

ОБОБЩЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ АТК «ОБЪЕКТ ЗАЩИТЫ – СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ»

А.И. Перегуда, Р.Е. Твердохлебов

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



Для повышения надежности систем безопасности часто используют различные критерии управления. Однако к настоящему времени при анализе надежности системы безопасности реактора, да и реакторной установки в целом, эта особенность не учитывается из-за отсутствия соответствующих математических моделей надежности. Учет таких взаимосвязей дает более точные показатели надежности, чем в случае предположения независимости каналов защиты по разным параметрам, что показано в данной работе.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высокого уровня надежности систем, а, следовательно, и безопасности АЭС, невозможно без их оценки. К настоящему времени разработаны математические модели надежности, которые позволяют оценивать эти показатели, но они не полностью отражают процессы функционирования каналов защиты систем безопасности (СБ).

Общеизвестно, что контроль активной зоны реактора осуществляется по различным каналам, в том числе по каналам защиты нейтронного потока и превышению температуры теплоносителя. Однако в существующих математических моделях не учитывается их взаимосвязь: вследствие возрастания нейтронного потока в активной зоне через некоторое время начинает расти температура теплоносителя и, наоборот, при росте температуры в реакторе сразу же начинает возрастать нейтронный поток. Очевидно, что в случае отказа канала защиты по мощности, через некоторое время формируется защитное воздействие канала защиты по температуре. Еще одним примером взаимосвязанных параметров могут служить температура и расход теплоносителя [1].

Учет этих взаимосвязей, несомненно, даст более точные показатели надежности, чем в случае предположения независимости каналов защиты по разным параметрам, что мы постараемся показать данной работой.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе рассматривается автоматизированный технологический комплекс, состоящий из объекта защиты (ОЗ) и системы безопасности (СБ), которая осуществ-

ляет контроль ОЗ по двум каналам: по мощности (K_N) и по температуре теплоносителя (K_T). В дальнейшем такой комплекс будем обозначать АТК «ОЗ – 2СБ».

В данной модели рассматриваем только те отказы ОЗ, которые произошли вследствие превышения максимально допустимого значения нейтронной мощности.

С точки зрения последствий, отказы каналов защиты, в отличие от отказов объекта защиты, можно разделить на два класса: скрытые и ложные. Скрытый – отказ, при котором СБ не парирует отказ ОЗ; ложный – СБ самопроизвольно вырабатывает защитные функции при нормальной работе ОЗ и приводит к останову комплекса. Поскольку мы рассматриваем только отказы по мощности, будем считать, что у канала по температуре нет ложных отказов.

Оба канала защиты, находясь в рабочем состоянии, контролируют объект защиты. В случае повышения нейтронного потока в ОЗ сразу же срабатывает канал по мощности, и СБ без задержки начинает выполнять действия, ведущие к останову комплекса. Нарастание нейтронного потока приводит к повышению температуры в ОЗ, однако температура достигает аварийной уставки только через некоторое время. Поэтому если канал по мощности перейдет в состояние скрытого отказа и не отреагирует на изменение состояния ОЗ, канал по температуре отреагирует на отказ ОЗ с некоторой задержкой. В аварийное состояние, в котором дальнейшее развитие ситуации неконтролируемо и может привести к необратимым последствиям, комплекс переходит в случае нахождения обоих каналов защиты в состоянии скрытого отказа к моменту отказа объекта защиты.

Рассматриваемый комплекс работает в нормальных (не граничных) условиях, поэтому допускается независимость отдельных отказов. В предлагаемой модели подсистемы невосстанавливаемые. Основными показателями надежности АТК «ОЗ – 2СБ» будем считать вероятность того, что комплекс перешел в состояние аварии или останова на интервале времени $[0, t]$. Задачей в данной работе является разработка математической модели надежности АТК «ОЗ – 2СБ», учитывающей последствия отказов подсистем и получение соответствующих показателей надежности.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим процесс функционирования такого комплекса. В случайные моменты времени происходят отказы подсистем. Графическая модель функционирования комплекса, отражающая его эволюцию, приведена на рис. 1. На диаграмме, представленной в виде графа переходов, узлы обозначают состояния комплекса. Сплошными линиями обозначены переходы элементов, составляющих комплекс, из одного состояния в другое, пунктирными – развитие ситуаций их отказов.

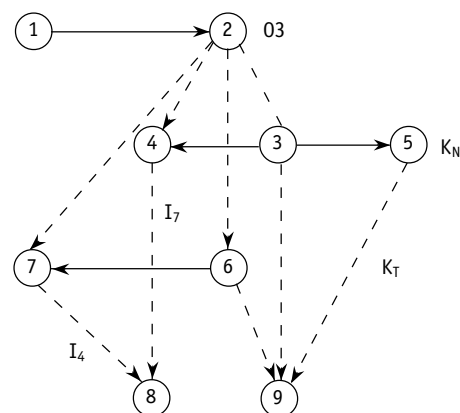


Рис. 1. Графическая модель функционирования АТК «ОЗ–2СБ»

Состояния в графе означают: 1 – нормальная работа ОЗ; 2 – отказ ОЗ; 3 – нормальная работа K_N ; 4 – скрытый отказ K_N ; 5 – ложный отказ K_N ; 6 – нормальная работа K_T ; 7 – скрытый отказ K_T ; 8 – состояние аварии АТК; 9 – состояние останова АТК.

В случае ложного отказа канала защиты по мощности, СБ переводит комплекс в состояние останова. Если канал защиты по мощности находится в рабочем состоянии, то при отказе ОЗ система безопасности мгновенно переводит комплекс в состояние останова. Если нормально работает только канал защиты по

температуре, то СБ среагирует на отказ объекта защиты только через некоторое время и также переведет комплекс в состояние останова. Если же к моменту отказа ОЗ оба канала защиты будут в состоянии скрытого отказа, комплекс перейдет в состояние аварии.

Таким образом, переход АТК «ОЗ – 2СБ» в состояние аварии (8) или останова (9) наступает только тогда, когда реализуется определенная последовательность отказов ее подсистем. Так, в состоянии (8) АТК «ОЗ – 2СБ» окажется, если будут реализованы независимые цепочки состояний $(1, 2, 4|_7, 8)$ и $(1, 2, 7|_4, 8)$, а в состоянии (9) – $(1, 2, 3, 9)$, $(1, 2, 6, 9)$ и $(5, 9)$, причем эти цепочки состояний являются монотонными. Под обозначением $7|_4$ понимается переход K_T в состояние 7 при условии, что K_N уже находится в состоянии 4. Указанное представление комплекса как последовательной системы позволяет классифицировать ее отказы по последствиям отказов ее подсистем, что отражает диаграмма состояний и переходов (см. рис. 1). В дальнейшем будем рассматривать только конечные состояния АТК «ОЗ – 2СБ» с точки зрения последствий отказов.

Рассмотрим поведение системы на интервале $[0, t]$. Вычислим вероятность того, что комплекс перешел в одно из конечных состояний 8 или 9. Введем необходимые обозначения. Пусть α – время, через которое начнется повышение температуры теплоносителя вследствие возрастания нейтронного потока. Обозначим через γ случайную наработку до отказа ОЗ, имеющую распределение $F_\gamma(t) = P(\gamma \leq t)$, через ξ_1 – случайную наработку до ложного отказа K_N соответственно, функцией распределения которой будет $F_{\xi_1}(t) = P(\xi_1 \leq t)$. Функции распределения случайных наработок до скрытого отказа систем безопасности η_1 и η_2 обозначим через $F_{\eta_1}(t) = P(\eta_1 \leq t)$ и $F_{\eta_2}(t) = P(\eta_2 \leq t)$ соответственно.

ВЕРОЯТНОСТЬ ОСТАНОВА

Останов АТК «ОЗ – 2СБ» на интервале $[0, t]$ может произойти вследствие

- реакции канала защиты по мощности либо канала защиты по температуре на отказ ОЗ или ложного отказа канала защиты по мощности при условии, что отказ ОЗ произойдет раньше, чем скрытый отказ любого канала защиты;
- реакции канала защиты по мощности на отказ ОЗ или ложного отказа канала защиты по мощности при условии, что отказ ОЗ произойдет раньше, чем скрытый отказ канала защиты по мощности, но позднее, чем скрытый отказ канала защиты по температуре;
- реакции канала защиты по температуре на отказ ОЗ или ложного отказа канала защиты по мощности при условии, что отказ ОЗ произойдет раньше, чем скрытый отказ канала защиты по температуре, но позднее, чем скрытый отказ канала защиты по мощности;
- ложного отказа канала защиты по мощности при условии, что отказ ОЗ произойдет позднее, чем скрытый отказ любого канала защиты.

Таким образом, вероятность того, что будут реализованы цепочки отказов, ведущих к останову АТК «ОЗ – 2СБ» на интервале $[0, t]$, равна

$$P_o(t) = MP(I_{\eta_1 > \gamma} I_{\eta_2 > \gamma + \alpha} \gamma \wedge \xi_1 \wedge (\gamma + \alpha) + I_{\eta_1 > \gamma} I_{\eta_2 \leq \gamma + \alpha} \gamma \wedge \xi_1 + I_{\eta_1 \leq \gamma} I_{\eta_2 > \gamma + \alpha} \xi_1 \wedge (\gamma + \alpha) + I_{\eta_1 \leq \gamma} I_{\eta_2 \leq \gamma + \alpha} \xi_1 < t),$$

где $I_{\eta_1 \leq \gamma}$ – функция-индикатор, причем $I_{\eta_1 \leq \gamma} = 1$, если $\eta_1 \leq \gamma$, и $I_{\eta_1 \leq \gamma} = 0$, если $\eta_1 > \gamma$, а $\gamma \wedge \xi_1 = \min(\gamma, \xi_1)$ [2].

Используя свойства индикаторов и математических ожиданий, а также в силу пред-

положения о независимости отказов, получим

$$P_o(t) = 1 - \bar{F}_{\xi_1}(t) \left(\int_t^{\infty} \bar{F}_{\eta_1}(y) dF_{\gamma}(y) + \right. \\ \left. + S(t-\alpha) \left(\int_{t-\alpha}^{\infty} F_{\eta_1}(y) \bar{F}_{\eta_2}(y+\alpha) dF_{\gamma}(y) + \int_0^{\infty} F_{\eta_1}(y) F_{\eta_2}(y+\alpha) dF_{\gamma}(y) \right) \right) \quad (1)$$

где $S(t-\alpha)$ – ступенчатая единичная функция, $S(t-\alpha) = 1$, если $t-\alpha \geq 0$, и $S(t-\alpha) = 0$, если $t-\alpha < 0$.

Теперь найдем зависимость интенсивности остановов комплекса от времени и среднее время работы до останова. Обозначим интенсивность останова АТК «ОЗ – 2СБ» за $\sigma_o(t)$. Тогда по определению

$$\sigma_o(t) = \frac{dP_o(t)/dt}{1-P_o(t)}. \quad (2)$$

Среднее время работы до останова T_o найдем следующим образом:

$$T_o = \int_0^{\infty} \bar{P}_o(t) dt, \quad (3)$$

если $P_o(t)$ удовлетворяет условиям нормирования, т.е. $P_o(t) = 0$ и $P_o(\infty) = 1$.

ВЕРОЯТНОСТЬ АВАРИИ

Авария АТК «ОЗ – 2СБ» на интервале $[0, t]$ произойдет через время γ , если скрытый отказ канала защиты по мощности случится после скрытого отказа канала защиты по температуре, но до отказа ОЗ, и через время $\gamma + \alpha$, если скрытый отказ канала защиты по температуре совершится после того, как канал защиты по мощности перейдет в состояние скрытого отказа, однако до отказа ОЗ.

Отсюда вероятность того, что будут реализованы цепочки отказов, ведущих к останову АТК «ОЗ – 2СБ», на интервале $[0, t]$, равна

$$P_A(t) = MP((\eta_1 \vee \eta_2) \wedge t < \gamma I_{\eta_1 > \eta_2} + (\gamma + \alpha) I_{\eta_1 \leq \eta_2} < t),$$

где $\eta_1 \vee \eta_2 = \max(\eta_1, \eta_2)$.

Проведя ряд аналитических преобразований, получим

$$P_A(t) = F_{\gamma}(t) \int_0^t F_{\eta_2}(y) dF_{\eta_1}(y) - \int_0^t F_{\gamma}(y) F_{\eta_2}(y) dF_{\eta_1}(y) + \\ + S(t-\alpha) \left(F_{\gamma}(t-\alpha) \int_{\alpha}^t F_{\eta_1}(y) dF_{\eta_2}(y) - \int_{\alpha}^t F_{\gamma}(y-\alpha) F_{\eta_1}(y) dF_{\eta_2}(y) \right). \quad (4)$$

Обозначим интенсивность аварий АТК «ОЗ – 2СБ» за $\sigma_A(t)$. Тогда:

$$\sigma_A(t) = \frac{dP_A(t)/dt}{1-P_A(t)}. \quad (5)$$

Найдем среднее время работы до аварии T_A

$$T_A = \int_0^{\infty} \bar{P}_A(t) dt, \quad (6)$$

если $P_A(t)$ удовлетворяет условиям нормирования.

ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

В качестве примера применения данной модели рассмотрим АТК «ОЗ – 2СБ» с экспоненциальными распределениями наработок на отказ подсистем. Пусть $F_{\gamma}(t) = 1 - e^{-tv}$ – функция распределения наработок на отказ ОЗ с интенсивностью v , $F_{\xi_1}(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t}$ – функция распределения наработок до ложных отказов канала защиты по мощности с интенсивностью λ_1 , $F_{\eta_1}(t) = 1 - e^{-\mu_1 t}$ – функция распределения наработок до скрытых отказов канала защиты по мощности с интенсивностью μ_1 , а $F_{\eta_2}(t) = 1 - e^{-\mu_2 t}$ – функция распределения наработок до скрытых отказов канала защиты по температуре с интенсивностью μ_2 . Пусть параметры комплекса будут следующими, если не оговорено особо: $\alpha = 0.1$ ч, $v = 10^{-5}$ ч $^{-1}$, $\lambda_1 = 10^{-5}$ ч $^{-1}$, $\mu_1 = 10^{-5}$ ч $^{-1}$, $\mu_2 = 10^{-5}$ ч $^{-1}$.

Для получения вероятности останова подставим функции распределения в (1):

$$P_o(t) = 1 - e^{-t\lambda_1} \left(1 - \frac{v}{v + \mu_1} (1 - e^{-(v + \mu_1)t}) + vS(t - \alpha)e^{-\alpha\mu_2} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{1 - e^{-(v + \mu_1 + \mu_2)(t - \alpha)}}{v + \mu_1 + \mu_2} - \frac{1 - e^{-(v + \mu_2)(t - \alpha)}}{v + \mu_2} \right) \right) \quad (7)$$

С помощью данной зависимости, задавая максимально допустимую вероятность останова, можно находить время эксплуатации системы, по истечении которого рекомендуется провести профилактический осмотр для предотвращения останова.

Подставив (7) в (2), получим интенсивность остановов комплекса:

$$\sigma_o(t) = \lambda_1 + \frac{e^{-tv} \left(e^{-t\mu_1} + S(t - \alpha)e^{\alpha v} e^{-t\mu_2} (1 - e^{-\mu_1(t - \alpha)}) \right)}{\frac{1}{v} - \frac{1}{v + \mu_1} (1 - e^{-(v + \mu_1)t}) + S(t - \alpha)e^{-\alpha\mu_2} \left(\frac{1 - e^{-(v + \mu_1 + \mu_2)(t - \alpha)}}{v + \mu_1 + \mu_2} - \frac{1 - e^{-(v + \mu_2)(t - \alpha)}}{v + \mu_2} \right)}$$

Интенсивность остановов АТК «ОЗ – 2СБ» монотонно убывает, стремясь к стационарному значению, которое при $t \rightarrow \infty$ равно λ_1 , т.е. интенсивности ложного отказа канала защиты по мощности.

Используя граничные значения времени в выражение для вероятности останова, получим, что $P_o(0) = 0$ и $P_o(\infty) = 1$, это означает, что вероятность останова удовлетворяет условиям нормировки, поэтому, подставив (7) в (3), получим выражение для среднего времени до останова комплекса при $\lambda_1 \neq 0$

$$T_o = \frac{1}{\lambda_1} \left(\frac{\mu_1 + \lambda_1}{v + \mu_1 + \lambda_1} - \frac{v\mu_1 e^{-\alpha(\mu_2 + \lambda_1)}}{(\lambda_1 + v + \mu_2)(v + \mu_1 + \mu_2 + \lambda_1)} \right)$$

Если $\lambda_1 = 0$, то необходимо отнормировать $P_o(t)$ заново с учетом этого условия.

Зависимость среднего времени до останова АТК от скрытых отказов K_T совпадает с зависимостью среднего времени до останова АТК от скрытых отказов K_N в силу того, что в рассматриваемом примере интенсивности этих отказов совпадают.

Видно, что при больших значениях интенсивности отказов ОЗ и ложных отказов каналов защиты по мощности в активной зоне среднее время до останова очень мало и $T_o \rightarrow 0$ при $v \rightarrow \infty$ или $\lambda_1 \rightarrow \infty$. При возрастании интенсивности скрытых отказов каналов защиты m_1 наблюдается обратная ситуация – среднее время до останова увеличивается, однако это происходит за счет уменьшения среднего времени до аварии (см. ниже), т.е. среднее время работы все равно будет уменьшаться. Среднее время

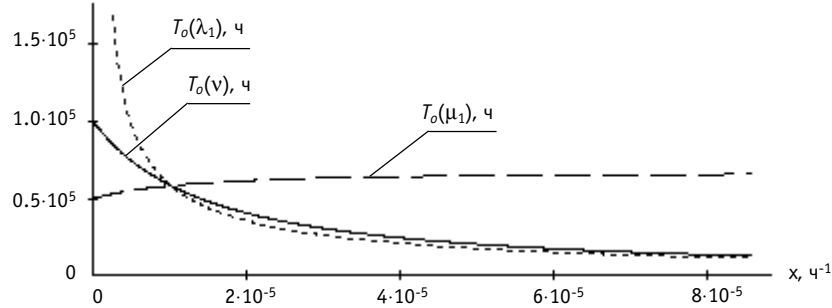


Рис. 2. Зависимость среднего времени до останова АТК «03 – 2СБ» от параметров

до останова удобно применять при оценке надежности систем, функционирование которых допускает перерывы в работе.

Для вычисления вероятности аварии АТК «03 – 2СБ» подставим функции распределения наработок до отказа в (4) и получим

$$P_A(t) = e^{-tv} \left(\frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} (1 - e^{-t(\mu_1 + \mu_2)}) - (1 - e^{-t\mu_1}) \right) + \frac{\mu_1}{\mu_1 + v} (1 - e^{-t(\mu_1 + v)}) + \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2 + v} \times \\ \times (1 - e^{-t(\mu_1 + \mu_2 + v)}) + S(t - \alpha) e^{-\alpha\mu_2} \left(e^{-v(t - \alpha)} \left(\frac{\mu_2 e^{-\alpha\mu_1}}{\mu_1 + \mu_2} (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2)(t - \alpha)}) - (1 - e^{-\mu_2(t - \alpha)}) \right) + \right. \\ \left. + \frac{\mu_2 e^{-\alpha v}}{\mu_2 + v} (1 - e^{-(\mu_2 + v)(t - \alpha)}) + \frac{\mu_2 e^{-\alpha(\mu_1 + v)}}{\mu_1 + \mu_2 + v} (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2 + v)(t - \alpha)}) \right) \quad (8)$$

Подставив (8) в (5), получим интенсивность аварий рассматриваемого комплекса:

$$\sigma_A(t) = \frac{e^{-tv}}{1 - P_A(t)} \left(v \left((1 - e^{-t\mu_1}) - \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} (1 - e^{-t(\mu_1 + \mu_2)}) \right) + S(t - \alpha) e^{-\alpha\mu_2} (v e^{\alpha v} \times \right. \\ \left. \times \left((1 - e^{-\mu_2(t - \alpha)}) - \frac{\mu_2 e^{-\alpha\mu_1}}{\mu_1 + \mu_2} (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2)(t - \alpha)}) \right) + \mu_2 e^{-\mu_2(t - \alpha)} (1 - e^{v\alpha}) (1 - e^{\mu_1 t}) \right) \right)$$

Для нахождения среднего времени работы АТК до аварии T_A проверим, удовлетворяет ли $P_A(t)$ условиям нормировки

$$P_A(0) = 0 \text{ и } P_A(\infty) = \frac{\mu_2 (\mu_1 (\mu_2 + v) + (\mu_1 + v) e^{-\alpha(v + \mu_2)} (\mu_1 + \mu_2 + v - (\mu_2 + v) e^{-\alpha\mu_1}))}{(\mu_1 + v)(\mu_2 + v)(\mu_1 + \mu_2 + v)},$$

значит, вероятность аварии несобственная и ее нужно перенормировать.

Из условия нормирования ($P_{AH}(0) = 0$, $P_{AH}(\infty) = 1$) получаем выражение для коэффициента нормирования

$$c = \frac{1}{P_A(\infty) - P_A(0)} = \frac{(\mu_1 + v)(\mu_2 + v)(\mu_1 + \mu_2 + v)}{\mu_2 (\mu_1 (\mu_2 + v) + (\mu_1 + v) e^{-\alpha(v + \mu_2)} (\mu_1 + \mu_2 + v - (\mu_2 + v) e^{-\alpha\mu_1}))},$$

тогда

$$P_{AH}(t) = c P_A(t). \quad (9)$$

Подставив (9) в (6), получим выражение для среднего времени до аварии комплекса T_A при $\mu_1 + \mu_2 \neq 0$

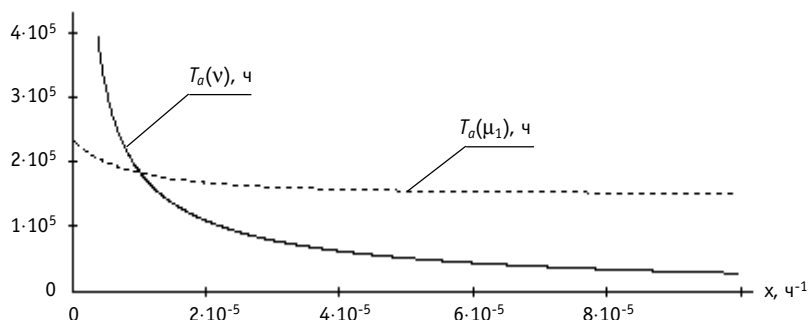


Рис. 3. Зависимость среднего времени до аварии АТК «ОЗ – 2СБ» от параметров

$$T_A = c \left(\frac{\mu_2}{v(\mu_1 + \mu_2)} - \frac{v}{(\mu_1 + v)^2} + \frac{v\mu_1}{(\mu_1 + \mu_2)(\mu_1 + \mu_2 + v)^2} + e^{-\alpha\mu_2} \left(\frac{\mu_1 + \mu_2(1 - e^{-\alpha\mu_1})}{v(\mu_1 + \mu_2)} + \frac{\mu_2 e^{-\alpha\mu_1}}{\mu_1 + \mu_2 + v} \left(\frac{1}{\mu_1 + \mu_2} - \frac{e^{-\alpha v}}{\mu_1 + \mu_2 + v} \right) - \frac{v + \mu_2(1 - e^{-\alpha v})}{(\mu_2 + v)^2} \right) \right)$$

На рис. 3 приведены зависимости T_A от параметров. Зависимость среднего времени до аварии комплекса от интенсивности наработок до скрытого отказа канала защиты по температуре $T_A(\mu_2)$ аналогична зависимости $T_A(\mu_1)$. Видно, что $T_A(v) \rightarrow \infty$ при $v \rightarrow 0$ (если никогда не произойдет отказа ОЗ, то АТК никогда не перейдет в аварийное состояние).

Рассмотрим зависимости показателей надежности комплекса от интенсивностей отказов отдельных подсистем при фиксированном времени $t = 1 \cdot 10^5$ ч, если не оговорено особо.

Сначала проанализируем зависимости вероятностей того, что по прошествии фиксированного времени произойдет останов (рис. 4) или авария (рис. 5) АТК «ОЗ – 2СБ» от интенсивностей отказов отдельных подсистем.

На основе анализа полученных результатов можно делать выводы о целесообразности модернизации той или иной подсистемы с целью повышения надежности комплекса в целом. Точка пересечения кривых – это такое значение переменного параметра, при котором вероятность останова или аварии АТК одинакова при разных наборах наработок на отказ подсистем. Поскольку повышение надежности системы ведет к уменьшению вероятности отказа, то (рис. 4, 5) в данном случае, прежде все-

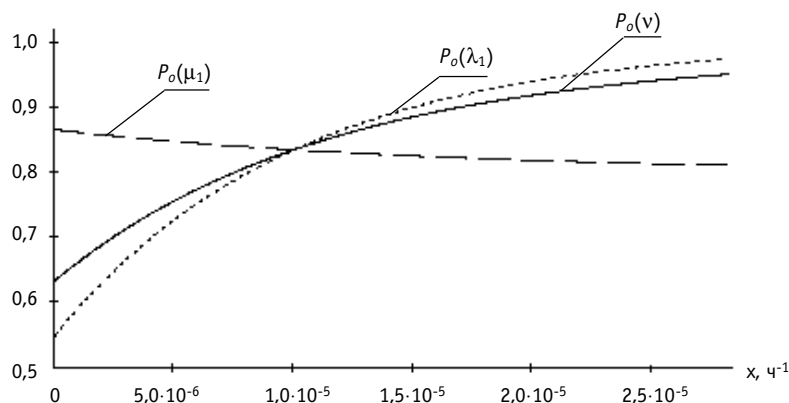


Рис. 4. Зависимости вероятности останова АТК от соответствующих параметров

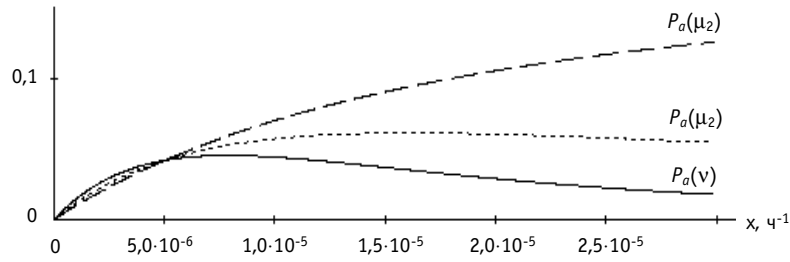


Рис. 5. Зависимости вероятности аварии АТК от соответствующих параметров

го, нужно модернизировать канал защиты по температуре, что незначительно увеличит вероятность останова АТК, но уменьшит вероятность его аварии, потом ОЗ, уменьшая интенсивность его отказов, что приведет к одновременному снижению вероятности перехода комплекса в состояния аварии и останова, и только потом — канал защиты по нейтронному потоку.

Рассмотрим зависимость показателей надежности комплекса от параметра α . При $\alpha = 0$ функциональные различия между системами безопасности пропадают и ОЗ будет контролироваться двумя системами безопасности, работающими параллельно. При $\alpha \ll t$ зависимость показателей надежности от α пренебрежимо мала, что позволяет говорить об отсутствии влияния этого показателя на надежность комплекса в случае невозстанавливаемых систем. Видно, что зависимости $P_o(t)$, $\sigma_o(t)$, T_o , $P_A(t)$, $\sigma_A(t)$ и T_A практически симметричны относительно параметров μ_1 и μ_2 . Полная симметрия достигается при $\alpha = 0$.

Обычно при изучении показателей надежности АЭС полагают, что каналы действуют независимо, проверим, насколько это обоснованно. Для этого предположим, что $\mu_2 = \infty$, т.е. канал защиты по температуре отказывает сразу же в момент начала наблюдения за комплексом. В этом случае за отказами по причине недопустимого изменения нейтронного потока следит только канал защиты по мощности.

Получим следующие выражения для вероятности останова, интенсивности остановов и среднего времени до останова комплекса:

$$P_{o1}(t) = 1 - e^{-t\lambda_1} \left(1 - \frac{v}{v + \mu_1} (1 - e^{-t(v + \mu_1)}) \right),$$

$$\sigma_{o1}(t) = \lambda_1 + \frac{e^{-t(v + \mu_1)}}{\frac{1}{v} - \frac{1}{v + \mu_1} (1 - e^{-t(v + \mu_1)})},$$

$$T_{o1} = \frac{\mu_1 + \lambda_1}{\lambda_1(v + \mu_1 + \lambda_1)}.$$

Если построить графики этих величин, можно увидеть, что они похожи на графики их аналогов для системы с двумя каналами защиты, полученные выше. Для оценки отклонения используем следующие функции:

$$\Delta P_o(t) = \frac{P_o(t) - P_{o1}(t)}{P_o(t)}, \quad \Delta \sigma_o(t) = \frac{\sigma_o(t) - \sigma_{o1}(t)}{\sigma_o(t)},$$

$$\Delta T_o = \frac{T_o - T_{o1}}{T_o}.$$

Ниже приведем графики некоторых из этих функций:

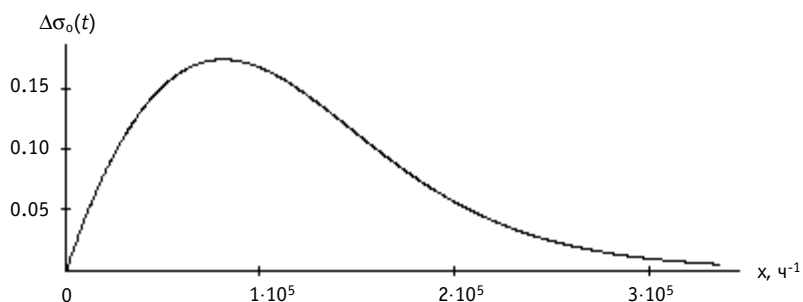


Рис. 6. Зависимости разности интенсивности остановов АТК от времени

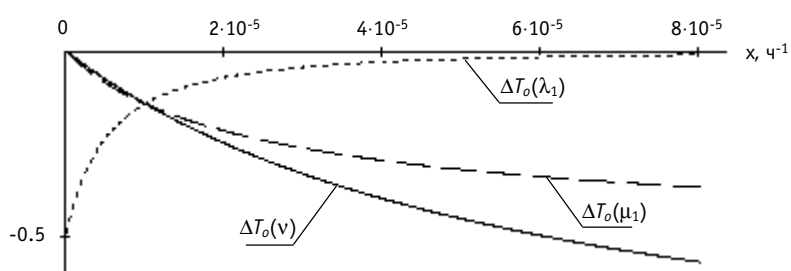


Рис. 7. Зависимости разности среднего времени до останова АТК от параметров

Аналогично получим выражения для вероятности аварии, интенсивности аварий и среднего времени до аварии комплекса:

$$P_{A1}(t) = (1 - e^{-tv}) - \frac{v}{v + \mu_1} (1 - e^{-t(\mu_1 + v)}),$$

$$\sigma_{A1}(t) = \frac{v(1 - e^{-t\mu_1})}{1 + \frac{v}{v + \mu_1}(e^{tv} - e^{-t\mu_1})}, \quad T_{A1} = \frac{2v + \mu_1}{v(\mu_1 + v)}.$$

Как и ранее, для оценки отклонения используем следующие функции:

$$\Delta P_A(t) = \frac{P_A(t) - P_{A1}(t)}{P_A(t)}, \quad \Delta \sigma_A(t) = \frac{\sigma_A(t) - \sigma_{A1}(t)}{\sigma_A(t)}, \quad \Delta T_A = \frac{T_A - T_{A1}}{T_A}.$$

Рассмотрим графики некоторых из этих функций:

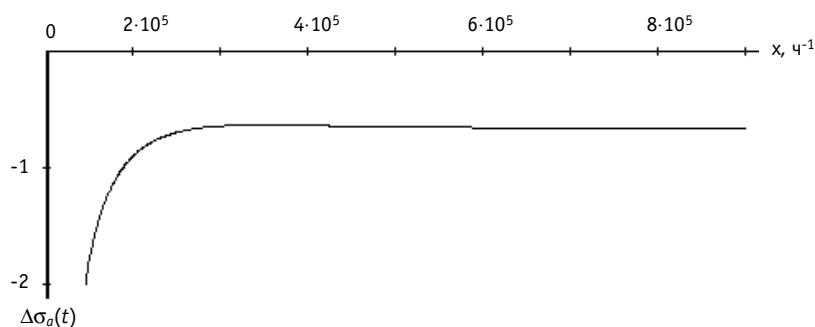


Рис. 8. Зависимости разности интенсивности аварий АТК от времени

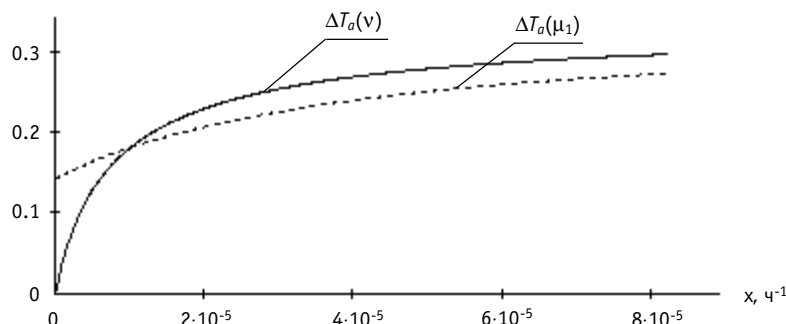


Рис. 9. Зависимости разности среднего времени до аварии АТК от параметров

Из рис. 8 и 9 видно, что разница между показателями надежности, учитывающими связь каналов защиты и не учитывающими эту связь, значительна. Поэтому эту связь обязательно следует принимать во внимание при расчете надежности АЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная математическая модель надежности позволила без каких-либо предположений о законах распределения случайных величин получить соотношения для вероятности того, что останов или авария АТК «ОЗ – 2СБ» наступит на интервале времени $[0, t]$, что дает основание утверждать, что полученные результаты точны. В работе были приведены конкретные примеры, иллюстрирующие применимость данной модели. Вместо функций распределения и интенсивностей отказов, выраженных в аналитическом виде, можно использовать их оценки, являющиеся результатами обработки статистических данных, накопленных в процессе эксплуатации подобных систем.

Также в работе были рассмотрены разности показателей надежности математических моделей, в одной из которых предполагается независимость каналов защиты, а во второй – зависимость последних. Полученные результаты позволяют говорить о том, что современный подход к оценке надежности АЭС, предполагающий независимость каналов защиты, является некорректным, и эту взаимосвязь обязательно нужно учитывать.

Кроме того видно, что для невозстанавливаемых систем задержка реакции системы безопасности на отказ слабо влияет на надежность комплекса в целом.

Литература

1. Емельянов И. Я., Гаврилов П. А., Селиверстов Б. Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. – М.: Атомиздат, 1975. – 280 с.
2. Севастьянов Б. А. Курс теории вероятности и математической статистики. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
3. Henley E., Kumamoto H. Reliability Engineering and Risk Assessment. New York: Prentice-Hall, 1981.
4. Перегуда А. И. Вычисление показателей надежности комплекса объект защиты – система управления и защиты // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90. – Вып. 6. – С. 444-452.
5. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

Поступила в редакцию 14.03.2006

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039:37

Russian Center of Nuclear Science and Education is the Way of Nuclear Engineering Skilled Personnel Training \V.M. Murogov, N.L. Salnikov; – Obninsk, 2006. – 11 pages, 1 illustration, 2 tables.

Nuclear power engineering as the key of nuclear technologies is not only the element of the power market but also the basis of the country's social-economic progress. The defenses, engineering, medicine, science, industry based on nuclear technologies are the way to highly developed country. And the problem of knowledge conversation and transmitting to new generations is the one of knowledge transmitting to developing countries.

The creation of science-research centers consolidating nuclear science and education leads to safeguarding of stability and security in Russia.

Obninsk as the first science town in Russia is the ideal place for the creation of integrated Science-Research Center of Nuclear Science and Technologies – The Russian Center of Nuclear Science and Education («Center» for conservation and development of nuclear knowledge. On the base of Obninsk education and science organizations and State Center «Kurchatov Institute» there was created the Russian Association of Nuclear Science and Education for carrying out of the scientific session with World Nuclear University and IAEA «The role of nuclear technologies in society of XXI century».

УДК 621.039.58: 621.039.52

Computational and Experimental Investigations for Safety Substantiation of ADE-Type Commercial Uranium-Graphite Reactors in Case of Emergency Depressurization of Fuel Channels \S.N. Belousov, O.Yu. Vilensky, N.G. Kuzavkov, A.V. Malkov, V.V. Petrunin, S.F. Shepelev; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 10 illustrations, 1 table. – References, 2 titles.

The paper presents the results of computational and experimental simulation of emergencies with depressurization of fuel channels of ADE-2, ADE-4, ADE-5 production uranium-graphite reactors (PUGR). The adopted concept of emergency progress, methodology and equipment for computational and experimental investigation of emergencies are described: mathematic model, RFCD computer code, and experimental test facility developed and fabricated in OKBM. The results of analyses and full-scale experiments are compared: temperature range of graphite sleeve and block simulators is 300-550°C with impact pressure and flow pulsation with amplitude of ~ 10 MPa and frequency of ~ 100 Hz in depressurization area, which were obtained during preliminary analysis using RFCD computer code. The developed RFCD code and test facility can be also used to analyze safety of pressure-tube reactor (RBMK).

УДК 621.039.7

Generalization of Risk Concept in Case Risk Components Depend on Time \Yu. V. Volkov; – Obninsk, 2006. – 6 pages, 1 illustration, 1 table. – References, 9 titles.

Ratios of risk assessments vs. nuclear technologies objects have been obtained for cases when such risk components as accident probability and the consequent damage depend on time.

Such generalization of risk concept brings about new possibilities for performing PSA which have been demonstrated with simple models in the present work.

As an example safety of radwaste storage with monopropellant activity has been analyzed with a very simple model.

УДК 621.039.58: 519.873

Generalization of Mathematical Model of Reliability of the Complex «Protection Object – Control and Protection System» \A.I. Pereguda, R.E. Tverdohlebov; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 9 illustrations. – References, 5 titles.

Different control criterions are often used for security system's reliability improvement. Nowadays this feature isn't taken into account in analysis of reactor facility's security system as a result of absence of appropriate mathematic reliability model.

In this paper shown, that taking into account mentioned above features allows to obtain more precise values of reliability index rather than in a case of assumption that different control criterions protection channels are independent.

УДК 621.039.56

Using of Dynamic Programming Method for Optimization Trajectory Workers' Movement at Emission of Rays Threat Zone with the Purpose of Minimization Radiation Processing \A.N. Seseikin, O.L. Tashlykov, S.E. Sheklein, M.J. Kuklin, A.G. Chentsov, A.A. Kadnikov; – Obninsk, 2006. – 8 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 14 titles.

Relevance of solving of optimization's problem of trajectory workers' movement at emission of rays threat zone is substantiated.

Mathematical analysis of opportunity to use of dynamic programming method in solving of given problem was made and advantages of these method were considered.

Evaluation calculations of optimal movement's trajectory were made. shortening irradiations in different variants of in and out zone of controlled access with initial was compared.

УДК 621.039.516.4

Some Specific Features in Neutron Physics of VVER-Type Reactors under Operation Regime of Accelerated Weapon-Grade Plutonium Denaturing \Yu.N. Volkov, V.I. Naumov; – Obninsk, 2006. – 8 pages, 3 tables. – References, 9 titles.

The paper presents the results obtained in neutron-physical computations, which simulate main properties of VVER-type reactor cores partially loaded with weapon-grade plutonium for its accelerated denaturing. Effective fraction of delayed neutrons was used as a criterion that limits the number of plutonium fuel assemblies inserted in the reactor core. Isotopic composition of plutonium was used as a criterion that limits plutonium burn-up. The following aspects are discussed in the paper: potential ways towards increasing a throughput of VVER-type reactors on weapon-grade plutonium denaturing and neutron-physical features of VVER-type reactor cores under operation regime of accelerated weapon-grade plutonium denaturing.

УДК 621.039.534.6

Influence of the Isotopical Composition of Coolant, Based on Lead from Thorium-Ores, on Void Reactivity Effect in BREST-type Reactor \V.S. Okunev; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 4 illustrations, 1 table. – References, 11 titles.

The lead cooled fast reactors are one of few concepts of the new-generation (Generation-IV) power nuclear reactors. The ideals of natural safety are attainable for the lead cooled reactors (for example, BREST). In this type power reactor is proposed to use natural lead with 1,4% ^{204}Pb – 23,6% ^{206}Pb – 22,6% ^{207}Pb – 52,4 % ^{208}Pb – isotopical composition.

The BREST-concept has potential reserves for further increase of inherent safety level. (If this to be needed.) It is weighly for the high-power reactors. Lead with high concentration of ^{208}Pb -isotope utulization is one of such reserve. The isotopes dressing of lead are costly. But, it is known that ^{208}Pb is product of radio-active decay of the ^{232}Th . The half-live of ^{232}Th is $1,4 \cdot 10^{10}$ years. Therefore, approximately 20% of thorium was transmuted into ^{208}Pb . The thorogeneous lead can be used as a coolant of the fast reactors.

Choise of the preferables deposits of lead and optimisation of the isotopical composition of lead (as the coolant of the fast reactors) are interesting for future large-scale nuclear power engineering, based on safe reactors.

УДК 621.039.51

Investigation of the Point Model of the Xenon Oscillations \N.O. Ryabov, A.A. Semenov; – Obninsk, 2006. – 8 pages, 6 illustrations, 1 table. – References, 6 titles.