

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ПОДСИСТЕМ ЯЭУ СО ВСТРОЕННЫМ КОНТРОЛЕМ

А.В. Антонов, А.В. Дагаев, В.А. Чепурко

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Статья посвящена расчету надежности подсистем ЯЭУ с многократным восстановлением. Разработана модель, позволяющая рассчитывать неасимптотический и асимптотический коэффициенты готовности. Осуществлен сравнительный анализ показателей надежности. Проведен краткий обзор литературы по данной тематике.

ВВЕДЕНИЕ

С увеличением сложности систем растет уровень требований, предъявляемых к их надежности. Классическим подходом, применяемым для определения характеристик надежности восстанавливаемых объектов, является подход, основанный на применении асимптотических моделей. Однако применение асимптотических моделей корректно для систем, к которым не предъявляются особые требования по надежности, а также для систем, проработавших длительное время, иными словами, когда время работы много больше средней наработки. Расчеты, полученные по асимптотическим моделям вследствие ряда упрощений, допускаемых в них, не гарантируют высокой точности оценок надежности. Системы ядерных энергетических установок (ЯЭУ) относятся к классу высоконадежного оборудования, поэтому приходится развивать математический аппарат, позволяющий оценивать надежность систем с большим уровнем точности. Создание неасимптотических моделей является необходимым условием повышения точности расчетов. Авторами предложена неасимптотическая модель анализа надежности систем.

В литературе, в основном, находят отражение различные виды асимптотических моделей. Так в [1] приводятся асимптотические модели с различными типами стратегий обслуживания. В [2] представлена классификация моделей анализа надежности систем и объектов исследования надежности. Здесь описаны модели, учитывающие различные виды резервирования элементов с постоянной интенсивностью отказов [2, с. 204-230], приводятся модели оптимизации надежности систем.

В [3] рассматриваются модели анализа надежности с учетом структуры системы, описываются задачи оптимизации периода проведения предупредительных профилактик с мгновенной индикацией отказа и с индикацией произвольной длительности, при наличии плановых восстановительных работ, при отсутствии самостоятельной индикации отказов. Там же изложены процедуры определения стоимостных показателей функционирования систем, соответствующие представленным моделям.

В [4] описываются характеристики правил обслуживания систем, излагаются методы оптимизации обслуживания систем в асимптотической постановке задачи. Рассматриваются задачи резервирования.

В [5] поставлена задача оптимизации запасных изделий и приборов (ЗИП) и надежности систем с мгновенным восстановлением работоспособности. Помимо этого приводятся модели с восстановлением при постепенных отказах системы с учетом контроля и без него.

В [6] описана процедура вывода уравнений восстановления. Рассматриваются математические модели затрат на системы с различными видами обслуживания.

МОДЕЛЬ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВСТРОЕННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ

В настоящей работе рассматривается неасимптотическая модель анализа надежности систем, которая учитывает наличие встроенного контроля и аварийной профилактики. Уравнения восстановления, полученные в данной модели, основаны на уравнениях Вольтерра 2 рода.

Данная модель предполагает наличие встроенного контроля с мгновенной индикацией отказов в системе и ее полное восстановление в случае отказа. Контроль осуществляется за системой постоянно и в случае отказа функционирование системы прекращается и она находится в неработоспособном состоянии до момента восстановления. Рассмотрим стратегию функционирования более подробно.

Считается, что в начальный момент времени $t_0=0$ система находится в работоспособном состоянии и, следовательно, коэффициент готовности системы в этой точке равен единице. Система функционирует до момента отказа $-\xi_i$, после чего проводится аварийное восстановление, которое длится промежуток времени $-\eta_{ifr}$. После восстановления в момент времени τ_{ir} система продолжает свою работу до очередного момента отказа, далее происходит восстановление через случайное время η_{ifr} и переход в работоспособное состояние. Такой цикл повторяется до выбранного момента времени t . Представленная стратегия отображена на рис.1.

Рассмотрим обозначения, используемые в этой модели: '+' и '-' характеризуют рабочее и нерабочее состояние системы; ξ_i - период i -ой наработки до отказа; η_{ifr} - длительность проведения i -го аварийного восстановления. Величины τ_{if} и τ_{ir} обозначают интервалы времени от начала работы системы до i -го отказа и i -го восстановления соответственно. Их можно представить в виде сумм других случайных величин, т.е.

$$\{\tau_{0r}=0; \left\{ \begin{array}{l} \tau_{1f}=\xi_1 \\ \tau_{1r}=\xi_1+\eta_{fr} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} \tau_{2f}=\tau_{1r}+\xi_2 \\ \tau_{2r}=\tau_{1r}+\xi_2+\eta_{fr} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} \tau_{if}=\tau_{i-1,r}+\xi_i \\ \tau_{ir}=\tau_{i-1,r}+\xi_i+\eta_{fr} \end{array} \right\}$$

Коэффициент готовности для данной стратегии можно записать в виде суммы вероятностей заставить систему в работоспособном состоянии:

$$\begin{aligned} K(t) &= \sum_{i=1}^{\infty} P(\tau_{i-1,r} < t < \tau_{i,f}) = P_1(t < \xi_1) + \sum_{i=1}^{\infty} P(\tau_{i,r} < t < \tau_{i+1,f}) = \\ &= (1 - F_{\xi}(t)) + \sum_{i=1}^{\infty} P(\tau_{i,r} < t < \tau_{i+1,f}). \end{aligned} \quad (1)$$

Распишем i -й элемент суммы:

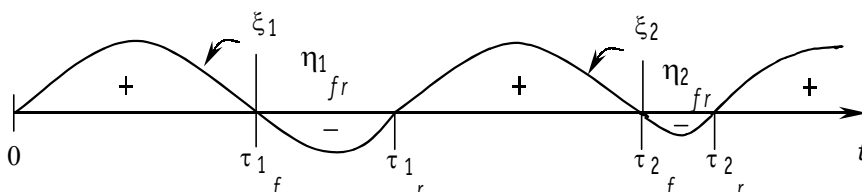


Рис. 1. Стратегия, учитывающая встроенный контроль

$$\begin{aligned}
 P(\tau_{i,r} < t < \tau_{i+1,r}) &= P(\tau_{i,r} < t < \tau_{i,r} + \xi_{i+1}) = \iint_{\substack{\tau_{i,r} < t \\ \xi_{i+1} > t - \tau_{i,r}}} f_{\tau_{i,r}}(x) f_{\xi_{i+1}}(y) dy dx = \\
 &= \int_0^t f_{\tau_{i,r}}(x) \int_{t-x}^{\infty} f_{\xi_{i+1}}(y) dy dx = \int_0^t f_{\tau_{i,r}}(x) \left(1 - \int_0^{t-x} f_{\xi_{i+1}}(y) dy \right) dx = F_{\tau_{i,r}}(t) - \int_0^t f_{\tau_{i,r}}(x) F_{\xi_{i+1}}(t-x) dx = \\
 &= F_{\tau_{i,r}}(t) - \int_0^t F_{\tau_{i,r}}(x) f_{\xi_{i+1}}(t-x) dx, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $P(a < t < b)$ - вероятность попадания случайной величины t в интервал $[a; b]$; $F_{\xi_i}(x)$, $f_{\xi_i}(x)$ - функция и плотность распределения случайной величины ξ_i . Предположим, что величины ξ_i независимы и одинаково распределены $f_{\xi_i} = f_{\xi}$. Аналогичное предположение сделаем относительно времени восстановления системы, т.е. $f_{\eta_{i,fr}} = f_{\eta_{fr}}$. Применив преобразование Лапласа к выражению (2), получим

$$\bar{P}_i(q) = \bar{F}_{\tau_{i,r}}(q) - \bar{F}_{\tau_{i,r}}(q) \bar{f}_{\xi}(q) = \bar{F}_{\tau_{i,r}}(q) (1 - \bar{f}_{\xi}(q)) = \bar{F}_{\tau_{i,r}}(q) \bar{G}_2(q), \quad (3)$$

где $\bar{F}_{\tau_{i,r}}(q)$, $\bar{f}_{\xi}(q)$ - изображение функции и плотности распределения наработки до отказа; $\bar{G}_2(q) = (1 - \bar{f}_{\xi}(q))$.

Покажем, что представляет собой функция распределения i -го момента регенерации:

$$\begin{aligned}
 F_{\tau_{i,r}}(t) &= P(\tau_{i,r} < t) = P(\tau_{i-1,r} + \xi_i + \eta_{i,fr} < t) = \iiint_{\substack{\tau_{i-1,r} + \xi_i + \eta_{i,fr} < t}} f_{\eta_{i,fr}}(x) f_{\xi_i}(y) f_{\tau_{i-1,r}}(z) dz dy dx = \\
 &= \int_0^t f_{\eta_{i,fr}}(x) \int_0^{t-x} f_{\xi_i}(y) \int_0^{t-x-y} f_{\tau_{i-1,r}}(z) dz dy dx = \int_0^t f_{\eta_{i,fr}}(x) \int_0^{t-x} f_{\xi_i}(y) F_{\tau_{i-1,r}}(t-x-y) dy dx. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Поскольку представленная формула является сверткой, то изображение в форме Лапласа этой функции будет иметь следующий вид:

$$\bar{F}_{\tau_{i,r}}(q) = \bar{f}_{\eta_{i,fr}}(q) \bar{f}_{\xi_i}(q) \bar{F}_{\tau_{i-1,r}}(q) = \bar{G}_1(q) \bar{F}_{\tau_{i-1,r}}(q). \quad (5)$$

Используя формулы (2), (5), коэффициент готовности можно представить как

$$\begin{aligned}
 K(q) &= \sum_{i=1}^{\infty} \bar{P}_i(q) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{F}_{\tau_{i,r}}(q) \bar{G}_2(q) = \bar{P}_1(q) + \sum_{i=1}^{\infty} \bar{P}_{i+1}(q) = \bar{P}_1(q) + \sum_{i=1}^{\infty} \bar{F}_{\tau_{i+1,r}}(q) \bar{G}_2(q) = \\
 &= \bar{P}_1(q) + \bar{G}_1(q) \sum_{i=1}^{\infty} \bar{F}_{\tau_{i,r}}(q) \bar{G}_2(q) = \bar{P}_1(q) + \bar{K}(q) \bar{G}_1(q), \quad (6)
 \end{aligned}$$

где

$$\bar{P}_1(q) = \bar{F}_{\tau_{0,r}}(q) \bar{G}_2(q) = \frac{\bar{G}_2(q)}{q}. \quad (7)$$

Применив обратное преобразование Лапласа к (6), получим

$$K(t) = [1 - F_{\xi}(t)] + \int_0^t f_{\eta_{fr}}(x) \int_0^{t-x} f_{\xi}(y) K(t-x-y) dy dx. \quad (8)$$

Уравнение (8) представляет собой формулу неасимптотического коэффициента готовности.

Найдем асимптотический коэффициент готовности. Для этого выразим коэффициент готовности из (6) и, используя (7), получим

$$\bar{K}(q) = \frac{\bar{P}_1(q)}{(1 - \bar{G}_1(q))} = \frac{\bar{F}_{\tau_0}(q)}{(1 - \bar{G}_1(q))} = \frac{\bar{G}_2(q)}{q(1 - \bar{G}_1(q))}. \quad (9)$$

Поскольку преобразование Лапласа к производной коэффициента готовности дает следующий результат:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} e^{-qt} K'(t) dt &= \int_0^{\infty} e^{-qt} K(t) dt - \int_0^{\infty} K(t) d e^{-qt} = \\ &= -K(0) - \left[-q \int_0^{\infty} e^{-qt} K(t) dt \right] = q \bar{K}(q) - K(0), \end{aligned}$$

то может быть выведено уравнение асимптотического коэффициента готовности

$$\begin{aligned} K_a &= \lim_{q \rightarrow 0} q \bar{K}(q) = \lim_{q \rightarrow 0} \left[\int_0^{\infty} e^{-qt} K'(t) dt + K(0) \right] = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[\int_0^{\infty} K'(t) dt + K(0) \right] = \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} [K(t) - K(0) + K(0)] = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t), \end{aligned} \quad (10)$$

$$K_a = \lim_{q \rightarrow 0} K(q) q = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\bar{G}_2(q)}{q(1 - \bar{G}_1(q))}. \quad (11)$$

Чтобы избавиться от неопределенности в (11) воспользуемся правилом Лопиталья и найдем производные числителя и знаменателя в точке 0 следующих выражений:

$$\begin{aligned} (1 - \bar{G}_1(q))' &= (1 - \bar{f}_{\eta_{fr}}(q) \bar{f}_{\xi}(q))' = -\bar{f}_{\eta_{fr}}'(q) \bar{f}_{\xi}(q) - \bar{f}_{\eta_{fr}}(q) \bar{f}_{\xi}'(q) = \\ &= \bar{f}_{\xi}(q) \int_0^{\infty} e^{-qt} \eta_{fr}(t) dt + \bar{f}_{\eta_{fr}}(q) \int_0^{\infty} e^{-qt} \xi(t) dt, \end{aligned} \quad (12)$$

$$G_2'(q) = (1 - \bar{f}_{\xi}(q))' = \int_0^{\infty} e^{-qt} \xi(t) dt. \quad (13)$$

При $q=0$ выражения (11), (12) примут следующий вид:

$$(1 - \bar{G}_1(0))' = \int_0^{\infty} f_{\xi}(x) dx \int_0^{\infty} t f_{\eta_{fr}}(t) dt + \int_0^{\infty} f_{\eta_{fr}}(x) dx \int_0^{\infty} t f_{\xi}(t) dt = (M(\eta_{fr}) + M(\xi)), \quad (14)$$

$$G_2'(0) = \int_0^{\infty} t f_{\xi}(t) dt = M(\xi). \quad (15)$$

Подставив (14), (15) в (11) получим

$$K_a = \frac{M(\xi)}{M(\xi) + M(\eta_{fr})}. \quad (16)$$

Асимптотическое значение уравнения коэффициента готовности -(16) представляет собой отношение среднего времени нахождения системы в работоспособном состоянии к среднему времени периодов регенерации.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

На основании полученных моделей проведены расчеты асимптотического и неасимптотического коэффициентов готовности. Решение проводилось численными методами, а именно, для численного решения уравнения (8) применялся метод последовательных приближений. Рассмотрим результаты тестовых расчетов, проведенных по представленным выше моделям. В ходе выполнения работы рассчитывалось значение коэффициента готовности системы за промежуток времени, равный 5 годам. Следует отметить, что в качестве закона распределения времени наработки до отказа и времени аварийного восстановления при проведении расчетов использовался нормальный закон. Параметры законов распределения, используемые в расчетах:

- математическое ожидание времени аварийного восстановления 0,4;
- среднее квадратическое отклонение времени аварийного восстановления 0,1;
- математическое ожидание наработки до отказа 0,1;
- среднее квадратическое отклонение наработки до отказа 0,02.

Результаты расчетов приведены на графике, представленном на рис. 2. Из рисунка видно, что чем продолжительней процесс работы системы, тем меньше амплитуда колебаний кривой неасимптотического коэффициента готовности.

Анализ поведения неасимптотического коэффициента готовности показывает, что на начальных этапах функционирования системы этот показатель более адекватно отражает состояние системы. Для объектов ядерной энергетики это обстоятельство является весьма существенным, поскольку от точности расчетов показателей надежности может зависеть решение об уровне достигнутого и остаточного ресурса анализируемого оборудования, а также об уровне безопасности энергетического объекта в данный конкретный момент времени.

На основе разработанной методики были проведены расчеты коэффициента готовности элементов СУЗ Билибинской АЭС (БиАЭС). В качестве примера приведем результаты расчета, проведенного для элемента УТК (усилитель тока камер). Был осуществлен анализ эксплуатационной информации о функционировании данного элемента. На его основе были получены следующие данные: принята гипотеза об экспоненциальном законе распределения наработки до отказа с параметром интенсивность отказов элемента $\lambda=0.95E-6$, время восстановления элемента принято равным пяти часам, что обусловлено регламентом проведения восстановительных работ на данной АЭС.

Результаты расчетов коэффициента готовности УТК представлены на рис.3.

Из данного рисунка видно, что реальное значение коэффициента готовности в пер-

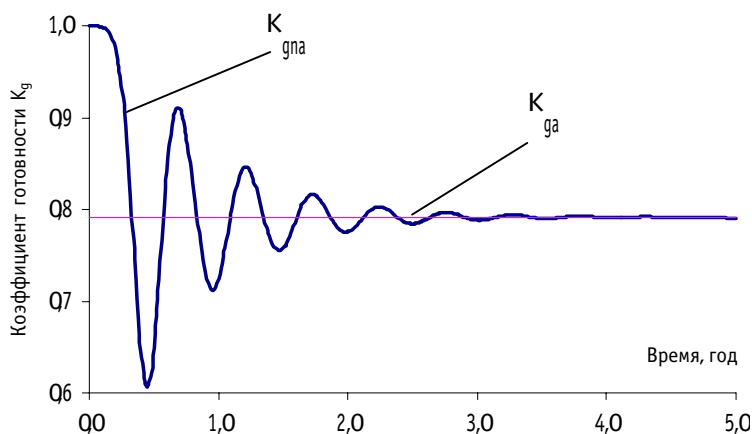


Рис.2. Зависимость коэффициента готовности от времени работы системы: K_{gna} - неасимптотический коэффициент готовности, K_{ga} - асимптотический коэффициент

вые годы эксплуатации объекта значительно выше асимптотического значения и достигает его уровня лишь к 10 годам его непрерывной эксплуатации.

Далее на основании разработанных моделей проводились расчеты характеристик надежности подсистем системы управления и защиты Би АЭС. В качестве примера при-

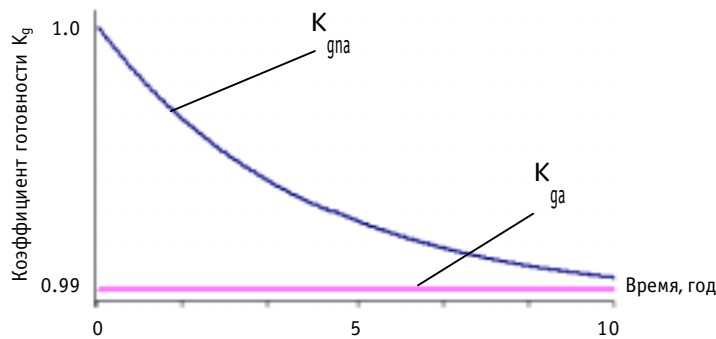


Рис. 3. Значения асимптотического и неасимптотического коэффициентов готовности устройства УТК

ведем результат, полученный для подсистемы автоматического регулирования (АР) реактора БиАЭС. Схема подсистемы АР приведена на рис. 4. В качестве закона распределения наработки до отказа элементов, входящих в состав рассматриваемой подсистемы, принят нормальный закон. Параметры закона распределения для соответствующей

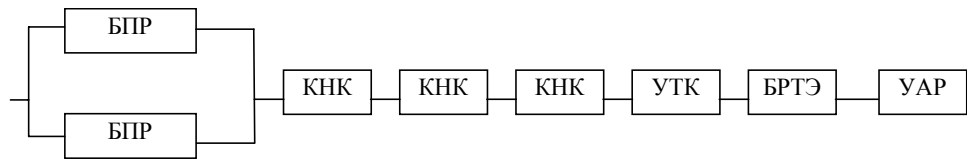


Рис.4. Система канала аварийного регулирования защиты реактора

щих элементов приведены в табл. 1. Время восстановления элементов бралось равным 5 час, за исключением камер КНК, восстановление которых возможно только во время проведения профилактических работ на заглушенном реакторе. Результаты расчетов неасимптотического и асимптотического коэффициентов готовности представлены на рис.5. Проведенные расчеты показывают, что асимптотическое значение коэффициента готовности адекватно описывает состояние объекта только к 20 годам эксплуатации подсистемы.

Таблица 1
Параметры законов распределения

Обозначение элементов	Математическое ожидание *10 ⁻⁶ (час)	Среднее квадратическое отклонение (год)
БПР	10.88	0.003
КНК	3.885	0. 2
УТК	0.95	0.005
УАР	21.24	0.005
БРТЭ	6.0	0.004

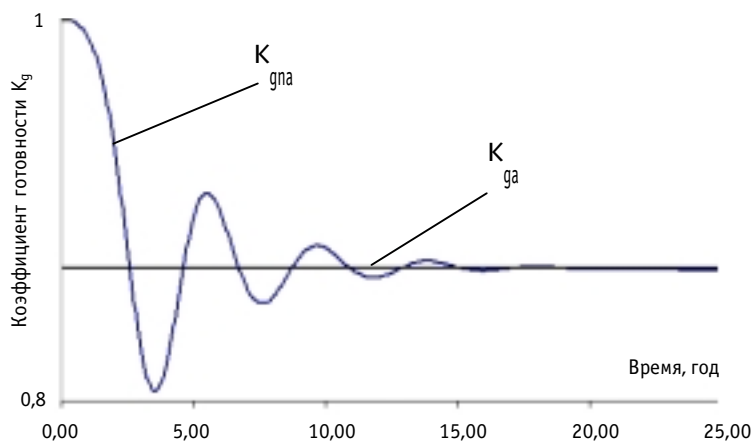


Рис. 5. Зависимость коэффициента готовности от времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы была разработана неасимптотическая модель надежности системы, имеющей встроенный контроль работоспособности. Были выведены такие показатели надежности, как асимптотический и неасимптотический коэффициент готовности, разработано программное обеспечение, посредством которого произведены вычисления. Анализ коэффициентов готовности показывает, что разница между значениями неасимптотического и асимптотического коэффициента готовности на начальном промежутке времени может достигать нескольких десятков процентов от среднего значения коэффициента готовности. Данная погрешность расчетов является относительно большой для задач анализа надежности объектов повышенного риска, каковыми являются объекты ядерной энергетики. Сравнение формулы асимптотического коэффициента готовности, полученного в данной статье с приведенными в других источниках (напр. [1]) показывает их полное совпадение. Данный результат свидетельствует о корректности вывода уравнения восстановления для описываемой стратегии функционирования систем.

Литература

1. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М.: Советское радио, 1971.
2. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. /Под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т.8./ Под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича. – М.: Машиностроение, 1990.
4. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984.
6. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. – М.: Радио и связь, 1988.

Поступила в редакцию 26.02.2001

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 519.714.1:621.039.58

Non-asymptotic Model for System Reliability with Built-in Control \A.V. Antonov, A.V. Dagayev, V.A. Chepurko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 5 illustrations, 1 table.- References, 6 titles.

The paper considers method of calculation for system reliability with a build-in control of trouble-free operation subjected to recovery after failure. The model is developed permitting to calculate non-asymptotic and asymptotic availability coefficient. The comparison of reliability indexes is performed, and the literature is briefly summarized for given subject.

УДК 519.217:621.039.58

The Development of Optimization Criterion for NPP Unit Life Time \O.M. Gulina, A.A. Zgiganshin, V.A. Chepurko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 5 pages, 2 illustrations.- References, 7 titles.

There is developed the optimization criterion for NPP unit lifetime depending on both safety demands and economical cost. The new results for the operation cost due to equipment unreliability are obtained by using of Markovian model. To make decision about life time extension the method of zero level crossing is suggested for different kinds of information about criterion parameters.

УДК 621.039+621.039.586

Application of Neural Network for Main Circulation Pumps Diagnostic \S.T. Leskin, V.V. Valuy, D.G. Zarugin Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 4 illustrations, 1 table.- References, 8 titles.

The application of Neural Network for VVER 1000 Main Circulation Pumps Diagnostic is discussed. On The base of selected Model and principles of education the Neural Network is developed. The results of application of the Neural Network, previously educated on the fifth block NV NPP and the first block Kalinin NPP data, are presented. The sensitivity analyze of the Neural Network for the entering data was carried out to outline the most influencing on the education process of MCP anomalies conditions recognizing.

УДК 621.039.526

«Cold» Nuclear Reactor with Direct Nuclear - Electric Energy Conversion Based on Secondary Electrons within the Frame of Nuclear Material Non – Proliferation \V.B. Anufrienko, G.N. Kazantsev, V.P. Kovalev, A.G. Matkov, G.M. Pshakin, M.Ya. Khmelevsky; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 4 illustrations, 2 table.- References, 8 titles.

One of the problems in developing nuclear power at the current stage consists in non - proliferation of nuclear materials (NM) and technologies which can be used for constructing explosive devices.

So the attempt to make the equipment and power units requirements more stringent is justified. These requirements could provide a higher level of resistance to proliferation and unauthorized use of NMs at all the stages of nuclear fuel cycle. In this respect additional possibilities are revealed when developing new ways of direct conversion of nuclear power into the electric one.

This paper considers the concept of a nuclear reactor with direct (avoiding a thermal stage) conversion of nuclear energy into electric energy by means of accumulation of secondary electrons (SE) generated in the substance by fission fragments. The conversion technique is based on the use of electrogenerating elements (EGEs) which simultaneously are reactor fuel cores in the form