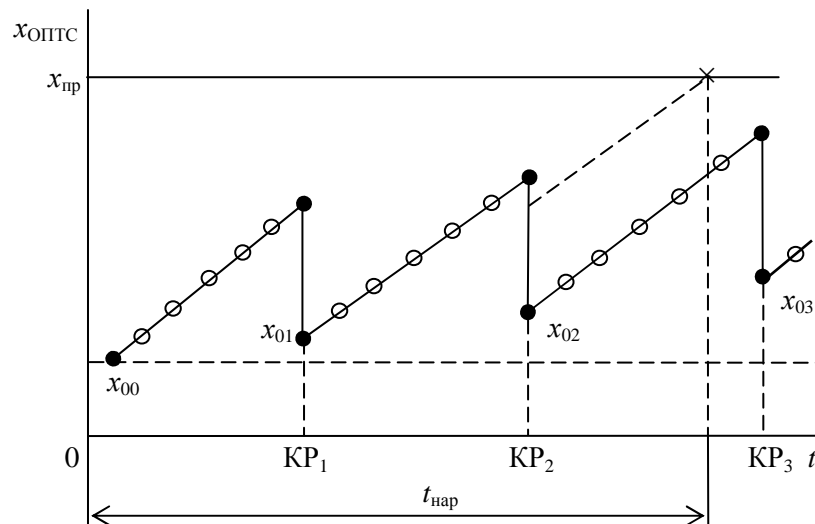


Рис. 2. Процесс изменения ОПТС при наличии капитальных ремонтов (КР), частично восстанавливающих данный параметр:

— результаты непрерывного контроля ОПТС;  $\circ \circ \circ$  результаты периодического контроля ОПТС между КР;  $\bullet \bullet \bullet$  результаты контроля ОПТС в КР.

В случае если какой-либо вид планового ТОиР влияет на изменение ОПТС, в качестве оценки начального значения  $x_0$  необходимо использовать значение ОПТС после последнего проведенного планового ТОиР.

Для представленного примера (см. рис. 2) начальное значение  $x_0 = x_{03}$  (значение  $x$  после проведения  $КР_3$ ). То есть в этом случае

$$x_0 = \max_j \left( \min_i x_{ij} \right), \quad (8)$$

где  $x_{ij}$  – значение ОПТС;  $i$  – количество значений ОПТС на этапе между  $j$ -м и  $j + 1$ -м плановыми ТОиР, изменяющими поведение ОПТС;  $j$  – количество плановых ТОиР, изменяющих поведение ОПТС.

Оценку средней скорости изменения ОПТС также необходимо проводить на каждом из промежутков между плановыми ТОиР (изменяющими поведение ОПТС) в отдельности. При этом необходимо учесть, что скорость может постепенно изменяться, поэтому оценки скорости на более поздних интервалах должны иметь вклад меньший, чем скорости, полученные на последних интервалах. Данный вклад можно реализовать через весовой коэффициент

$$m_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad k_i = \frac{1}{2^{n-1}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где  $n$  – количество интервалов между плановыми ТОиР, на которых определяется средняя скорость изменения ОПТС.

Тогда средняя скорость изменения ОПТС при условии влияния ТОиР на изменение ОПТС определяется как

$$\bar{a} = \sum_{i=1}^n a_i m_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

где  $a_i$  – значение средней скорости на каждом из  $n$  участков между плановыми ТОиР, оцениваемое по (6).

Если контроль параметра проводится только во время плановых ТОиР (жирные точки на графике рис. 2), то оценка  $a_i$  будет проходить только по этим двум точкам:

$$a_i = \frac{x_{\max i} - x_{0i}}{T_i^{\text{ТОиР}}}, \quad (11)$$

где  $x_{0i}$ ,  $x_{\max i}$  – значение ОПТС в начале и в конце  $i$ -го интервала между плановыми ТОиР соответственно;  $T_i^{\text{ТОиР}}$  – длительность  $i$ -го интервала между плановыми ТОиР;  $x_{0i}$  – значение ОПТС после проведения  $i - 1$ -го планового ТОиР.

### **Оценка наработки до отказа по изменению ОПТС при недостаточном количестве данных по отказам оборудования**

Если имеются численные значения ОПТС и небольшое количество отказов (недостаточное для оценки ПН только на основании зафиксированных отказов элементов/оборудования), то целесообразно совместное использование статистических и вероятностно-физических моделей.

При совместном использовании моделей важным этапом является проведение анализа приемлемости имеющихся отказов. Как уже было сказано выше, проведение плановых ТОиР может полностью или частично восстанавливать ОПТС, отдаляя возможный отказ оборудования. При некачественном проведении такого ТОиР отказ может реализоваться ранее следующего планового ТОиР. Полученная в этом случае наработка до отказа  $t_{\text{нар}}$  не отражает реальной надежности оборудования (см. рис. 2). В связи с этим необходимо исключить из дальнейшего анализа отказы оборудования, которые связаны с некачественным проведением плановых работ по ТОиР.

Совмещение двух моделей (по отказам и по изменению параметров) возможно при использовании байесовского метода. Апостериорная (результатирующая) вероятность определяется по заданной априорной (исходной) вероятности отказа (оцененной по модели изменения параметров) и функции правдоподобия (учитывающей дополнительные отказы).

На практике применение байесовских методов реализуется через дискретизацию априорного распределения, оценку соответствующих дискретных значений функции правдоподобия и затем оценку дискретных значений апостериорного распределения по выражению [16]:



$$P_{\text{анос}}(x_i) = \frac{p_0(x_i)L(E|x_i)}{\sum_{j=1}^M p_0(x_j)L(E|x_j)}, \quad i = 1, \dots, M, \quad (12)$$

где  $p_0(x_i)$  – дискретное значение априорной вероятности в точке  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, M$ ;  $L(E|x)$  – дискретное значение функции правдоподобия в точке  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, M$ ;  $M$  – общее количество интервалов дискретизации;  $E$  – событие, заключающееся в получении дополнительных данных по отказам.

Если в качестве априорного распределения использовать диффузионно-немонотонное распределение, то с учетом дискретизации априорное распределение имеет вид

$$p_0(x_i) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\sqrt{\mu}}{\nu z \sqrt{2\pi z}} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\nu^2 \mu z}\right) dz, \quad (13)$$

где  $\mu$ ,  $\nu$  – параметры диффузионно-немонотонного распределения случайной величины наработки до отказа (средней или гамма-процентной), определяемые на основании изменения ОПТС;  $X_{i-1}$ ,  $X_i$  – дискретные значения наработки до отказа, с равномерным шагом ( $\Delta = X_{\max}/M$ ), представленные в интервале от  $X_0 = 0$  до  $X_{\max}$ ,  $i = 1, \dots, M$ ;  $x_i$  – точка, для которой оценена дискретное значение вероятности  $x_i = 0,5 \cdot (X_{i-1} + X_i)$ ,  $i = 1, \dots, M$ .

В качестве функции правдоподобия на практике часто используют распределение Пуассона, которое с учетом дискретизации и, учитывая, что априорное распределение описывает величину обратную интенсивности отказов, имеет вид

$$L(E|x_i) = \frac{(T/x_i)^d}{d!} \exp\left(-\frac{T}{x_i}\right), \quad (14)$$

где  $d$  – количество дополнительных данных по отказам, зафиксированным за промежуток времени  $T$ .

Максимальное значение интервала дискретизации должно выбираться из условия пренебрежимо малого значения вероятности  $p_0$  в точке  $X_{\max}$  и учитывать значения наработки, оцененные по дополнительным данным  $\{d, T\}$

$$X_{\max} = \begin{cases} Q_0, & \text{при } Q_0 > T/d \\ T/d, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (15)$$

где  $Q_0$  – квантиль диффузионно-немонотонного распределения наработки до отказа, соответствующий вероятности 0,9999 (при этом отбрасываемая при дискретизации величина  $p_0(x)$  составит не более 0,01 %).

Уточненное значение наработки до отказа (средней или гамма-процентной) оценивается по выражению

$$\hat{T} = \sum_{i=1}^M x_i P_{\text{анос}}(x_i). \quad (16)$$

### Оценка наработки до отказа на основании экспертного анализа

Существуют случаи, когда ОПТС не могут быть выражены через численные значения. В этом случае оценку можно провести на основании опыта, знаний, квалификации обслуживающего персонала АЭС. Теоретической основой таких оценок являются так называемые экспертные системы теории нечетных множеств [17, 18].

На практике данный метод реализуется следующим образом:

отбор персонала (группы), который способен квалифицированно и ответственно оценить приблизительные сроки безотказной работы/отказа оборудования без проведения пла-

новых ТОиР, восстанавливающих те или иные характеристики оборудования;  
 проведение опроса персонала (и документирование) на предмет оценки длительности безаварийной работы и длительности до отказа оборудования;  
 обработка результатов опроса с оценками средней и гамма-процентной наработки до отказа.

Таким образом, на этапе опроса персонал по каждому виду анализируемого оборудования оценивает (при условии непроведения планового вида ТОиР, по которому проводится планирование):

- 1) время, в течение которого оборудование не откажет,  $T_1$ ;
- 2) время, после которого оборудование откажет обязательно,  $T_2$ .

То есть реальная наработка до отказа по мнению персонала лежит в диапазоне  $t_{\text{нар}} \in [T_1; T_2]$ .

Полученные от группы опрошенных лиц данные по значениям  $\{T_1; T_2\}$  осредняются. При получении окончательных значений  $T_1^{cp}$  и  $T_2^{cp}$  может применяться взвешенное осреднение, при котором мнению более квалифицированных экспертов присваивается более высокий весовой коэффициент оценки  $\{T_1; T_2\}$ . Тогда формула (17) приобретает вид

$$T_1^{cp} = \sum_{i=1}^n m_i T_{1i}; \quad T_2^{cp} = \sum_{i=1}^n m_i T_{2i}; \quad m_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (17)$$

где  $n$  – количество опрошенных экспертов;  $T_{1i}, T_{2i}$  – длительность безотказной работы/отказа по мнению  $i$ -го эксперта;  $k_i$  – весовой коэффициент, который присваивается оценке  $i$ -го эксперта в соответствии с уровнем его квалификации, опытом работы и т.д.

После данной предварительной обработки переходят к оценкам наработки до отказа.

Для результатов экспертных оценок наиболее целесообразно использовать нормальное распределение наработки до отказа. Нормальное распределение хорошо описывает случайные величины, на которые воздействует большое (в идеале – бесконечно большое) количество небольших случайных возмущений (ошибок, процессов и т.п.), а отклонение от среднего симметрично относительно среднего значения. Такая ситуация как раз характерна для описания результатов экспертных оценок (квалифицированных мнений персонала).

Оценка параметров распределения проводится по значениям  $\{T_1^{cp}; T_2^{cp}\}$ . Графически это выглядит как наложение функции нормального распределения  $F_{\text{норм}}(t)$  на прямую, проведенную между двумя точками с координатами  $\{T_1^{cp}; 0\}$  и  $\{T_2^{cp}; 1\}$  (рис. 3).

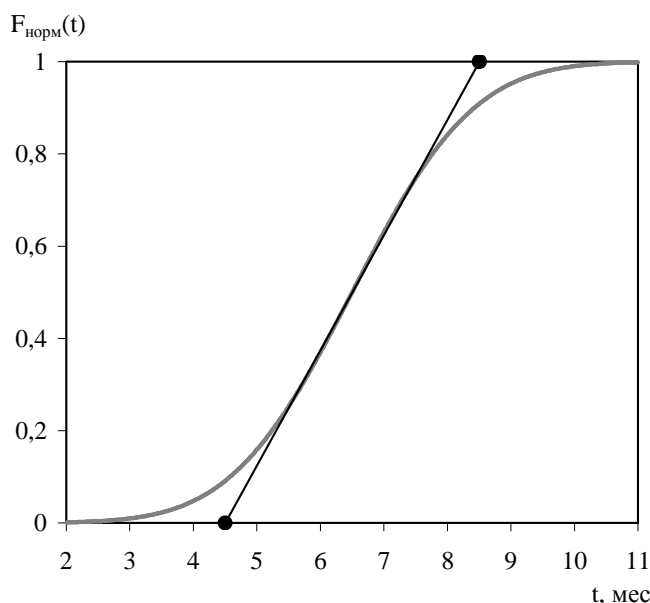


Рис. 3. Графическое представление восстановления параметров  $\mu$ ,  $\sigma$  нормального распределения  $F_{\text{норм}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  на основании экспертных оценок  $\{T_1^{cp} = 4,5; T_2^{cp} = 8,5\}$ .

Средняя наработка до отказа  $T_{cp}$ , равная математическому ожиданию и параметру распределения  $\mu$ , составит  $T_{cp} = \mu = 0,5(T_1^{cp} + T_2^{cp})$ .

Первоначальная ( $\sigma'$ ) и окончательная ( $\sigma$ ) оценка значения среднеквадратического отклонения составят

$$\sigma' = \sqrt{0,5((T_1^{cp} - \mu)^2 + (T_2^{cp} - \mu)^2)} = T_2^{cp} - \mu, \quad \sigma = \sigma' + \Delta, \quad (18)$$

где  $\Delta$  – экспертная поправка – величина, которая определяется графическим методом таким образом, чтобы график функции нормального распределения максимально "ложился" на прямую, соединяющую точки  $\{T_1^{cp}; 0\}$  и  $\{T_2^{cp}; 1\}$  (см. рис. 3).

Величина  $\Delta$  может быть как положительной, так и отрицательной. Неопределенность оценки  $\Delta$  компенсируется принятием консервативно наибольших значений из диапазона возможных значений. При этом получаем оценку параметров нормального распределения с консервативно ббльшим среднеквадратическим отклонением.

Гамма-процентная наработка до отказа составит

$$T_\gamma = \mu - u_\gamma \sigma, \quad (19)$$

где  $u_\gamma$  – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности  $\gamma$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u_\gamma} \exp(-x^2/2) dx.$$

Для примера, представленного на рис. 3, получим:  $T_{cp} = \mu = 6,5$  мес;  $\sigma' = 2$  мес; экспертная поправка  $\Delta = -0,5$  мес;  $\sigma = 1,5$  мес; гамма-процентная наработка до отказа при  $\gamma = 95\%$   $T_\gamma = 4,0$  мес, при  $\gamma = 70\%$   $T_\gamma = 5,7$  мес.

Следует отметить, что, несмотря на всю кажущуюся приближенность и нестрогость определения наработок до отказа, экспертный метод может давать хорошие результаты, особенно в условиях сложного графика изменения ОПТС (например, представленного на рис. 3). Опыт эксплуатационного персонала может учесть ряд факторов, к которым нечувствительны (малочувствительны) и статистические, и вероятностно-статистические методы оценки, и факторы, которые трудно учесть данными методами, например:

эксплуатационные события с другим оборудованием, но связанные с проведением анализируемого вида ТОиР;

изменение качества расходных материалов применяемого при плановых ТОиР оборудования;

различные уровни осознания ответственности того или иного персонала цехов, привлекаемых предприятий, проводящих ТОиР оборудования;

результаты внеплановых инспекций, испытаний, ремонтов, проводимых на одном оборудовании и не затронувших другое оборудование, отнесенное к одной группе анализа;

изменение ОПТС под воздействием нескольких различных видов плановых ТОиР (текущий, средний, капитальный ремонт, техобслуживание), проводимых с различной периодичностью.

В связи с этим целесообразно проводить экспертную оценку наработок до отказа как этап проверки оценок наработок, полученных другими методами (даже при наличии достаточного количества отказов и/или численных данных по изменению ОПТС).

## Выводы

1. Получили дальнейшее развитие физико-статистические методы оценки показателей

надежности оборудования. Разработана специфическая модель прогнозирования длительности до планового ремонта оборудования АЭС. Специфичность модели связана с тем, что оборудование АЭС является высоконадежным, редко отказывающим и малосерийным. Кроме того, периодически проводимые ППР частично или полностью восстанавливают оборудование, что препятствует реализации постепенных отказов. Это приводит к статистической недостаточности количества отказов и недостоверности наработки до отказа (по причине периодических плановых восстановлений элемента), что делает неприемлемыми классические методы математической статистики по анализу множества отказов (наработок до отказа).

2. Показана возможность применения гамма-процентной наработки до отказа в качестве основного показателя планирования длительности до очередного планового ТОиР.

3. Для случая отсутствия данных по отказам, но когда имеются численные характеристики ОПТС, обосновано применение диффузионно-немонотонного распределения для оценок гамма-процентных оценок наработки до отказа оборудования АЭС. Показана возможность использования байесовского метода для объединения оценок, выполненных на основании тенденции изменения ОПТС и данных по отказам оборудования. Если данные по отказам отсутствуют и ОПТС не является численной характеристикой, показана возможность применения методики экспертной оценки наработки до отказа. Также целесообразно проводить экспертную оценку наработок до отказа как этап проверки оценок наработок, полученных другими методами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила організації технічного обслуговування і ремонту систем та обладнання атомних електростанцій: СОУ-Н ЯЕК 1.010:2008.* – Офіц. вид. – К.: ДП НАЕК «Енергоатом»: М-во палива та енергетики України, 2008. – V, 116 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила).
2. *Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89.* – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 26 с.
3. *Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей: ГОСТ 26291-84.* - [Ограничение срока действия отменено ИУС 11.12.94 г.]. - М.: Изд-во стандартов, 1987. - 14 с.
4. *Комаров Ю.А. Методология проведения ремонта по техническому состоянию оборудования АЭС // Проблемы безпеки АЕС і Чорнобиля.* - 2010. – Вып. 13. – С. 48 - 59.
5. *Типовые технические требования к методикам оценки технического состояния и остаточного ресурса элементов энергоблоков АС: РД ЭО-0141-98.* – [Дата введения 1999-08-19]. – М. : ГП Концерн «Росэнергоатом», 1999. – 10 с. – (Руководящий документ ГП Концерн «Росэнергоатом»).
6. *Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным: ДСТУ 3004-95.* – К.: Изд-во стандартов, 1995. — 56 с.
7. *Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения: ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97)* – К.: Изд-во стандартов, 1997. – 46 с.
8. *Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования : ДСТУ 2862-94.* – К.: Изд-во стандартов, 1994. – 43 с.
9. *Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ) : ДСТУ 3942-2000 (ГОСТ 27.506-2000).* – К.: Изд-во стандартов, 2000. – Ч. 2: Диффузионное распределение. – 32 с.
10. *Прикладная статистика. Правила проверки согласования опытного распределения с теоретическим: СТ СЭВ 1190-78.* – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 38 с.
11. *Рабочая программа обследования и оценки технического состояния асинхронных электродвигателей 0,4 кВ. Южно-Украинская АЭС. Блок № 1: ПМ.1.3108.0018.* – Министерство топлива и энергетики Украины, ГП НАЭК «Энергоатом», ОП «Южно-Украинская АЭС», 2005. - 53 с.
12. *Емельянов В. С., Рабчун А. В. Область применения диффузионных распределений в задачах надежности // Атомная энергия.* – 1991. – Т. 71, № 1. – С. 28–32.
13. *Стрельников В. П. Новая технология исследования надежности машин и аппаратуры // Математичні машини і системи.* – 2007. – № 3-4. – С. 227–238.

14. Стрельников В. П. О сертификационных испытаниях на надежность // Математичні машини і системи. – 2008. – № 1. – С. 178–184.
15. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление [Вып. 1]: пер. с англ. А. Л. Левшина; под ред. В. Ф. Писаренко / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. — М.: Мир, 1974. – 407 с.
16. Борушко А. П. Квантификация априорного распределения в обоснованиях риска и надежности энергооборудования // Изв. вузов. Энергетика. – 1991. – №7. – С. 97 - 101.
17. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / [К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.]; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 386 с.
18. Емельяненко Е. З. Обоснование экспертного подхода к определению надежности энергетического оборудования АЭС / Е. З. Емельяненко, А. Н. Харабет, О. Е. Зотеев, О. А. Чулкин // Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития технологии, организации ремонта и подготовки ремонтного персонала АЭС» 13–17 сентября 2008 г.: сб. докл. – Одесса: НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – С. 105–112.

**Ю. О. Комаров, В. Ю. Кочнєва**

### **ОЦІНКИ ТРИВАЛОСТІ ДО ПРОВЕДЕННЯ ПЛАНОВОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ КОНЦЕПЦІЇ РЕМОНТУ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ОБЛАДНАННЯ АЕС**

Розроблено модель прогнозування тривалості до проведення планового технічного обслуговування та ремонту обладнання АЕС, що рідко відмовляє, на підставі оцінок гамма-процентного напрацювання до відмови. При цьому враховуються дані по відмовах, тенденція зміни визначальних параметрів технічного стану обладнання та експертна оцінка напрацювання до відмови обладнання.

*Ключові слова:* ремонт за технічним станом, DN-розподіл, параметр технічного стану, напрацювання до відмови, атомна електростанція, фізико-статистичний метод оцінки надійності, байєсівська оцінка, експертна оцінка.

**Yu. A. Komarov, V. Yu. Kochnyeva**

### **ASSESSMENT OF TIME TO SCHEDULED MAINTENANCE AND REPAIR USING CONCEPTION OF RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE OF NPP EQUIPMENT**

There is developed the model to predict a time to the scheduled maintenance and repair for infrequent failures NPP equipment based by assessment of gamma-percentile operation time of failure. Data on failures, trend to change main parameters of the technical condition of equipment and expert assessment of operation time to failure of equipment are taken into account.

*Keywords:* Reliability Centred Maintenance, DN-distribution, main parameter of the technical condition, operation time to failure, nuclear power plant, physico-statistical reliability assessment, Bayesian estimate, expert assessment.

Поступила в редакцію 03.02.11