

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ОБ ОТКАЗАХ ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ПОТОКА СОБЫТИЙ

А.В. Антонов, В.А. Чепурко

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок 1.*



Техническое оборудование в ходе эксплуатации проходит три стадии с определенными тенденциями поведения параметра потока отказов (ППО). При нормальной эксплуатации значение ППО приблизительно постоянно, и показатели надежности рассчитываются классическими способами. На этапе приработки ППО убывает со временем, а на этапе старения возрастает. Поэтому наработки между двумя последовательно происшедшими отказами на этапах приработки и старения не являются одинаково распределенными случайными величинами, а поток отказов нельзя считать рекуррентным. При проведении расчетов характеристик надежности необходимо принимать во внимание неоднородность потока отказов во времени. В работе описывается метод оценивания показателей надежности оборудования АЭС, позволяющий учитывать возможную неоднородность потока отказов. Отмечена специфика поступающих статистических данных об отказах. Описано применение модели нормализующей функции потока для расчета требуемых показателей надежности. Приведен практический пример анализа данных об отказах элемента КНК-56 СУЗ Билибинской АЭС.

Ключевые слова: поток отказов, неоднородный во времени процесс, нормализующая функция потока, ведущая функция потока, параметр потока отказов.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе функционирования техническое оборудование проходит три стадии, для каждой из которых характерна определенная тенденция поведения параметра потока отказов (ППО). Например, в период нормальной эксплуатации значение ППО является приблизительно постоянной величиной. В этом случае предполагается однородность во времени процесса функционирования оборудования, и показатели надежности рассчитываются классическими способами. На этапе приработки ППО убывает со временем, на этапе старения возрастает (могут иметь место и более сложные зависимости). Следовательно, на этапах приработки и старения наработки между двумя последовательно происшедшими отказами не являются одинаково распределенными случайными величинами, а поток отказов нельзя считать рекуррентным [1 – 4]. Ввиду этого применять классические способы рас-

© **А.В. Антонов, В.А. Чепурко, 2016**

чета характеристик надежности на данных этапах некорректно. При проведении расчетов характеристик надежности необходимо принимать во внимание неоднородность (во времени) потока отказов. Таким образом, задача состоит в разработке методики оценивания показателей надежности в ситуации, когда процесс восстановления является неоднородным во времени, т.е. его вероятностные показатели меняются с течением времени. Такая методика позволит получать более адекватные оценки показателей надежности.

Проблемы неоднородности потока отказов касаются многие авторы. В работе [2] изложено современное состояние математической теории надежности. К наиболее важным, затронутым в пособии, вопросам следует отнести исследование различных моделей учета старения, процессов деградации, моделей ускоренных испытаний и т.д. В монографии [4] выполнен обзор и проведены исследования современного состояния теории процессов восстановления. В [5] описаны некоторые модели неоднородных процессов, модели учета старения в работе оборудования. Монография [6] посвящена исследованию различных моделей неоднородных процессов восстановления, таких как неоднородные пуассоновские процессы, гамма-процессы, впервые появившиеся в работе [7], процессы восстановления с трендом, геометрические процессы, процессы Кижима и процессы, описываемые моделью нормализующей функции потока (НФП). В работах [8 – 12] представлены новые результаты для геометрических процессов, которые являются одной из разновидностей неоднородных процессов. Модели неоднородных точечных процессов Кижима-Сумиты позволяют, в частности, смоделировать процесс неполного восстановления [13, 14]. Модель процессов восстановления с трендом (TRP) достаточно нова и наиболее близка к модели НФП. Она впервые появилась в [15]. Работы [16 – 19] посвящены разработке и исследованию методов оценки показателей надежности в условиях неоднородных процессов восстановления, подчиняющихся модели НФП.

Анализ перечисленных источников показал, что наиболее развитыми и обладающими необходимой полнотой возможностями обладают неоднородные пуассоновские процессы и модель НФП. Более того, оказалось, что неоднородные пуассоновские процессы при некоторых условиях являются частным случаем модели НФП. Поэтому именно последняя модель неоднородных процессов восстановления легла в основу методики оценивания показателей надежности в условиях имеющейся неоднородности (см. [20]).

Цель работы состоит в описании методики оценки показателей надежности оборудования АЭС, позволяющей учесть возможную неоднородность потока отказов и демонстрации результатов применения методики на реальных данных, полученных из опыта эксплуатации.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Основными источниками информации о функционировании объектов энергоблоков АЭС являются «журнал дефектов», паспорта и технические описания на оборудование, справки о техническом состоянии объектов и ряд других документов.

Существующая на АЭС процедура сбора статистической информации об отказах позволяет выявить дату обнаружения отказа объекта из совокупности однотипных элементов и причину, по которой произошел отказ. При этом чаще всего отсутствует возможность идентификации отказавшего объекта. Предположим, что статистическая информация, поступающая для анализа, представлена в следующем виде: известно количество отказов элементов v_i из совокупности однотипных объектов заданного объема m , реализовавшихся на i -м интервале наблюдения. После очередного отказа производится ремонт данной единицы оборудования. Время восстановления объекта

предполагается пренебрежимо малым по сравнению с наработками до отказа, отказавшие объекты восстанавливаются и возвращаются в систему для последующей эксплуатации. Таким образом, мы имеем группированный поток отказов. Также будем предполагать, что частоты отказов ν_i неодинаково распределены и есть определенная закономерность в изменении их закона распределения по мере изменения интервала наблюдения (индекса) i .

МОДЕЛЬ НОРМАЛИЗУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ПОТОКА

Рассмотрим математическую модель [2, 6 – 8], учитывающую неоднородность потоков событий и позволяющую определять показатели надежности элементов, при условии, что вероятностные характеристики процесса изменяются во времени. В этой модели реальный неоднородный поток отказов является отображением однородного потока событий с помощью монотонного преобразования $\Psi(x)$, называемого нормализующей функцией потока (НФП).

Нормализующая функция потока устанавливает связь между гипотетическим однородным потоком отказов и реальным потоком. Используя обратное преобразование реального потока, получаем примерно однородный поток событий. В реальном потоке могут присутствовать места сгущений (разрежений), когда на некотором временном интервале число событий будет существенно больше (соответственно меньше) числа событий на соседних близких по длительности интервалах.

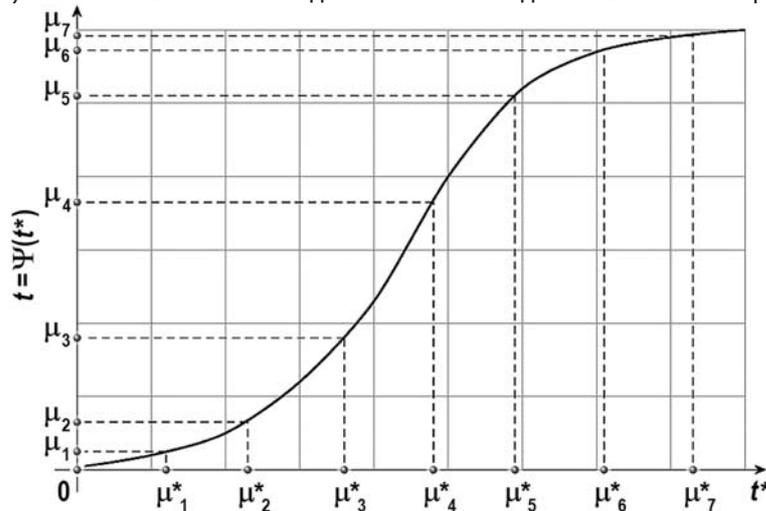


Рис. 1. Преобразование однородного потока в неоднородный. Модель нормализующей функции потока

На рисунке 1 изображено преобразование однородного потока событий в произвольный поток с помощью функции $\Psi(t^*)$. События однородного и неоднородного потоков событий отображены на оси абсцисс и оси ординат соответственно.

При таком поведении потока отказов будет происходить изменение с течением времени от цикла к циклу закона распределения наработки до отказа. Под циклом понимается работа исследуемого элемента системы от начала его функционирования (или установки после ремонта) до отказа. После каждого ремонта и установки в систему начинается новый цикл работы элемента.

Перейдем к формальному описанию сути модели нормализующей функции потока.

Рассмотрим поток событий, в котором под событием понимается либо отказ некоторого элемента (индекс 0), либо его восстановление (индекс 1) (рис. 2). Время

работы до отказа ξ^0 и время восстановления ξ^1 – случайные величины. Пусть ξ_i^0 и ξ_i^1 независимы. Будем считать, что $\xi_i^1 = 0$, т.е. восстановление происходит мгновенно, кроме этого опустим верхний индекс у времен отказов, т.е. $\xi_i^0 = \xi_i$.

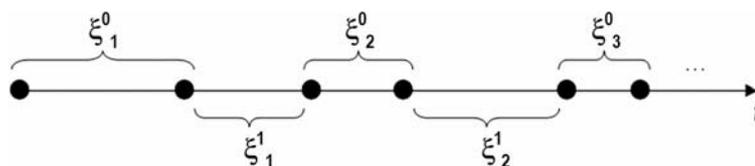


Рис. 2. Общий поток отказов-восстановлений

Основной идеей модели нормализующей функции потока (НФП) является построение непрерывно-дифференцируемого строго монотонно возрастающего отображения Ψ абстрактного рекуррентного потока событий в реальный поток событий [3, 8, 9]. Абстрактный поток будет иметь размерность функции $\Psi^{-1}(t)$, где t – время. Предположим вначале, что восстановление системы происходит мгновенно.

Пусть μ_k – момент наступления k -го события абстрактного однородного потока, т.е. $\mu_k^* = \sum_{i=1}^k \xi_i$ ($i = 1, \dots, k$), где ξ_i – интервал между двумя последовательными событиями однородного потока. В случае однородного (рекуррентного) потока отказов все ξ_i – независимые одинаково распределенные случайные величины (н.о.р.с.в.). Моменты реального потока событий будут определяться формулой

$$\mu_n = \Psi \left(\sum_{i=1}^n \xi_i \right) = \Psi(\mu_n^*); \quad n = 1, 2, \dots; \quad \mu_0 = 0,$$

где $\Psi(\cdot)$ – некоторая непрерывно-дифференцируемая строго монотонно возрастающая на $[0; \infty)$ функция, причем $\Psi(0) = 0$. Тогда i -я наработка между отказами

$$\zeta_i = \mu_i - \mu_{i-1} = \Psi(\mu_i^*) - \Psi(\mu_{i-1}^*).$$

Понятно, что в этом случае ζ_1, ζ_2, \dots будут зависимы, если только $\Psi(x) \neq \text{const } x$. Величину ζ_i назовем продолжительностью цикла работы системы. Под циклом работоспособности будем понимать временной промежуток между двумя последовательными отказами системы. По сути это будет наработка между отказами. Одной из основных проблем является качественная оценка функции $\Psi(\cdot)$. Как оказалось, эту проблему можно решить стандартным способом.

МЕТОД ОЦЕНКИ НОРМАЛИЗУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ПОТОКА

Как было показано в [2, 6 – 8], нормализующая функция потока (НФП) $\Psi(t)$ взаимно однозначно определяется ведущей функцией потока (ВФП) $\Omega(t)$. Характер взаимосвязи функций следующий: $\Omega(t) \sim (m/E\xi) \cdot \Psi^{-1}(t)$, где m – количество однотипных объектов, находящихся под наблюдением; $E\xi$ – математическое ожидание наработки абстрактного однородного потока отказов.

Задача состоит в корректном подборе модели $\Psi^{-1}(t)$ на основании ВФП и оценки параметров модели методом наименьших квадратов (МНК).

Рассмотрим пример оценивания обратной НФП. Для примера рассмотрим статистику, полученную из опыта эксплуатации элемента КНК-56, работающего в составе штатного оборудования энергоблока ЭГП-6 Билибинской АЭС. Статистическая информация об отказах дана в табл. 1.

Построим непараметрическую оценку нормализованной ВФП обычным методом, основанным на определении отношения накопленной частоты отказов $\nu(t)$ к данному моменту времени t к общему числу отказов $\sum \nu_i$ ($i = 1, \dots, T$) за все время наблюдений:

$$\Omega_{\text{оц}}(t) = v(t) / \sum_{i=1}^T v_i.$$

Визуальный анализ непараметрической оценки ведущей функции потока (точки на рис. 3) позволил предложить вид зависимости для обратной НФП

$$\Psi_{\text{оц}}^{-1}(x) = \begin{cases} a(1 - \exp\{-l \cdot x^b\}), & x \leq T; \\ Cx, & x > T. \end{cases}$$

Параметры модели определялись методом наименьших квадратов, и их значения получились равными $l = 0.011$, $a = 3.199$, $b = 2.560$, $T = 37$, $C = 0.127$. На рисунке 3а представлен график поведения обратной НФП (тренд, сплошная линия) и нормализованная (выпрямленная) ВФП (оценка ВФП, рассчитанные значения отмечены точками, рис. 3б).

Таблица 1

Статистическая информация об отказах элементов КНК-56, распределенная по годам эксплуатации

Год	№ года	Частота	Год	№ года	Частота	Год	№ года	Частота
1974	0	1	1988	14	1	2002	28	2
1975	1	0	1989	15	2	2003	29	0
1976	2	1	1990	16	0	2004	30	0
1977	3	1	1991	17	3	2005	31	0
1978	4	8	1992	18	3	2006	32	0
1979	5	7	1993	19	1	2007	33	0
1980	6	0	1994	20	1	2008	34	0
1981	7	5	1995	21	2	2009	35	0
1982	8	2	1996	22	2	2010	36	0
1983	9	3	1997	23	0	2011	37	2
1984	10	4	1998	24	1	2012	38	2
1985	11	4	1999	25	1	2013	39	0
1986	12	9	2000	26	0	2014	40	1
1987	13	11	2001	27	0			

ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПОТОКА ОТКАЗОВ

Суть данного этапа сводится к преобразованию неоднородного потока отказов в абстрактный однородный поток с использованием соотношения $\mu^*_i = \Psi^{-1}(\mu_i)$, $i = 1, 2, \dots, T$; при этом μ^*_i имеет размерность «абстрактного времени», а μ_i – размерность реального времени на оси наработок. Таким образом, к моменту времени μ_i на оси абстрактного потока произойдет количество отказов, соответствующее моменту на оси реального μ_i , $i = 1, 2, \dots, T$.

После преобразования временной координаты построим нормализованную ВФП для абстрактного времени. На рисунке 3б представлен график поведения нормализованной ведущей функции потока $\Omega_{\text{оц}}(t)$ после преобразования оси времени.

В этом случае получен однородный выпрямленный поток отказов. На рисунке также приведена аппроксимирующая функция, представленная в виде линейного тренда, показано значение коэффициента детерминации R^2 , являющегося квадратом

обычного коэффициента корреляции. Чем ближе этот коэффициент к единице, тем больше доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью.

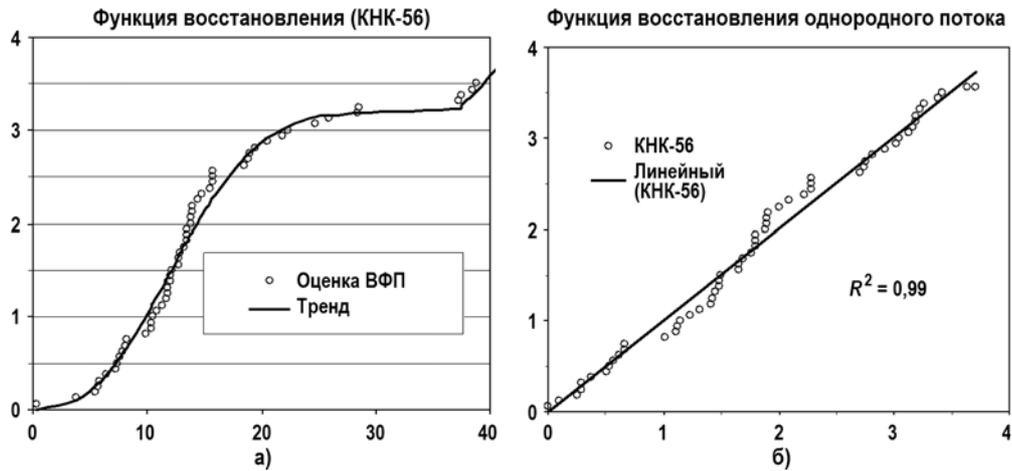


Рис. 3. а) Тренд НФП $\Psi^{-1}(t)$ и оценка ВФП; б) нормализованная ВФП однородного потока

Результаты, представленные на рис. 3б, показывают, что выпрямленный поток отказов имеет высокий уровень согласия с линейной моделью.

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРА ВЫПРЯМЛЕННОГО ПОТОКА ОТКАЗОВ

Оценка параметра выпрямленного потока событий по группированным данным может быть получена следующими методами (см. [2, 6]).

Гистограммный метод. Оценка определяется по формуле

$$\omega_{\text{г.оц.}}(t) = \frac{v(t \in \Delta)}{m \cdot \Delta},$$

где $v(t \in \Delta)$ – число отказов, зафиксированное в интервал наблюдения i на оси абстрактного времени; m – количество однотипных объектов; $\Delta = t_i - t_{i-1}$ – длина интервала, на котором реализовалось количество отказов v_i .

Ядерный метод. Ядерная оценка определяется по формуле

$$\omega_{\text{я.оц.}}(t, h) = \sum_{i=1}^s \frac{v_i}{m \cdot (r_i - l_i)} \cdot \left[G\left(\frac{t - l_i}{h}\right) - G\left(\frac{t - r_i}{h}\right) \right] + \varepsilon(t),$$

где t – время на оси абстрактных наработок; h ($h > 0$) – параметр сглаживания; v_i – частота отказов; l_i и r_i – левая и правая границы интервала наблюдений; $\varepsilon(x)$ – систематическая ошибка, определяемая по формуле [2]

$$\varepsilon(t, n, m) \approx \frac{1}{2a} \operatorname{erfc}\left(\frac{aN - t}{\sqrt{2N\sigma}}\right) + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi a}} \frac{\sqrt{N}}{aN + t} \exp\left\{-\frac{(aN - t)^2}{2n\sigma^2}\right\};$$

$G(x)$ – ядро гауссовского типа:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-u^2/2} du.$$

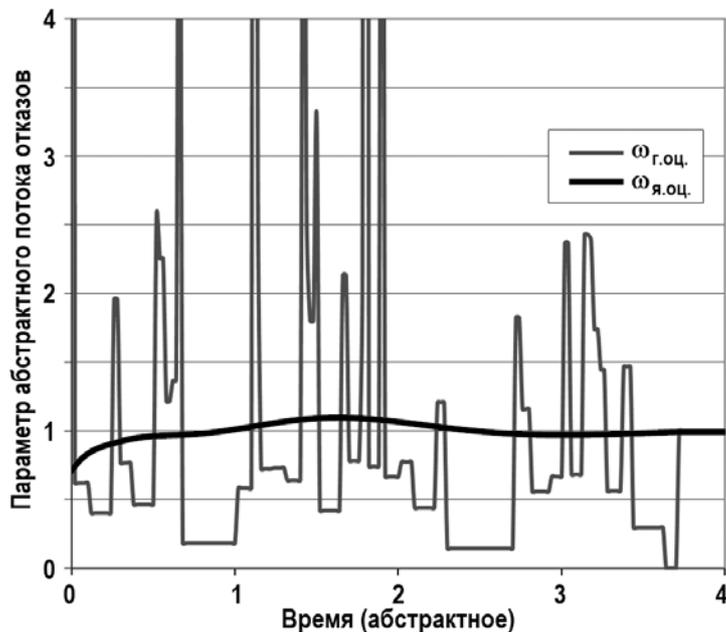


Рис. 4. Гистограммная $\omega_{г.оц.}(t)$ и ядерная (сглаженная) $\omega_{я.оц.}(t, h)$ оценки выпрямленного потока отказов

На рисунке 4 представлены оценки, рассчитанные гистограммным $\omega_{г.оц.}(t)$ и ядерным $\omega_{я.оц.}(t, h)$ методами, определенные для рассматриваемого статистического материала.

Прямая подстановка гистограммной оценки параметра потока отказов (ППО) в уравнение восстановления может привести к получению на некоторых временных интервалах отрицательной плотности распределения, что противоречит свойствам плотности распределения. Поэтому для выполнения дальнейших расчетов рекомендуется использовать ядерную оценку ППО, позволяющую получить решение уравнения восстановления, обладающее необходимыми свойствами плотности распределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен подход анализа статистических данных об отказах для оценивания показателей надежности оборудования АЭС, позволяющий учесть возможную неоднородность потока событий. Приведены примеры анализа данных на каждом этапе исследования на основании статистической информации об отказах элемента КНК-56 системы управления и защиты (СУЗ) энергоблока ЭГП-6 Билибинской АЭС, полученной из опыта эксплуатации. По представленному алгоритму выполнены расчеты для большой группы элементов СУЗ реактора ЭГП-6 на основании информации за длительный период их функционирования (с 1974 по 2014 гг.). Планируется дальнейшее изложение методики расчета показателей надежности в условиях неоднородного потока отказов, включающее в себя оценку распределения времени длительности цикла, оценку прямого и обратного остаточного времени («перескока» и «недоскока»), оценку ресурсных характеристик и т.п.

Литература

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. / Пер. с нем. - М.: Радио и Связь. - 1988. - 392 с.
2. Антонов А.В., Никулин М.С., Никулин А.М., Чепурко В.А. Теория надежности. Статистические модели. / Учебное пособие. - М.: НИЦ ИНФРА-М. - 2015. - 576 с.

3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике Основные понятия. Термины и определения.
4. Daley D.J., Vere-Jones D. An introduction to the theory of point processes: Volume 1: Elementary theory and methods. – Verlag New York - Berlin – Heidelberg: Springer, 2003. – 469 p.
5. Finkelstein M. Failure rate modelling for reliability and risk. – Verlag. London Limited: Springer, 2008. – 290 p.
6. Чепурко В.А., Чепурко С.В. Модели неоднородных потоков в теории восстановления. / Монография. – Обнинск: ИАТЭ, 2012. – 164 с.
7. Berman M. Inhomogeneous and modulated gamma processes. // Biometrika. – 1981. – Vol. 68. – No. 1. – PP. 143-152.
8. Саенко Н.Б. Учет неполноты восстановления элементов при расчете надежности систем. // Известия вузов. Приборостроение. – 1994. – Т. 37. – № 11-12. – С. 76-79.
9. Antonov A., Chepurko V. On some characteristics of geometric processes // Journal of Reliability and Statistical Studies; ISSN (Print): 0974-8024, (Online): 2229-5666. – 2012. – Vol. 5, Issue Special. – PP. 1-14.
10. Lam Y. Geometric processes and replacement problem // Acta Mathematicae Applicatae Sinica. English Series. – 1988. - Vol. 4. – No. 4. – PP. 366-377.
11. Антонов А.В., Поляков А.А., Чепурко В.А. Оценка параметров модели геометрического процесса методом максимального правдоподобия // Надежность. – 2012. – № 3(42). – С. 33-41.
12. Чепурко В.А., Чепурко С.В. Об одном методе обнаружения неоднородности потока отказов оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 65-73.
13. Kijima M., Sumita N. A useful generalization of renewal theory: Counting process governed by non-negative markovian increments // Journal of Applied Probability. – 1986. – Vol. 23. – PP. 71-88.
14. Чумаков И.А., Антонов А.В., Чепурко В.А. Некоторые свойства моделей неполного восстановления Кижима // Надежность. – 2015. – № 3(54). – С. 3-15.
15. Lindqvist B.H. The trend renewal process, a useful model for repairable systems / Tillforlitlighet i reparerbara system. Society of Reliability Engineers, Scandinavian Chapter, Annual Conference, Malino, Sweden. – 1993.
16. Antonov A., Belova K., Chepurko V. On one method of reliability coefficients calculation for objects in non-homogeneous event flows // Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability. Applications to Medicine, Finance, and Quality Control / Ed. By V.V. Rykov, N. Balakrishnan, M.S. Nikulin. – Statistics for Industry and Technology. Springer, 2010. – PP. 51-67.
17. Antonov A.V., Chepurko V.A. The account of ageing effect in operation of the equipment at the stage of nuclear power plant reliability and safety analysis. / Second International Conference on Accelerated Life Testing in Reliability and Quality Control «ALT 2008» (University V. Segalen. Bordeaux 2, France). – PP. 35-39.
18. Антонов А.В., Иванова К.А., Чепурко В.А. Статистический анализ данных об отказах оборудования АЭС с учетом неоднородности потока отказов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 75-87.
19. Антонов А.В., Чепурко В.А. Оценка показателей надежности систем стареющего типа на примере систем ядерно-энергетической отрасли // Надежность. – 2010. – № 1(33). – С. 18-29.
20. Вероятностный анализ показателей надежности остаточного ресурса оборудования подсистем СУЗ Билибинской АЭС на основе информации об отказах за период 1974-2014г. / Моисеев И.Ф., Антонов А.В., Никулин М.С., Никулин А.М., Чепурко В.А. Технический отчет. – М.: ВНИИАЭС. – 2015. – 164 с.

Поступила в редакцию 25.03.2016 г.

Авторы

Антонов Александр Владимирович, декан факультета кибернетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ, профессор, доктор техн. наук

E-mail: antonov@iate.obninsk.ru

Чепурко Валерий Анатольевич, доцент, канд. физ.-мат. наук

E-mail: chepurko@iate.obninsk.ru

STATISTICAL ANALYSIS OF THE NUCLEAR POWER PLANT EQUIPMENT FAILURE DATA IN NON-HOMOGENEOUS FAILURE FLOW

Antonov A.V., Chepurko V.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

In the paper systems with the operable state and the down state are considered. Functioning process of technical equipment can be divided into three operating periods. There are a burn-in period, a normal life or useful life period and an ageing period. Reliability coefficients of equipment and methods for their calculating depend on the operating period. The failure flow parameter is relatively constant on the useful life period. But we should take into consideration the burn-in period with a decreasing failure flow parameter and the ageing period that exhibits an increasing failure flow parameter. In general more complex time dependences can take place. Also we can assume that the repair flow consists of the «non-homogeneous» (concerning a distribution) repair time. For instance a mean time to repair can gradually rise since an equipment ages and a fault location time and a repair complication rise. The aim of this paper is to develop the new mathematical model that can take into account possible «distortions» of an event flows and allow to calculate reliability coefficients of the systems, which probabilistic characteristics can vary in time. The new mathematical model can take into account possible «distortions» of an event flows by means of a normalizing flow function Ψ . The normalizing flow function model is presented.

Examples of data analysis at each stage of the study on the basis of statistical information about failures element KNK-56 control and protection system (CPS) unit EGP-6 Bilibino derived from operating experience were performed. On presented algorithm were calculated reliability coefficients for a large group of elements of the reactor control rods EGP-6 on the basis of information over a long period of operation (from 1974 to 2014).

Key words: failure flow, intensity function, non-homogeneous event flow, normalizing flow function model (NFF), abstract homogeneous flow, counting process, aging system, juvenescent system, renewal equation.

REFERENCES

1. Bayhelt F., Franken P. The Reliability and Maintenance. Mathematical approach: first with it. Moscow. Radio i svyaz' Publ., 1988. 392 pp. (in Russian).
2. Antonov A.V., Nikulin M.S., Nikulin A.M., Chepurko V.A. Theory of reliability. Statistical Models. Moscow. NIC INFRA-M Publ., 2015. 576 p. (in Russian).
3. GOST 27.002-89 Industrial product dependability. General concepts Terms and Definitions. (in Russian).
4. Daley D.J., Vere-Jones D. An introduction to the theory of point processes: Vol. 1: Elementary theory and methods. Verlag New York - Berlin - Heidelberg: Springer, 2003. 469 p.
5. Finkelstein M. Failure rate modelling for reliability and risk. Verlag London Limited: Springer, 2008. 290 p.
6. Chepurko V.A. Chepurko S.V. Models of nonhomogeneous flows in the renewal theory. Obninsk. INPE Publ., 2012, 164 p. (in Russian)
7. Berman M. Inhomogeneous and modulated gamma processes. *Biometrika*. 1981, v. 68, no. 1, pp. 143-152.

8. Saenko N.B. Accounting for incomplete recovery of elements in the calculation of the reliability of systems. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 1994, v. 37, no. 11-12, pp. 76-79 (in Russian).
9. Antonov A., Chepurko V. On some characteristics of geometric processes //Journal of Reliability and Statistical Studies; ISSN (Print): 0974-8024, (Online):2229-5666, 2012, v. 5, iss. spec., pp. 1-14.
10. Lam Y. Geometric processes and replacement problem. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica. English Series*. 1988, v. 4, no. 4, pp. 366-377.
11. Antonov A., Polyakov A., Chepurko V. Estimation of the model parameters of the geometric process by the method of maximum likelihood. *Nadyozhnost'*. 2012, no. 3 (42), pp. 33-41 (in Russian).
12. Chepurko V. Chepurko S. A method for the detection failure rate heterogeneity equipment NPP. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 2, pp. 65-73 (in Russian).
13. Kijima M., Sumita N. A useful generalization of renewal theory: Counting process governed by non-negative markovian increments. *Journal of Applied Probability*. 1986, v. 23, pp. 71-88.
14. Chumakov I., Antonov A., Chepurko V. Some properties of incomplete recovery Kizhima models. *Nadyozhnost'*. 2015, no. 3 (54), pp. 3-15 (in Russian).
15. Lindqvist B.H. The trend renewal process, a useful model for repairable systems. / Tillforlitlighet i reparerbara system. Society of Reliability Engineers, Scandinavian Chapter, Annual Conference, Malino, Sweden. 1993.
16. Antonov A., Belova K., Chepurko V. On one method of reliability coefficients calculation for objects in non-homogeneous event flows / Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability. Applications to Medicine, Finance, and Quality Control / Ed. By V.V. Rykov, N. Balakrishnan, M.S. Nikulin. –Statistics for Industry and Technology. Springer, 2010, pp. 51-67.
17. Antonov A.V., Chepurko V.A. The account of ageing effect in operation of the equipment at the stage of nuclear power plant reliability and safety analysis. / Second International Conference on Accelerated life testing in reliability and Quality control «ALT 2008» (University V. Segalen. Bordeaux 2, France). pp. 35-39.
18. Antonov A., Ivanova K., Chepurko V. Statistical analysis of the failures of nuclear power equipments, taking into account the failure rate heterogeneity. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2011, no. 2, pp. 75-87 (in Russian).
19. Antonov A.V., Chepurko V.A. Estimation of the reliability of the aging systems like the example of the nuclear power industry systems. *Nadezhnost'*. 2010, no. 1(33), pp. 18-29 (in Russian).
20. Probabilistic analysis of the residual resource of reliability indicators subsystems equipment CPS Bilibino on the basis of information about failures in the period 1974-2014. / Moiseev I.F., Antonov A.V., Nikulin M.S., Nikulin A.M., Chepurko V.A. Technical Report. Moscow. VNIIAES Publ., 2015, 164 p. (in Russian).

Authors

Antonov Aleksandr Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: antonov@iate.obninsk.ru

Chepurko Valerij Anatol'evich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: chepurko@iate.obninsk.ru