

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ СУЗ С УЧЕТОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИСПРАВНОСТИ

А.И. Перегуда, Д.А. Тимашов

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



Предложена математическая модель надежности комплекса «объект защиты – система безопасности». Показано как эта модель применяется для анализа надежности подсистемы СУЗ. Модель позволяет учитывать последовательность отказов элементов комплекса, приводящую к отказу, а также периодический контроль исправности элементов. Описанная в работе процедура получения асимптотических оценок для средней наработки до первой аварии и для вероятности аварии в зависимости от времени опирается на теорию восстановления и значительно проще, нежели традиционные марковские и полумарковские модели.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Использование опасных технологий, таких как атомные электростанции, требует включения в состав оборудования, реализующего эти технологии, систем безопасности. Назначение системы безопасности – перевод аварийных ситуаций при нарушении нормального функционирования объекта защиты в ранг неопасных, т.е. парирование отказов объекта защиты. Таким образом, системе безопасности отводится важная роль в обеспечении безопасного функционирования объекта защиты, но она не является средством, обеспечивающим его надежную работу. Модели таких систем рассматривались, например, в [1,2].

Рассмотрим вначале структуру предлагаемой модели. Рассматриваемый комплекс состоит из объекта защиты (ОЗ) и системы безопасности (СБ). СБ состоит из нескольких каналов защиты (КЗ), каждый из которых призван парировать определенный вид отказов ОЗ. Каждый КЗ в свою очередь имеет сложную структуру. Авария комплекса происходит тогда, когда отказ ОЗ приходится на тот момент времени, когда соответствующий КЗ СБ не выполняет своих функций. Под аварией мы понимаем событие, заключающееся в крупном нарушении режимов работы системы, приводящее к созданию опасных условий для жизни человека и окружающей среды. Определения таких основных понятий как отказ, восстановление, работоспособное и неработоспособное состояние взяты в соответствии с ГОСТ 27.002-89.

Имеются различные виды контроля исправности элементов КЗ СБ. Состояние некоторых элементов можно контролировать непрерывно, состояние же других

контролируется периодически, причем контроль занимает некоторое конечное время. Готовность периодически контролируемого элемента существенно отличается от готовности того же элемента контролируемого непрерывно, поэтому возникает необходимость учитывать периодический контроль при анализе безопасности.

Нашей задачей в настоящей работе является построение математической модели, позволяющей оценивать показатели надежности описанной системы.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Введем следующие обозначения. Пусть имеется N КЗ СБ, каждый из которых парирует свой вид отказов ОЗ, при этом отказы разных видов статистически независимы. Предполагаем, что отказы ОЗ и их парирование можно описывать с помощью процесса восстановления, т.е. будем считать, что после парирования отказа ОЗ случайный процесс как бы возвращается в исходное состояние с теми же статистическими характеристиками, что и в начальный момент времени. Такие моменты времени называются моментами регенерации. Также предполагаем, что совпадение двух и более отказов является практически невероятным событием. Следует отметить, что хотя данные ограничения и являются достаточно строгими, но указанные предположения выполняются, например, в случае экспоненциально распределенных случайных наработок до отказа (в силу свойства нестарения). Так что сфера применимости предлагаемой модели, по крайней мере, не уже, чем у моделей на основе полумарковских процессов. Также предположим, что время восстановления после отказа ОЗ пренебрежимо мало по сравнению с наработками до отказа. Пусть случайные наработки до отказа j -го вида χ_j на каждом цикле регенерации рассматриваемого случайного процесса независимы и одинаково распределены с функцией распределения $F_{\chi_j}(t)$.

Рассмотрим теперь подробнее процесс функционирования СБ. Пусть j -й КЗ СБ состоит из M_j элементов, каждый из которых может находиться только в одном из двух состояний – исправном и неисправном, а также и КЗ СБ может находиться только в одном из этих двух состояний. Состояние k -го элемента j -го КЗ СБ обозначим x_{kj} :

$$x_{k,j} = \begin{cases} 0, & \text{если } k\text{-й элемент } j\text{-го канала защиты неработоспособен,} \\ 1, & \text{если } k\text{-й элемент } j\text{-го канала защиты работоспособен.} \end{cases}$$

Пусть $\varphi_j(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j})$ – состояние j -го КЗ СБ, вычисленное в зависимости от состояний x_{kj} отдельных элементов: $\varphi_j(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j}) = 1$ если j -ый КЗ СБ исправен, и $\varphi_j(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j}) = 0$ в противном случае. Таким образом, функция $\varphi_j(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j})$ – булева функция M_j булевых переменных $x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j}$. Она называется структурной функцией j -го КЗ СБ. Функция надежности j -го КЗ СБ – это функция

$$h_j(p_{1,j}, p_{2,j}, \dots, p_{M_j,j}) = M\varphi_j(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j}) = P(\varphi_j(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j}) = 1),$$

где $P_{kj} = P(x_{kj}=1) = Mx_{kj}$ – вероятность безотказной работы k -го элемента j -го КЗ СБ. Соответственно $P_{kj}(t)$ – вероятность безотказной работы k -го элемента j -го КЗ СБ в момент времени t . Состояние каждого элемента – это булевозначный случайный процесс, который в любой момент времени может принимать значения 0 или 1. Нарботка до отказа ξ_{kj} k -го элемента j -го КЗ СБ есть случайная величина. После обнаружения отказа k -го элемента j -го КЗ СБ производится восстановление его работоспособности в течение времени η_{kj} , также случайного. Предполагаем, что восстановление полное, т.е. все наработки до отказа элемента после каждого вос-

становления независимы и одинаково распределены, и что все времена восстановления элемента также независимы и одинаково распределены.

Кроме того, рассмотрим процедуру периодического контроля элементов КЗ СБ. Пусть промежуток времени между двумя последовательными процедурами контроля k -го элемента j -го КЗ СБ равен T_{kj} , а длительность контроля этого элемента равна θ_{kj} . Во время контроля этот элемент перестает выполнять свои функции. Таким образом, все время функционирования j -го КЗ СБ распадается на отдельные циклы, в каждом из которых этот канал часть времени проводит в исправном состоянии (множество интервалов времени Q_j^+), а остальное время затрачивается на устранение неисправностей и контроль (множество интервалов времени Q_j^-). Множество интервалов времени, в течение которых k -ый элемент j -го КЗ СБ исправен, обозначим $Q_{k,j}^+$, а множество остальных интервалов $Q_{k,j}^-$.

При данных предположениях процесс функционирования рассматриваемого комплекса можно описывать с помощью наложения процессов восстановления [3]. Один из этих процессов описывает отказы ОЗ, которые либо парируются СБ, либо приводят к аварии. Прочие же процессы описывают отказы элементов КЗ СБ, восстановление после этих отказов и периодический контроль СБ.

Рассмотрим первый из упомянутых процессов. Представим длительность цикла регенерации этого процесса в следующем виде: $\tau_{03} = \min(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N)$. Это означает, что осуществляется один из N вариантов развития процесса. Нарботку комплекса до аварии представим в виде

$$\omega = \sum_{i=1}^v \tau_{03i},$$

где v – номер цикла регенерации, на котором произошла авария. Функция распределения наработки ω комплекса до аварии определяется следующим образом:

$$F_{\omega}(t) = P\left(\sum_{i=1}^v \tau_{03i} \leq t\right).$$

Найдем вероятность того, что авария произошла на n -м цикле регенерации $P(v=n)$. Поскольку рассматриваемый процесс является процессом восстановления, то вероятность того, что авария произошла на n -м цикле регенерации, можно представить в виде $P(v=n) = (1-r)^{n-1}r$, где r – вероятность того, что на цикле регенерации рассматриваемого процесса произошла авария.

Запишем теперь преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения $F_{\omega}(t)$:

$$\tilde{F}_{\omega}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dF_{\omega}(t) = Me^{-s\omega}.$$

Воспользуемся методом условных распределений и выразим вероятность сложного события через условные вероятности этого события при соответствующих условиях. Если условия несовместны и представляют собой полную группу событий, то

$$Me^{-s\omega} = \sum_{n=1}^{\infty} M(e^{-s\omega} | v=n) P(v=n) = \sum_{n=1}^{\infty} Me^{-sn\tau_{03}} P(v=n),$$

следовательно,

$$\tilde{F}_{\omega}(s) = \sum_{n=1}^{\infty} (\tilde{F}_{\tau_{03}}(s))^n (1-r)^{n-1} r = \frac{\tilde{F}_{\tau_{03}}(s)r}{1 - \tilde{F}_{\tau_{03}}(s)(1-r)}.$$

Найти обратное преобразования для $\tilde{F}_{\omega}(s)$ в общем случае не представляется возможным, но можно вычислить среднюю наработку комплекса до первой ава-

рии $M\omega$. Опуская несложные преобразования, запишем

$$M\omega = M\tau_{03}/r.$$

Нужно найти $M\tau_{03}$. Вычислим вначале функцию распределения

$$F_{\tau_{03}}(t) = P(\tau_{03} \leq t) = P(\min(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N) \leq t).$$

Запишем ее в следующем виде:

$$F_{\tau_{03}}(t) = P(\min(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N) \leq t) = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P(\chi_j \leq t)),$$

тогда

$$M\tau_{03} = \int_0^{\infty} (1 - F_{\tau_{03}}(t)) dt = \int_0^{\infty} \left(\prod_{j=1}^N (1 - F_{\chi_j}(t)) \right) dt.$$

Осталось найти r – вероятность того, что на цикле регенерации рассматриваемого процесса произошла авария. Авария происходит тогда, когда отказ ОЗ пришелся на неработоспособное состояние СБ. Запишем выражение для вероятности этого события. Воспользуемся формулой полной вероятности и получим

$$r = \sum_{j=1}^N q_j P(\chi_j < \min(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{j-1}, \chi_{j+1}, \dots, \chi_N)),$$

где q_j – вероятность того, что отказ ОЗ j -го типа пришелся на неработоспособное состояние j -го КЗ СБ. Преобразуем это выражение и получим

$$r = \sum_{j=1}^N q_j \int_0^{\infty} \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N (1 - F_{\chi_l}(t)) dF_{\chi_j}(t).$$

Далее необходимо вычислить q_j . Для этого рассмотрим процесс функционирования КЗ СБ.

Введем дуальную к булевой функции $\Phi_j(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{M_j,j})$ функцию множеств $A_{1,j}, A_{2,j}, \dots, A_{M_j,j}$ $\bar{\Phi}_j(A_{1,j}, A_{2,j}, \dots, A_{M_j,j})$, определенную по следующему правилу: если $\Phi(x_1, x_2) = x_1 \wedge x_2$, то $\bar{\Phi}(A_1, A_2) = A_1 \cap A_2$, если $\Phi(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2$, то $\bar{\Phi}(A_1, A_2) = A_1 \cup A_2$, и если $\Phi(x) = \bar{x}$, то $\bar{\Phi}(A) = (0, \infty) - A$. Смысл такого отображения состоит в том, что если A_{kj} – множество тех моментов времени, в которые k -ый элемент j -го КЗ СБ находится в исправном состоянии, то $\bar{\Phi}_j(A_{1,j}, A_{2,j}, \dots, A_{M_j,j})$ есть множество моментов исправной работы j -го КЗ СБ.

Вероятность аварии из-за несрабатывания j -го КЗ СБ в момент времени t запишется в виде $P(t \in Q_j^-)$. Преобразуем это выражение так:

$$P(t \in Q_j^-) = 1 - h_j(P_{1,j}(t), P_{2,j}(t), \dots, P_{M_j,j}(t)),$$

где $P_{kj}(t)$ – вероятность исправного функционирования k -го элемента j -го КЗ СБ в момент времени t . Для q_j можем записать

$$q_j = \int_0^{\infty} P(t \in Q_j^-) dF_{\tau_{03}}(t).$$

Найдем $P_{k,j}(t) = P(t \in Q_{k,j}^+) = 1 - P(t \in Q_{k,j}^-)$. В соответствии с формулой полной вероятности имеем

$$P_{k,j}(t) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P(t \in Q_{k,j}^+ | \xi_{k,j} = x, \eta_{k,j} = y) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y),$$

где ξ_{kj} и η_{kj} – случайные времена до первого отказа и первого восстановления соответственно k -го элемента j -го КЗ СБ.

Контроль исправности элемента может осуществляться непрерывно или периодически. Рассмотрим оба эти случая.

1. Элемент контролируется непрерывно. Процесс функционирования k -го элемента j -го КЗ СБ распадается на циклы регенерации длительностью $\tau_{kj}(\xi_{kj}, \eta_{kj}) = \xi_{kj} + \eta_{kj}$. Отметим, что возможны два варианта: $\tau_{kj}(\xi_{kj}, \eta_{kj}) > t$ и $\tau_{kj}(\xi_{kj}, \eta_{kj}) \leq t$, в соответствии с которыми представим $P_{kj}(t)$ так:

$$P_{k,j}(t) = \iint_{\tau_{k,j}(x,y) \leq t} P(t \in Q_{k,j}^+ | \xi_{k,j} = x, \eta_{k,j} = y) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) + \iint_{\tau_{k,j}(x,y) > t} P(t \in Q_{k,j}^+ | \xi_{k,j} = x, \eta_{k,j} = y) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) = I_1 + I_2.$$

Вычислим сначала I_2 . Условие $\tau_{kj}(x, y) > t$ означает, что момент регенерации процесса функционирования k -го элемента j -го КЗ СБ наступил после момента времени t . Тогда I_2 преобразуем так:

$$I_2 = \iint_{\tau_{k,j}(x,y) > t} (J_{t \in [0,x]}) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) = \int_0^\infty (J_{t \in [0,x]}) dF_{\xi_{k,j}}(x) = \bar{F}_{\xi_{k,j}}(t).$$

Вычислим теперь I_1 . При рассмотрении ситуации $\tau_{kj}(\xi_{kj}, \eta_{kj}) \leq t$ учтем, что в момент времени $\tau_{kj}(\xi_{kj}, \eta_{kj})$ имеет место момент регенерации, тогда запишем

$$I_1 = \iint_{\tau_{k,j}(x,y) \leq t} P_{k,j}(t - \tau_{k,j}(x, y)) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) = \int_0^t P_{k,j}(t - z) dF_{\tau_{k,j}}(z).$$

Сложим теперь I_1 и I_2 и получим интегральное уравнение для $P_i(t)$:

$$P_{k,j}(t) = f_{k,j}(t) + \int_0^t P_{k,j}(t - z) dF_{\tau_{k,j}}(z),$$

где $f_{k,j}(t) = \bar{F}_{\xi_{k,j}}(t)$, $F_{\tau_{k,j}}(y) = P(\tau_{k,j}(\xi_{k,j}, \eta_{k,j}) \leq y) = P(\xi_{k,j} + \eta_{k,j} \leq y)$.

Поскольку полученное уравнение является уравнением в свертках, будем искать его решение, используя преобразование Лапласа-Стилтьеса [4]:

$$\tilde{P}_{k,j}(s) = \tilde{f}_{k,j}(s) + \tilde{P}_{k,j}(s) \tilde{F}_{\tau_{k,j}}(s),$$

где $\tilde{F}_{\xi}(s) = \int_0^\infty e^{-st} d\tilde{F}_{\xi}(t) = M e^{-s\xi}$. Тогда решение запишется в виде

$$\tilde{P}_{k,j}(s) = \tilde{f}_{k,j}(s) / (1 - \tilde{F}_{\tau_{k,j}}(s)).$$

Найти обратное преобразование в общем виде не представляется возможным, поэтому найдем асимптотическое соотношение для $P_i(t)$, применив таубернову теорему $\lim_{t \rightarrow \infty} P_{k,j}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \tilde{P}_{k,j}(s)$. Тогда получим

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{k,j}(t) = \frac{M \xi_{k,j}}{M \xi_{k,j} + M \eta_{k,j}} = K_{r k,j}^{СБ}.$$

Таким образом, вероятность того, что k -ый элемент j -го канала защиты системы безопасности находится в исправном состоянии при $t \rightarrow \infty$, представляет собой стационарный коэффициент готовности этого элемента.

2. Элемент контролируется периодически. Процесс функционирования периодически контролируемого k -го элемента j -го КЗ СБ имеет циклы регенерации длительностью $\tau_{k,j}(\xi_{k,j}, \eta_{k,j}) = ([\xi_{k,j} / (\tau_{k,j} + \theta_{k,j})] + 1)(\tau_{k,j} + \theta_{k,j}) + \eta_{k,j}$. Отметим, что возможны два варианта: $\tau_{kj}(\xi_{kj}, \eta_{kj}) > t$ и $\tau_{kj}(\xi_{kj}, \eta_{kj}) \leq t$. Следовательно,

$$P_{k,j}(t) = \iint_{\tau_{k,j}(x,y) \leq t} P(t \in Q_{k,j}^+ | \xi_{k,j} = x, \eta_{k,j} = y) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) + \\ + \iint_{\tau_{k,j}(x,y) > t} P(t \in Q_{k,j}^+ | \xi_{k,j} = x, \eta_{k,j} = y) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) = I_1 + I_2.$$

Преобразуем I_2 . Условие $\tau_{k,j}(x, y) > t$ означает, что момент регенерации k -го элемента j -го КЗ СБ наступил после момента времени t . Тогда

$$I_2 = \iint_{\tau_{k,j}(x,y) > t} \left(\sum_{m=0}^{\lfloor x/(T_{k,j} + \theta_{k,j}) \rfloor - 1} J_{t \in [m(T_{k,j} + \theta_{k,j}), m(T_{k,j} + \theta_{k,j}) + T_{k,j}]} + J_{t \in [\lfloor x/(T_{k,j} + \theta_{k,j}) \rfloor (T_{k,j} + \theta_{k,j}), x]} \right) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) = \\ = \sum_{l=0}^{\infty} \left(\sum_{m=0}^l J_{m(T_{k,j} + \theta_{k,j}) \leq t} - \sum_{m=0}^{l-1} J_{m(T_{k,j} + \theta_{k,j}) + T_{k,j} \leq t} \right) (F_{\xi_{k,j}}((l+1)(T_{k,j} + \theta_{k,j})) - F_{\xi_{k,j}}(l(T_{k,j} + \theta_{k,j}))) - F_{\xi_{k,j}}(t).$$

Опустим некоторые громоздкие преобразования по раскрытию суммы и приведем сразу конечный результат:

$$I_2 = \bar{F}_{\xi_{k,j}}(t) - \sum_{m=1}^{\infty} \bar{F}_{\xi_{k,j}}(m(T_{k,j} + \theta_{k,j})) (J_{(m-1)(T_{k,j} + \theta_{k,j}) + T_{k,j} \leq t} - J_{m(T_{k,j} + \theta_{k,j}) \leq t}).$$

Заметим, что $\sum_{m=1}^{\infty} \bar{F}_{\xi_{k,j}}(m(T_{k,j} + \theta_{k,j})) (J_{(m-1)(T_{k,j} + \theta_{k,j}) + T_{k,j} \leq t} - J_{m(T_{k,j} + \theta_{k,j}) \leq t})$ – это $\bar{F}_{\zeta_{k,j}}(t)$ для некоторой случайной величины $\zeta_{k,j}$, следовательно, $I_2 = \bar{F}_{\xi_{k,j}}(t) - \bar{F}_{\zeta_{k,j}}(t)$.

Осталось рассмотреть I_1 . Учтем, что момент времени $\tau_{k,j}(\xi_{k,j}, \eta_{k,j})$ – это момент регенерации, следовательно,

$$I_1 = \iint_{\tau_{k,j}(x,y) \leq t} P_{k,j}(t - \tau_{k,j}(x, y)) dF_{\xi_{k,j}}(x) dF_{\eta_{k,j}}(y) = \int_0^t P_{k,j}(t - z) dF_{\tau_{k,j}}(z).$$

Сложим теперь I_1 и I_2 и получим интегральное уравнение для $P_{k,j}(t)$:

$$P_{k,j}(t) = f_{k,j}(t) + \int_0^t P_{k,j}(t - y) dF_{\tau_{k,j}}(y),$$

где $f_{k,j}(t) = \bar{F}_{\xi_{k,j}}(t) - \bar{F}_{\zeta_{k,j}}(t)$ и $F_{\tau_{k,j}}(y) = P\left(\left(\left\lfloor \xi_{k,j}/(T_{k,j} + \theta_{k,j}) \right\rfloor + 1\right)(T_{k,j} + \theta_{k,j}) + \eta_{k,j} \leq y\right)$.

Как и ранее будем искать решение уравнения, используя преобразование Лапласа-Стилтьеса:

$$\tilde{P}_{k,j}(s) = \tilde{f}_{k,j}(s) + \tilde{P}_{k,j}(s) \tilde{F}_{\tau_{k,j}}(s),$$

где $\tilde{F}_{\xi}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d\tilde{F}_{\xi}(t) = M e^{-s\xi}$. Тогда решение имеет вид

$$\tilde{P}_{k,j}(s) = \tilde{f}_{k,j}(s) / (1 - \tilde{F}_{\tau_{k,j}}(s)).$$

Найдем асимптотическое соотношение для $P_{k,j}(t)$, применяя тауберову теорему $\lim_{t \rightarrow \infty} P_{k,j}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \tilde{P}_{k,j}(s)$. Тогда

$$\lim_{s \rightarrow 0} \tilde{P}_{k,j}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\tilde{f}_{k,j}(s)}{1 - \tilde{F}_{\tau_{k,j}}(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{M e^{-s\zeta_{k,j}} - M e^{-s\xi_{k,j}}}{1 - M e^{-s\tau_{k,j}}} = \frac{M \xi_{k,j} - M \zeta_{k,j}}{M \tau_{k,j}}.$$

Найдем теперь выражение для $M \zeta_{k,j}$. Поскольку $M \zeta_{k,j} = \int_0^{\infty} \bar{F}_{\zeta_{k,j}}(t) dt$, то

$$M \zeta_{k,j} = \int_0^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \bar{F}_{\xi_{k,j}}(m(T_{k,j} + \theta_{k,j})) (J_{(m-1)(T_{k,j} + \theta_{k,j}) + T_{k,j} \leq t} - J_{m(T_{k,j} + \theta_{k,j}) \leq t}) dt = M \theta_{k,j} \left[\xi_{k,j} / (T_{k,j} + \theta_{k,j}) \right],$$

тогда

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{k,j}(t) = \frac{M\xi_{k,j} - \theta_{k,j} M[\xi_{k,j}/(T_{k,j} + \theta_{k,j})]}{M\eta_{k,j} + (T_{k,j} + \theta_{k,j}) + (T_{k,j} + \theta_{k,j}) M[\xi_{k,j}/(T_{k,j} + \theta_{k,j})]} = K_{rk,j}^{CB}.$$

Следовательно, вероятность того, что k -ый элемент j -го КЗ СБ исправен при $t \rightarrow \infty$ представляет собой стационарный коэффициент готовности этого элемента. Последующая оптимизация полученного соотношения приводит к хорошо известному соотношению для оптимального периода профилактики

$$T_{opt\ k,j} \approx \sqrt{2\theta_{k,j}(M\xi_{k,j} + M\eta_{k,j})}.$$

Таким образом, асимптотическое соотношение для вероятности аварии из-за несрабатывания j -го КЗ СБ запишется в виде

$$q_j = 1 - h_j(P_{1,j}, P_{2,j}, \dots, P_{M,j}) = 1 - h_j(K_{r1,j}^{CB}, K_{r2,j}^{CB}, \dots, K_{rM,j}^{CB}).$$

Получить точное выражение для вероятности аварии в общем виде не представляется возможным, но можно записать экспоненциальную оценку для функции распределения времени до первой аварии. Для этого применим следующую теорему [5]:

$$\lim_{r\tau_{03}/M\tau_{03} \xrightarrow{x} 0} P\{r\omega/M\tau_{03} > x\} = e^{-x},$$

где r – вероятность аварии на периоде регенерации; τ_{03} – длительность периода регенерации при условии, что на этом периоде аварии не произошло; ω – момент

первой аварии. Здесь $\xi \xrightarrow{x} 0$ означает сходимость ξ к нулю по Хинчину. Кроме того,

известно, что если $M\tau_{03}^2 r / (M\tau_{03})^2 \rightarrow 0$, то $r\tau_{03}/M\tau_{03} \xrightarrow{x} 0$. Тогда $F_{\omega}(t) \approx 1 - e^{-\frac{rt}{M\tau}}$ при условии $M\tau_{03}^2 r / (M\tau_{03})^2 \rightarrow 0$, т.е. при $r \ll 1$.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ

Далее мы рассмотрим пример применения предложенной модели для анализа надежности подсистемы СУЗ. Пусть имеется канал защиты по превышению нейтронной мощности, структура которого приведена на рис. 1.

Примем следующие значения интенсивностей отказов элементов (табл. 1).

Запишем теперь формулы для оценки показателей надежности с учетом того, что наработки распределены экспоненциально. Имеем

$$M\omega = 1 / r \sum_{j=1}^N \lambda_{\chi_j}, \quad r = \sum_{j=1}^N q_j \lambda_{\chi_j} / \sum_{j=1}^N \lambda_{\chi_j}, \quad F_{\omega}(t) \approx 1 - e^{-rt \sum_{j=1}^N \lambda_{\chi_j}}.$$

При непрерывном контроле

$$K_{rk,j}^{CB} = \frac{1/\lambda_{\xi_{k,j}}}{1/\lambda_{\xi_{k,j}} + M\eta_{k,j}}.$$

При периодическом контроле

$$K_{rk,j}^{CB} = \frac{1/\lambda_{\xi_{k,j}} - \theta_{k,j} M[\xi/(T + \theta)]}{M\eta_{k,j} + (T_{k,j} + \theta_{k,j}) + (T_{k,j} + \theta_{k,j}) M[\xi/(T + \theta)]}, \quad M[\xi/(T + \theta)] = \frac{e^{-\lambda_{\xi_{k,j}}(T_{k,j} + \theta_{k,j})}}{1 - e^{-\lambda_{\xi_{k,j}}(T_{k,j} + \theta_{k,j})}},$$

$$T_{opt\ k,j} = \sqrt{2\theta_{k,j}(1/\lambda_{\xi_{k,j}} + M\eta_{k,j})}.$$

Нетрудно получить, что вероятность безотказной работы для канала защиты по превышению нейтронной мощности записывается так:

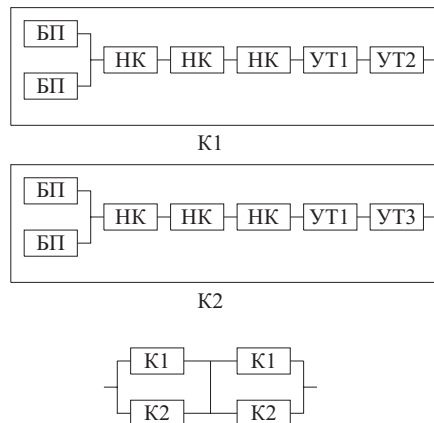


Рис. 1. Структура канала защиты

Интенсивности отказов элементов

Таблица 1

Элемент	Точечная оценка интенсивности отказов, ч ⁻¹
Усилитель тока (УТ1)	$9,5 \times 10^{-7}$
Усилитель тока (УТ2)	$1,3 \times 10^{-5}$
Блок питания (БП)	$2,4 \times 10^{-6}$
Усилитель тока (УТ3)	$7,1 \times 10^{-6}$
Нейтронная камера (НК)	$9,6 \times 10^{-6}$

$$P_{\text{ПМ}} = (P_2 + P_1 - P_2 P_1)^2,$$

где $P_1 = (2P_{\text{БП}} - P_{\text{БП}}^2)P_{\text{НК}}P_{\text{НК}}P_{\text{НК}}P_{\text{УТ1}}P_{\text{УТ2}}$, $P_2 = (2P_{\text{БП}} - P_{\text{БП}}^2)P_{\text{НК}}P_{\text{НК}}P_{\text{НК}}P_{\text{УТ1}}P_{\text{УТ3}}$.

Состояние блоков питания контролируется непрерывно, а состояние нейтронных камер и усилителей тока – периодически. Длительность периодического контроля одна минута, длительность восстановления – 20 минут. В качестве периода контроля выбирается оптимальное значение периода. Тогда $T_{\text{оптНК}}=59$ ч, $T_{\text{оптУТ1}}=187$ ч, $T_{\text{оптУТ2}}=51$ ч, $T_{\text{оптУТ3}}=69$ ч. Вычислим теперь коэффициенты готовности: $K_{\text{ГБП}}=0,9999992$, $K_{\text{ГНК}}=0,999431$, $K_{\text{ГУТ1}}=0,999822$, $K_{\text{ГУТ2}}=0,999338$, $K_{\text{ГУТ3}}=0,999511$. Тогда для этого канала получаем коэффициент неготовности $q_{\text{ПМ}}=1,2 \times 10^{-5}$.

Интенсивность поступления требований на срабатывание канала принимаем равной $1,4 \times 10^{-5}$ ч⁻¹. Для одного канала защиты вероятность r того, что на цикле регенерации процесса функционирования комплекса произошла авария, равна $1,2 \times 10^{-5}$.

Теперь нам осталось оценить среднюю наработку до первой аварии комплекса и вероятность аварии за один год (8760 часов):

$$M\omega = 6 \times 10^9 \text{ ч}, F_{\omega}(8760 \text{ ч}) = 1,5 \times 10^{-6}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель надежности комплекса, включающая в себя объект защиты и систему безопасности, может использоваться для оценки надежности СУЗ АЭС. При этом удастся учесть тот факт, что для некоторых узлов возможно осуществлять только периодический контроль исправности. Приводится также оценка оптимального периода контроля.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры АСУ Обнинского государственного технического университета к.ф.-м.н., доц. В.А. Чепурко и к.т.н., доц. А.В. Пляскину за оказанные консультации и практическую помощь при подготовке данной статьи.

Литература

1. Перегуда А.И., Тимашов Д.А. Моделирование процесса функционирования АТК «ОЗ-СБ» с периодически контролируемой системой безопасности // Надежность. – 2007. – № 2. – С. 38-48.
2. Перегуда А.И., Тимашов Д.А. Моделирование процесса функционирования АТК «ОЗ-СБ» с учетом аварий вызванных обесточиванием // Надежность. – 2008. – № 1. – С. 48-63.

3. Кокс Д. Р., Смит В. Л. Теория восстановления/Пер. с англ. – М.: Советское радио, 1967. – 299 с.
4. Беллман Р., Кук К. Л. Дифференциально-разностные уравнения/Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 548 с.
5. Барзилович Е. Ю., Беляев Ю. К., Кашистанов В. А. и др. Вопросы математической теории надежности/Под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.

Поступила в редакцию 13.04.2009

Obninsk, 2009. – 6 pages, 1 table, 4 illustration. – References 5 titles.

The result of calculation the indicators of emergency electrical power safety (EEPS) and emergency feedwater (EFW) of serial Power Unit with VVER-1000, are shown. We suggest using a steam-water injector (SWI) working on steam generators dump steam for water supply of steam generators in a blackout mode of NPP with VVER-1000 (PWR).

Calculated analysis of SWI is conducted at variable parameters of steam at the entrance to injector, corresponding to various moments of time from the beginning of steam-and-water damping with reference to the power unit with VVER-1000. For providing the working of the system it is suggested at the primary period of aftercooling to make water on injector from additional tanks of the sum of chemically saltless water. These additional tanks are based in the reactor hall at the level of 36,9 meters. The fundamental opportunity of operation of steam generators emergency supply system with SWI during ~ 3 hours from the beginning of damping is shown.

УДК 519.7:621.039

A Reliability Model for Safety System-Protected Object Complex with Periodic Testing of Safety System \ A.I. Pereguda, D.A. Timashov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 1 illustration. – References, 5 titles.

In this paper an advanced safety system-protected object complex reliability model has been proposed, assuming the safety system has a complex structure. The model can be used to estimate such reliability indices as mean time to failure and probability of failure prior to time t . The proposed model can be easily used for different types of objects like nuclear power plants and others. This model is more computationally efficient than Markov and semi-Markov models especially for large systems.

УДК 621.039.538

Application of the risk analysis for calculating of the integral characteristics of the environmental radioactivity in the areas of Nuclear Power Plants \ I.I. Kryshev, E.K. Khandogina, A.Yu. Pakhomov, A.I. Kryshev, K.D. Sanina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 5 tables. – References, 12 titles.

Methodology and assessments of the integral characteristics of the radioactivity of the atmosphere, water bodies and soil on basis of risk analysis are presented.

УДК 621.039.512

The Peculiarities of Nuclear Reactor Space Kinetic at the Space-Depended Part of Delayed Neutrons \ Yu.N. Volkov, V.I. Naumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 6 titles.

At this paper the results of qualitative analysis of space reactor kinetics at the space-depended part of delayed neutrons and distributed control system have been represented. The analysis based on one-dimensions, one-group diffusion reactor model with one effective group of delayed neutrons. The possibility and conditions of implementing of averaged part of delayed neutrons for the reactor kinetic analysis are under discussions.

УДК 621.039.51

Neutron Density Probabilistic Characteristics in Nuclear Reactor with Stochastic Disturbance in Medium Properties \ A.M. Zagrebayev, V.A. Nasonova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 23 titles.

A 1-dimensional reactor mathematical model with neutronic and thermal feedbacks and automatic control system is described. This model is used for neutron density statistical properties research in nuclear reactor with stochastic disturbance in medium properties. The results of modeling and statistical analysis of in-core data in RBMK nuclear reactor are given.

УДК 621.039.548

Methodical Peculiarities and Results of Experimental Investigation of the Physical Characteristics of the SM Reactor Converted to New Fuel \ A.Yu. Krasnov, A.P. Malkov, A.L. Petelin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 6 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.