

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУЗ РЕАКТОРА РБМК-1000 1-го БЛОКА СМОЛЕНСКОЙ АЭС

С.В. Соколов, А.В. Антонов, В.А. Чепурко

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



В работе рассматривается методика статистического оценивания остаточной наработки (остаточного ресурса) для электрооборудования АЭС. Представлена математическая модель расчета данной характеристики надежности для невосстанавливаемых элементов. Приведены результаты вычислений оценки остаточной наработки для элементов электрооборудования подсистем СУЗ Смоленской АЭС. В качестве исходных данных использовалась статистическая информация об отказах оборудования СУЗ реактора РБМК-1000 блока №1 Смоленской АЭС.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ядерной энергетике остро стоит вопрос об оценке и прогнозировании остаточного ресурса оборудования энергоблоков. Основные мощности атомных станций в России были введены в 70–80-х годах и близки к исчерпанию проектного срока эксплуатации, который составляет 25–30 лет. С развитием экономики в стране наблюдается тенденция по увеличению энергетических мощностей. Действия правительства направлены на укрепление отрасли. В частности, в настоящее время ведется строительство нескольких новых энергоблоков на АЭС, но проблема, связанная с окончанием проектных сроков эксплуатации действующих энергоблоков, остается все еще открытой. Из-за нехватки средств продолжаются поиски путей снижения затрат на модернизацию, реконструкцию и введение в эксплуатацию новых мощностей при сохранении высокого уровня безопасности и надежности объектов атомной энергетики. Проводимые исследования по оценке состояния оборудования показывают, что существует возможность продления установленного срока эксплуатации энергоблоков при грамотном проведении профилактических мероприятий и частичной замене оборудования. При этом сохраняются условия поддержания заданного уровня безопасности.

Ресурс и срок службы, будучи показателями долговечности, являются одними из основных понятий теории надежности. Особое место при этом занимает прогнозирование ресурса объектов на стадии эксплуатации. В отличие от стадии проектирования, когда прогнозу подлежит ресурс генеральной совокупности объек-

© С.В. Соколов, А.В. Антонов, В.А. Чепурко, 2007

тов, прогнозирование ресурса на стадии эксплуатации выполняется для конкретных элементов. Оценке подлежит остаточный ресурс (ОР), который определяет возможную продолжительность эксплуатации объекта с данного момента времени до достижения параметром технического состояния его предельного значения.

В данной работе представлены методы статистического оценивания остаточного ресурса, которые позволяют учитывать характер функционирования и обслуживания элементов сложных технических систем.

ОСТАТОЧНАЯ НАРАБОТКА НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

По способности к восстановлению оборудование ЯЭУ можно разделить на две группы: элементы, которые при проявлении отказов заменяются новыми, т.е. являются восстанавливаемыми, и восстанавливаемые элементы, которые в случае отказа ремонтируются и могут быть использованы в дальнейшей эксплуатации.

Один из методов оценки прямого остаточного времени восстанавливаемого оборудования, основанный на вероятностной природе наработки на отказ, представлен в работе [1].

В рассматриваемой модели функционирования оборудование может находиться в двух состояниях – работоспособном и отказа, причем отказавший образец не подлежит ремонту и восстановлению. При этом наработка элемента до отказа X однозначно определяется как время от начала работы до отказа и является случайной величиной, поскольку причины отказов могут зависеть от множества факторов (например, влияние внешних условий, изменения нагрузки) и проявляются неоднозначно.

Остаточной наработкой системы, достигшей возраста t , называется случайная величина X_t , равная времени, в течение которого система не достигнет предельного состояния, с учетом того, что она уже имеет наработку t , т.е.

$$X_t = X - t.$$

Если рассмотреть распределение разности $(X-t)$ при условии $X > t$, то функция распределения величины X_t определяется выражением [1]

$$F_t(x) = P(X_t \leq x) = P(X_t - t \leq x | X > t) = \frac{P(t < X \leq t + x)}{P(X > t)} = \frac{F(t+x) - F(t)}{1 - F(t)}.$$

Тогда соответствующая вероятность безотказной работы (ВБР) равна

$$\bar{F}_t(x) = 1 - F_t(x) = \frac{\bar{F}(t+x)}{\bar{F}(t)}. \quad (1)$$

Величину остаточной наработки можно определить как математическое ожидание случайной величины [2]

$$MX_t = \int_0^{\infty} \frac{\bar{F}(t+x)}{\bar{F}(t)} dx. \quad (2)$$

Таким образом, оценив по наблюдениям функцию распределения наработки до отказа $F(t)$, можно затем оценить остаточный ресурс.

Рассмотрим задачу определения остаточной наработки MX_t , когда имеется информация только о количестве отказов отдельных элементов за определенный период времени, а величины наработки до отказа неизвестны. Основной проблемой для получения такой оценки является недостаток статистической информации для определения функции распределения наработки элементов, что связано с особенностями сбора данных об отказах и спецификой эксплуатируемого оборудования. Технологический анализ статистических данных о функционировании подсистем СУЗ проводится на основании информации об отказах и повреждении-

ях, получаемой из журналов дефектов спецсистем, оперативных журналов и от ремонтного персонала. При этом не проводится классификация неисправностей на отказы и повреждения – для всех выявленных неисправностей используется термин «дефект». При выявлении дефекта персоналом заносится соответствующая запись в журнал дефектов с указанием даты нарушения, названия, непосредственных и коренных причин нарушения и принимаются меры по его устранению. Недостатком такого метода регистрации дефектов является то, что, как правило, указывается только место возникновения неисправности и тип элемента, а не конкретный экземпляр оборудования (например, не фиксируется серийный номер, однозначно идентифицирующий прибор), т.е. отсутствует информация о том, когда каждый конкретный элемент был включен в состав системы, сколько проработал и когда был выведен из эксплуатации. Среди реализовавшихся отказов могут быть скрытые отказы, которые не проявились в процессе эксплуатации и не были зарегистрированы. Часть из этих отказов может быть обнаружена в ходе проведения профилактических и ремонтных мероприятий, и информация о них должна быть занесена в журналы дефектов. При таких особенностях сбора данных не представляется возможным учесть величины наработок до отказа элементов.

Кроме этого, необходимо учесть тот факт, что элементы (приборы, блоки, устройства и т.д.) системы управления и защиты относятся к категории высоконадежного оборудования и функционируют в ограниченном количестве экземпляров. Отказы таких объектов – события редкие. Как следствие, статистические данные об отказах оборудования весьма ограничены. Поэтому нет возможности проводить полномасштабную статистическую обработку имеющейся информации, включающую проверку гипотезы о законе распределения наработки до отказа и оценку параметров закона распределения.

Функции распределения наработки до отказа и статистическая оценка плотности распределения наработки связаны следующим выражением:

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx. \quad (3)$$

Для статистического определения плотности распределения можно воспользоваться информацией о количестве дефектов, выявленных в ходе эксплуатации данного типа оборудования аналогично тому, как поступают для оценки характеристик надежности восстанавливаемых объектов. Поскольку во время отказа одного из неремонтируемых блоков он просто заменяется аналогичным, который имеет точно такие же характеристики, то можно считать, что происходит полное восстановление. При этом моменты отказов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ на оси непрерывного времени образуют поток отказов. Следовательно, можно определить параметр потока отказов $\omega(t)$, который связан с плотностью распределения наработки через уравнение Вольтерра 2-го рода [2]

$$f(t) = \omega(t) - \int_0^t f(\tau) \omega(t - \tau) d\tau. \quad (4)$$

Для оценивания параметра потока отказов применяется гистограммный метод или метод ядерных оценок [3]. Последний метод оценивания обладает сглаживающим эффектом и обеспечивает решение уравнения (4).

Ядерные оценки были предложены в 1948 г. Парзенем и Розенблатом. Идея построения оценок основана на законе больших чисел (ЗБЧ), из которого следует, что среднее арифметическое последовательности N случайных величин с ростом N сходится к математическому ожиданию.

Рассмотрим возможность использования ядерных оценок для определения параметра потока отказов при группированной информации об отказах. Представим период проведения наблюдений за функционированием объекта в виде массива интервалов $\vec{LR} = [(l_1, r_1); (l_2, r_2); \dots; (l_s, r_s)]$, на которых произошло $\vec{v} = (v_1, v_2, \dots, v_s)$ – случайное число отказов, причем $l_{j+1} = r_j$.

Пусть n – общее число отказов, m – количество однотипных объектов, формирующих данный поток отказов. Как известно, для одного потока отказов математическое ожидание числа отказов до момента времени t или «ведущая функция» потока отказов может быть представлена следующим образом:

$$\Omega(t) = Mn(t).$$

При наличии группированной информации об отказах существует гистограммная оценка

$$\hat{\Omega}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^s v_i H(t - l_i), \quad (5)$$

где $H(x)$ – функция Хэвисайда.

Если функцию $H(x)$ заменить непрерывной функцией $G(x/h)$, являющейся функцией распределения центрированной случайной величины с отклонением пропорциональным h , то в результате можно получить непрерывную функцию

$$\hat{\Omega}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^s v_i G\left(\frac{t - l_i}{h}\right). \quad (6)$$

Для достижения сглаживающего эффекта в расчетах целесообразно использовать Гауссовское ядро

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (7)$$

а параметр локальности h , как величину, приближенно равную среднеквадратическому отклонению случайной величины τ_i , необходимо брать переменным $h(i) = \sigma \sqrt{i}$, где $\sigma = \sqrt{DX}$.

Аналогом ядерной оценки параметра потока отказов будет

$$\hat{\omega}(t; h) = \sum_{i=1}^s \frac{v_i}{m(r_i - l_i)} \left[G\left(\frac{t - l_i}{h}\right) - G\left(\frac{t - r_i}{h}\right) \right]. \quad (8)$$

Таким образом, имея достаточный статистический материал, можно оценить плотность распределения наработки до отказа, решая уравнение (4), найти функцию распределения наработки $F(t)$ (3), а затем получить временную зависимость остаточного ресурса времени от безотказной работы элемента $\bar{F}(t)$ по формуле (2).

В качестве примера рассмотрим применение данного метода для оценки остаточной наработки блоков питания внутризонных триаксиальных камер КТВ-17 (БП.119) – одного из элементов, входящих в состав схемы локальной аварийной защиты (ЛАЗ) СУЗ реактора РБМК блока № 1 Смоленской АЭС. Статистика дефектов для этого элемента в период с 1990 по 2005 гг. представлена в табл. 1.

Всего в состав СУЗ входит $m = 30$ элементов БП.119: 24 в составе изделия и 6 в составе запасных изделий и приборов (ЗИП).

Используя формулу (8), можно получить ядерную оценку параметра потока отказов (см. рис. 1).

Далее, решая уравнение Вольтерра 2-го рода (4), вычислим плотность распределения наработки до отказа для данного типа оборудования, зная которую мож-

Таблица 1

**Статистика дефектов устройств
БП.119 СУЗ реактора РБМК-1000 блока №1
СмАЭС**

Год	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Дефекты, v_i	2	3	1	3	1	0	2	0
Год	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Дефекты, v_i	0	3	0	1	1	2	0	0

но найти функцию распределения наработки до отказа (3) и соответственно ВБР БП.119 (рис. 2).

Теперь можно вычислить математическое ожидание остаточной наработки на отказ (2), функциональная зависимость которой представлена на рис. 3.

Расчеты показывают, что величина остаточной наработки для БП.119 составляет на 15-й год эксплуатации 1,9 года.

По графику для зависимости остаточной наработки MX_i (см. рис. 3) видно, что имеется тенденция уменьшения величины остаточной наработки, близкая к линейной зависимости. Для полученной оценки можно построить тренд (пунктирная линия) и по нему спрогнозировать поведение остаточной наработки. Результаты расчетов показывают, что элементы БП.119 сохраняют запас ресурса в течение 15 лет при условии проведения мероприятий по управлению сроком службы составных частей электрооборудования СУЗ и всей СУЗ в целом.

Аналогичные оценочные расчеты остаточного ресурса были выполнены и для других элементов электрооборудования СУЗ, комплектующих каналы аварийной защиты. Расчетные значения остаточной наработки для нескольких из них при $t=15$ лет приведены в табл. 2.

Результаты расчетов показывают, что наименьшие значения остаточной наработки имеют следующие элементы: усилитель защиты по мощности УЗМ (2,9 г.), импульсная камера деления КНТ 31 (3,5 г.), блок пи-

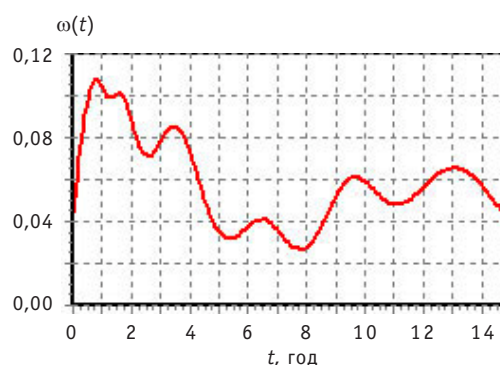


Рис. 1. Ядерная оценка параметра потока отказов БП.119

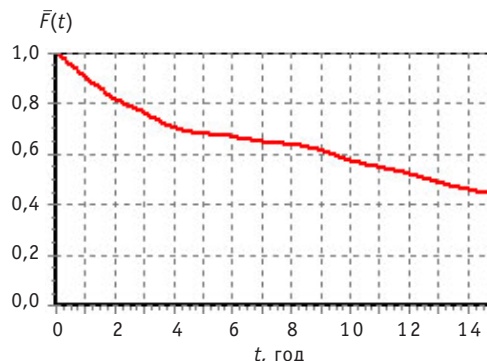


Рис. 2. Результаты оценивания ВБР БП.119

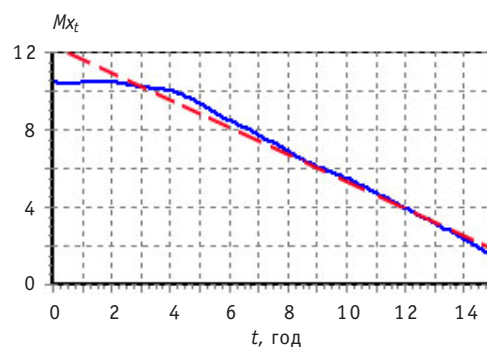


Рис. 3. Зависимость математического ожидания остаточной наработки от времени для БП.119

Таблица 2

**Остаточная наработка элементов
невосстанавливаемого оборудования СУЗ
при достижении возраста $t=15$ лет**

Наименование	Условное сокращение	Остаточная наработка, год
Усилитель защиты по мощности	УЗМ	2,9
Усилитель сигнала отклонения	УСО	14,5
Импульсная камера деления	КНТ 31	3,5
Блок питания	БП.119	1,4
Цифровой вычислитель реактивности	ЦВР.9	2
Камера нейтронная компенсационная	КНК.56	16,7
Камера нейтронная компенсационная	КНК.53	1,9
Усилитель АЗ по скорости с выносным каскадом	УЗС.13	24,4
Блок питания камер деления	БП.30М	20,4

тания БП.119 (1,4 г.), цифровой вычислитель реактивности ЦВР.9 (2 г.). Кроме этого выявлен ряд элементов, для которых момент исчерпания ресурса наступает раньше достижения пятнадцатилетнего возраста. Это радиальные внутризоновые датчики ЛАР-ЛАЗ КВТ17.000 (10 лет), измеритель скорости счета с выносным каскадом ИСС.3М (8 лет), корректор уставки КрУ.7 (8,7 г.), блок синхронного перемещения БСП (6 лет). Этот результат объясняется резким увеличением отказов с определенного момента времени относительно количества экземпляров данного типа оборудования, входящих в состав СУЗ.

В заключение необходимо отметить, что результаты расчетов являются оценочными. К ним надо относиться осторожно, поскольку они получены на основании статистической информации малого объема. Результаты показывают, что все рассмотренные совокупности имеют запас ресурса, достаточный для продолжения эксплуатации. При поступлении новой информации результаты будут изменяться. Поэтому работы по анализу характеристик надежности и оценке остаточного ресурса необходимо проводить периодически, например, ежегодно, и особенно после проведения любых работ по модернизации, реконструкции и усовершенствованию оборудования СУЗ.

Литература

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. – М.: Радио и связь, 1988. – 357 с.
2. Чепурко В.А. Ядерная оценка параметра потока отказов. Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем/Сборник научных трудов №15. – Обнинск: ИАТЭ, 2004. – 80 с.
3. Антонов А. В. Системный анализ (2-е изд.). – М.: Высшая школа, 2006. – 454 с.

Поступила в редакцию 2.05.2007

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.546

Example of Application Markovs Process with Incomes at Acceptance of Engineering Decisions Concerning Objects of Nuclear Technologies in Conditions of Uncertainty on an Example of Object «Shelter» Chernobyl NPP\ Yu. V. Volkov, A. V. Sobolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 1 illustration. – References – 4 titles.

Application of markovs process with incomes for search of optimum strategy of «behavior» in conditions of uncertainty is considered. The technique of construction adequate markov is offered to model of process for objects of nuclear technologies, on an example of object «Shelter» Chernobyl NPP.

УДК 621.039.58

NPP Equipment Life Time Prediction Methods\ O. M. Gulina, N. L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 4 illustrations. – References – 4 titles.

Its shown that problem of NPP equipment life time prediction is based on the estimation of moment the parameter observed or calculated achieves limited level. There are considered some mathematical models for different kinds of degradation processes and information obtained. Some results are presented.

УДК 621.039.58

Method for Processing of Statistical Data on Equipment Reliability During NPP Operation\ S. P. Saakian, V. A. Ostreikovskiy, V. A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 6 illustrations. – References – 3 titles.

The records of failures during NPP operation are one of the highest importance for determination of NPP equipment reliability performance. These records however due to objective and subjective reasons are no more than the homogeneous stream of events, the fact that brings difficulties into the process of calculating the equipment reliability characteristics. The given paper proposes the new methods of data handling for heterogeneous stream of statistical data on equipment failures which gives the possibility of getting more truthful information about NPP equipment and systems reliability performance.

УДК 621.039.58

The Residual Life Time Estimation for the Nonrestorable Elements of the RBMK-1000 PCS Electrical Equipment of the Smolensk NPP's First Power Unit\ S. V. Sokolov, A. V. Antonov, V. A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 3 titles.

In the paper the statistical methods of residual life time estimation for nuclear power plants' (NPP) electrical equipment are considered. The mathematical model of the reliability characteristics calculation for the nonrestorable elements is given. The results of the residual life time calculations for elements of the protection control system's electrical equipment are represented in the paper. As a basis for calculation the statistical data about failures of the RBMK-1000 protection control system equipment of the Smolensk NPP's first power unit were used.

УДК 621.039.5

Application of PSA for NPPs with VVER-type Reactors of New Generation under Design\ G. V. Tokmachev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages. – References – 20 titles.

The paper discusses the use of probabilistic safety assessments (PSA) to support design evaluation for a new generation of advanced nuclear power plants with VVER-type reactors. The concept of the new VVER plants is briefly described. The design solutions to improve safety, which are based on in-depth principles and results of PSAs performed for operating VVER plants, are characterized. The evaluation whether the advanced VVER plant design meets deterministic principles is performed at a qualitative level using the PSA results. The approach to quantitative assessment of safety of the NPPs in design is described that is based on the PSA results.

УДК 621.039.524

Technical and Numerical Substantiation of Procedures Preventing Accident at VVER-1000 Based NPP\ A. N. Shkarovskiy, V. I. Aksenov, A. P. Kolevatykh, N. P. Serdun, A. A. Roslyakov; Editorial board of journal «Izvestia