



УДК 629.162.658

© 2010

В. И. Пампуро

## Информационный анализ глубокоэшелонированной защиты АЭС

(Представлено академиком НАН Украины В. П. Кухарем)

*Проведено аналіз ефективності глибокоешелонованого захисту АЕС. Викладено випадки як імовірної моделі аварії, так і моделі віртуальної аварії. Розглянуто контур запобігання аварії та контур її послаблення. Наведені оцінки віртуальної аварії для прикладу реактора з двома контурами керування. Доведено, що найбільшу ефективність керування безпекою має контур запобігання аварії.*

Информационный анализ безопасности АЭС основан на структурной теории управления безопасностью [1–3]. Этот анализ заключается в учете многоконтурной системы обеспечения безопасности АЭС согласно стохастической обратной связи. Особенности информационного подхода к обеспечению безопасности рассмотрим на примере анализа риска плавления активной зоны (АкЗ) реактора АЭС с потерей теплоносителя из-за разрыва трубопровода. Этот пример изложен во многих публикациях, касающихся применения метода дерева событий [4–6]. Методологические ограничения метода дерева событий рассмотрены в [3, 7]. Исключающий эти ограничения информационный анализ безопасности АЭС целесообразно рассмотреть для двух вариантов примера. В первом варианте постулируется вероятностная модель (статистическая устойчивость) события аварии, как это принято в существующей теории безопасности. Во втором варианте постулируется модель виртуальной аварии [2, 3].

**Первый вариант — сценарий статистически устойчивой аварии.** Исходное событие  $\bar{\varepsilon}_A$  плавления АкЗ есть разрыв трубопровода [4–6]. Подсистемы системы предупреждения характеризуются следующими событиями работоспособности:  $\varepsilon_B$  — подсистемы электроэнергии  $B$ ;  $\varepsilon_C$  — подсистемы аварийного охлаждения АкЗ  $C$ ;  $\varepsilon_D$  — подсистемы удаления продуктов деления  $D$ . Система ослабления состоит из подсистемы защитной оболочки  $E$ , событие работоспособности которой  $\varepsilon_E$ . Вероятности событий работоспособности подсистем —  $P_A, P_B, P_C, P_D$  и  $P_E$ . События отказов подсистем —  $\bar{\varepsilon}_A, \bar{\varepsilon}_B, \bar{\varepsilon}_C, \bar{\varepsilon}_D, \bar{\varepsilon}_E$ , а их вероятности —  $R_A, R_B, R_C, R_D$  и  $R_E$ .

В общем случае дерево событий структуры из четырех подсистем содержит  $m = 2^4 = 16$  путей (ветвей, сценариев) возможной аварии [4–6]. Каждому  $i$ -му пути соответствует его

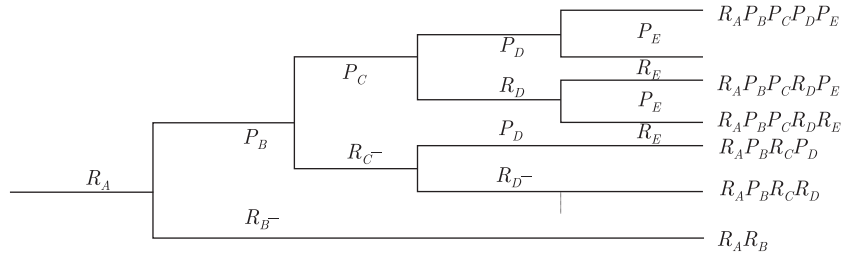


Рис. 1. Преобразованное экспертом дерево событий развития аварии с потерей теплоносителя из-за разрыва трубопровода



Рис. 2. Граф первого контура управления безопасностью: *a* — граф безопасности, *б* — граф опасности  $\varepsilon_y = \varepsilon_B \varepsilon_C \varepsilon_D$

вероятность  $P_i$ . Например, вероятность первого пути  $P_1 = R_A P_B P_C P_D P_E$ , вероятность второго пути  $P_2 = R_A P_B P_C P_D R_E$  и т. д. В американских методиках на основе экспертного анализа из исходного дерева событий исключается ряд путей развития аварии, как невозможных. В упрощенном дереве событий остаются только те пути, которые, по мнению эксперта, имеют практическую возможность (рис. 1). Как показано в [3, 7], приведенное на рис. 1 дерево событий имеет существенные ошибки, так как, в частности, не содержит контуров управления безопасностью.

Согласно теории управления надежностью выделим два контура управления в примере плавления АкЗ из-за разрыва трубопровода [1–3]. *Первый контур* служит для предупреждения плавления АкЗ, событие работоспособности которой  $\varepsilon_k$ . Он содержит объект управления — АкЗ и систему управления — подсистемы *B*, *C* и *D*. Граф событий первого контура управления безопасностью приведен на рис. 2, *a*. Так как подсистемы *B*, *C* и *D* выполняют разные функции в системе управления, их координатные ребра в графе событий соединены последовательно (см. рис. 2, *a*). В связи с этим событие безотказности системы управления  $\varepsilon_y$  равно произведению событий подсистем:  $\varepsilon_y = \varepsilon_B \varepsilon_C \varepsilon_D$ . Трубопровод является элементом АкЗ. Поэтому из-за неполных исходных данных полагаем, что вероятность события работоспособности АкЗ  $\varepsilon_k$  равна вероятности события работоспособности трубопровода  $\varepsilon_A$ . Соответственно, вероятность события работоспособности АкЗ  $P(\varepsilon_k) = P(\varepsilon_A) = P_k$ , а вероятность события отказа АкЗ  $P(\bar{\varepsilon}_k) = P(\bar{\varepsilon}_A)$ .

Событие собственного входного потока информации  $\theta_{\text{вх}}^{(1)}$  определяет продукты деления в АкЗ до аварии, а событие выходного потока информации  $\theta_{\text{вых}}^{(1)}$ , равное  $\theta_{\text{вых}}^{(1)} = \varepsilon_{k1} \theta_{\text{вх}}^{(1)}$ , определяет продукты деления в АкЗ после возможной аварии [1, 3].

Так как событие выходного потока информации  $\theta_{\text{вых}}^{(1)} = \varepsilon_{k1} \theta_{\text{вх}}^{(1)}$ , для независимых событий вероятность

$$P(\theta_{\text{вых}}^{(1)}) = P_{k1} P(\theta_{\text{вх}}^{(1)}), \tag{1}$$



Рис. 3. Граф второго контура управления безопасностью: *a* — граф безопасности, *б* — граф опасности

где для независимого события  $\varepsilon_k$  вероятность надежной работы первого контура [1–3]

$$P_{k1} = \frac{P_k}{1 - P(\varepsilon_y)R_k}. \quad (2)$$

Для независимых  $\varepsilon$ -событий подсистем системы управления вероятность  $P(\varepsilon_y) = P(\varepsilon_B\varepsilon_C\varepsilon_D) = P_BP_CP_D$ .

Анализ опасности выхода продуктов деления в пределах защитной оболочки АкЗ из-за отказов элементов первого контура выполняется согласно графу опасности первого контура (см. рис. 2, *б*), где чертой сверху обозначены события отказов. Из-за отказа первого контура событие выбросов в пределах защитной оболочки  $\theta_{\text{выб}}^{(1)}$  определяет продукты деления. Вероятность события выбросов  $\theta_{\text{выб}}^{(1)}$  графа событий (см. рис. 2, *б*) для независимого события  $\theta_{\text{вх}}^{(1)}$  [1–3] равна

$$P(\theta_{\text{выб}}^{(1)}) = P(\theta_{\text{вх}}^{(1)}) - P(\theta_{\text{выб}}^{(1)}) = R_{k1}P(\theta_{\text{вх}}^{(1)}). \quad (3)$$

Вероятность отказа первого контура  $R_{k1} = (1 - P_{k1})$  с учетом  $P_{k1}$  (2) равна

$$R_{k1} = \frac{R_k R(\varepsilon_y)}{1 - P(\varepsilon_y)R_k}. \quad (4)$$

Вероятность отказа системы предупреждения первого контура для независимых  $\varepsilon$ -событий ее подсистем

$$R(\varepsilon_y) = R(\varepsilon_B\varepsilon_C\varepsilon_D) = 1 - P(\varepsilon_y), \quad \dots, \quad P(\varepsilon_y) = P(\varepsilon_B\varepsilon_C\varepsilon_D) = P_BP_CP_D.$$

*Второй контур* (рис. 3) служит для недопущения выхода продуктов деления за пределы защитной оболочки в случае плавления АкЗ (отказа первого контура). Второй контур содержит объект управления — первый контур и подсистему защитной оболочки  $E$ , рассматриваемую как систему управления. Со вторым контуром (см. рис. 3) связаны событие работоспособности (безотказности) первого контура  $\varepsilon_{k1}$ , событие отказа которого  $\bar{\varepsilon}_{k1}$ , и событие работоспособности защитной оболочки  $\varepsilon_E$ , событие отказа которой  $\bar{\varepsilon}_E$ . Событие выходного потока информации  $\theta_{\text{выб}}^{(2)}$  определяет продукты деления в пределах защитной оболочки  $E$  из-за отказов первого и второго контуров (при наличии выбросов за пределы защитной оболочки). Для независимого события  $\theta_{\text{вх}}^{(1)}$  вероятность

$$P(\theta_{\text{выб}}^{(2)}) = P_{k2}P(\theta_{\text{вх}}^{(1)}), \quad (5)$$

где вероятность надежной работы второго контура управления [1–3]

$$P_{k2} = \frac{P_{k1}}{1 - P_ER_{k1}}. \quad (6)$$

Согласно графу опасности второго контура (см. рис. 3, б), событие выброса продуктов деления из-за отказов двух контуров  $\theta_{\text{выб}}^{(2)} = \theta_{\text{вх}}^{(1)} - \theta_{\text{вых}}^{(2)}$  [1–3]. Вероятность события

$$P(\theta_{\text{выб}}^{(2)}) = P(\theta_{\text{вх}}^{(1)}) - P(\theta_{\text{вых}}^{(2)}) = R_{\text{к2}}P(\theta_{\text{вх}}^{(1)}), \quad (7)$$

где вероятность отказа двух контуров управления для независимых событий [1, 3]

$$R_{\text{к2}} = \frac{R_{\text{к1}}R_E}{1 - P_ER_{\text{к1}}}. \quad (8)$$

Для пессимистических исходных данных  $P_K = P_B = P_C = P_D = 0,9$  значения показателей (2), (4), (6) и (8) соответственно равны  $P_{\text{к1.0}} = 0,9708$ ,  $R_{\text{к1.0}} = 0,0292$ ,  $P_{\text{к2.0}} = 0,997$ ,  $R_{\text{к2.0}} = 0,003$ . Для оптимистических данных  $P_K = P_B = P_C = P_D = 0,99$  значения показателей составляют:  $P_{\text{к1.0}} = 0,9997$ ,  $R_{\text{к1.0}} = 0,0003$ ,  $P_{\text{к2.0}} = (1 - 3,1 \cdot 10^{-6})$ ,  $R_{\text{к2.0}} = 3,1 \cdot 10^{-6}$ .

Из приведенного расчета видно, что двухконтурное управление безопасностью, учитывающее контуры предупреждения и ослабления аварии, существенно уменьшает вероятность выброса по сравнению с одноконтурным управлением.

**Второй вариант — сценарий виртуальной аварии.** Виртуальная авария не имеет закономерностей и практически не обязательна, но теоретически ее нельзя исключить из-за отсутствия априорных знаний об аварии и особенно из-за погрешности технологии ее предупреждения [2, 3]. При этом управление безопасностью основывается на закономерностях систем ее предупреждения, с использованием, например, управления по температуре. Предупреждение плавления АкЗ должно выполняться при температуре  $\chi$ , не превышающей температуру парообразования теплоносителя  $z_2$ , которая меньше значения температуры плавления АкЗ  $z_3$ , т. е.  $z_2 < z_3$ . В соответствии с этим, критерий безопасного состояния АкЗ определяется условием  $\chi < z_2$ , которое можно рассматривать и как критерий надежности первого контура. Соответственно, критерий отказа АкЗ сводится к условию  $\chi > z_2$ . Если температура теплоносителя  $\chi$  достигнет температуры парообразования  $z_2$ , должны сработать система защиты и прекратиться выделение ядерной энергии. Из-за погрешности система защиты может не сработать даже при условии  $\chi > z_2$ . В результате может произойти авария. Чтобы избежать такого сценария аварии, необходимо определить интервал запаса управляемости безопасностью АкЗ первым контуром предупреждения плавления АкЗ:

$$\Delta_1^{(1)} = [z_1, z_2]. \quad (9)$$

Заметим, что первый интервал запаса управляемости безопасностью  $\Delta_1^{(1)}$  рассматривается как интервал неустойчивого управления из-за возможности выхода температуры теплоносителя  $\chi$  за верхнюю границу интервала  $z_2$  вследствие погрешности управления. Чтобы исключить состояние неустойчивого управления, необходимо поддерживать работоспособное состояние АкЗ на интервале устойчивости управления первого контура

$$\exists_1^{(1)} = [0, z_1], \quad (10)$$

где  $z_1$  — значение температуры, меньше значения температуры  $z_2$  на длину  $W_1$  первого интервала запаса управляемости безопасностью АкЗ первым контуром:

$$W_1^{(1)} = z_2 - z_1. \quad (11)$$

Примерное значение длины  $W_1^{(1)} = z_2 - z_1 \approx 20$  °С. Тогда система защиты должна срабатывать при условии  $\chi = z_1$ , а не при условии  $\chi = z_2$ , где  $z_1 < z_2$ . На графах первого и второго контуров управления (см. рис. 2, 3) система защиты не показана. Это сделано для сопоставления графов первого и второго контуров управления с деревом событий, приведенным на рис. 1. Поэтому предупреждение плавления АкЗ будем рассматривать только за счет системы первого контура управления безопасностью. Влияние системы защиты на безопасность АкЗ будет учтено после анализа предупреждения плавления.

Чтобы гарантировать предупреждение плавления АкЗ с помощью первого контура, необходимо обеспечить запас его надежности на величину погрешности первого контура. С учетом погрешности первого контура необходимо уменьшить значение вероятности отказа первого контура управления безопасностью  $R_{10}$ . Для этого следует учесть второй, *вероятностный интервал запаса управляемости безопасностью первым контуром* [2, 3]:

$$\Delta_2^{(1)} = [R_{11}, R_{10}]. \quad (12)$$

Здесь для пессимистических исходных данных значение вероятности отказа первого контура  $R_{10} = R_{к1.0} = 0,0292$ ;  $R_{11}$  — нижняя граница вероятностного интервала первого контура  $\Delta_2^{(1)}$ , которая меньше значения вероятности отказа первого контура на длину  $W_2^{(1)}$  вероятностного интервала:

$$W_2^{(1)} = R_{10} - R_{11}. \quad (13)$$

Чтобы найти значение длины  $W_2^{(1)}$  (13), требуется определить абсолютную погрешность  $\Delta P_{к1}$  структурной функции  $P_{к1}$  (2). Абсолютная погрешность  $\Delta P_{к1}$  есть случайная величина, зависящая от случайных абсолютных погрешностей  $\Delta P_j$ ,  $j = B, C, D, K$ , — аргументов функции  $P_{к1}$  (2). Для близкого к единице номинального значения функции  $P_{к1.н}$  абсолютная погрешность функции

$$\Delta P_{к1} = P_{к1} - P_{к1.н} = -R_{к1} \quad \text{при} \quad P_{к1.н} \approx 1. \quad (14)$$

Для номинальных значений аргументов  $P_{кн} = P_{Bн} = P_{Cн} = P_{Dн} = 0,9$  номинальное значение функции  $P_{к1.н} = 0,9708$ .

Учитывая равенство (14), абсолютная погрешность функции [2, 8, 9]

$$\Delta P_{к1} \cong -[S_{B1}^* R_B + S_{C1}^* R_C + S_{D1}^* R_D + S_K^* R_K], \quad (15)$$

где чувствительности

$$S_j^* = \frac{\partial P_{к1} / \partial P_j}{P_{j0}} \quad \text{при} \quad P_j \neq 0, \quad j = B, C, D, K. \quad (16)$$

Здесь  $P_{j0}$  — номинальные (расчетные) значения аргументов  $P_k = P_B = P_C = P_D$  функции  $P_{к1}$  (2), равные  $P_{j0} = 0,9$ . Для функции  $P_{к1}$  (2) чувствительности (16) равны

$$S_{B1}^* = \frac{P_C P_D R_K}{H_1}; \quad S_{C1}^* = \frac{P_B P_D R_K}{H_1}; \quad S_{D1}^* = \frac{P_B P_C R_K}{H_1}; \quad (17)$$

$$S_K^* = (1 - P_B P_C P_D) / H_1 P_K; \quad H_1 = 1 - P_B P_C P_D R_K.$$

Согласно исходным данным  $P_B = P_C = P_D = 0,9$  и  $R_k = 0,1$ , значения чувствительностей  $S_{B1}^* = S_{C1}^* = S_{D1}^* = 0,08738$ ;  $S_k^* = 0,3248$ .

При условии, что математическое ожидание функции  $P_{k1}$  равно номинальному значению  $P_{k1.n}$ , абсолютная погрешность  $\Delta P_{k1}$  (14) является центрированной случайной величиной. Тогда ее математическое ожидание равно нулю. Для независимых случайных аргументов  $P_k, P_B, P_C, P_D$  среднее квадратическое абсолютной погрешности  $\Delta P_{k1}$  (15)

$$\sigma_{k1} \cong [(S_{B1}^* \sigma_B)^2 + (S_{C1}^* \sigma_C)^2 + (S_{D1}^* \sigma_D)^2 + (S_k^* \sigma_k)^2]^{1/2}. \quad (18)$$

При номинальных значениях вероятностей аргументов  $P_k = P_B = P_C = P_D = 0,9$  значения случайных величин  $R_B, R_C, R_D, R_k$  принадлежат интервалу  $[0; 0,1]$ . Для распределенных по нормальному закону случайных величин  $R_B, R_C, R_D, R_k$ , значения их средних квадратических можно принять равными  $\sigma_k = \sigma_B = \sigma_C = \sigma_D = 0,01$ . Соответственно, среднее квадратическое случайной величины  $\Delta P_{k1}$  равно  $\sigma_{k1} = 3,58 \cdot 10^{-3}$ .

Длина  $W_2$  (13) принимается равной вероятному интервалу значений случайной величины  $\Delta P_{k1}$ :  $W_2^{(1)} = 3\sigma_{k1} = 1,074 \cdot 10^{-2}$ . Как отмечалось, для  $P_k = P_B = P_C = P_D = 0,9$ , значение вероятности отказа первого контура  $R_{10} = R_{k1.0} = 0,0292$ . Учитывая это и длину вероятностного интервала запаса  $W_2^{(1)} = 1,074 \cdot 10^{-2}$ , а также формулу (13), получаем значение нижней границы вероятностного интервала запаса (13) — показателя отказа первого контура:

$$R_1 = R_{k1}^* = R_{10} - W_2^{(1)} = 0,0185.$$

Чтобы обеспечить требуемое значение показателя отказа первого контура  $R_{k1}^* = 0,0185$ , следует увеличить значение вероятности работоспособности первого контура  $P_{k1}^* = P(\chi \leq z_1) = (1 - R_{k1}^*)$  до значения  $P_{k1}^* = 1 - R_{k1}^* = 0,9815$ . Соответственно, прежнее значение вероятности работоспособности системы управления первым контуром, равное  $P(\varepsilon_y) = P_B P_C P_D = 0,9^3 = 0,729$ , следует увеличить с учетом скорректированного значения вероятности работоспособности первого контура  $P_{k1}^* = 0,9815$ . Согласно формуле (2) и значениям  $P_k = 0,9$  и  $R_k = 0,1$ , требуемое значение работоспособности системы управления первым контуром равно  $P^*(\varepsilon_y) = (P_{k1}^* - P_k)/R_k P_{k1}^* = 0,8304$ . Соответственно, значение вероятностей безотказной работы подсистем, обеспечивающих управление безопасностью первого контура, необходимо со значений  $P_B = P_C = P_D = 0,9$  увеличить до значений  $P_B = P_C = P_D = 0,943$ .

Рассмотренная система управления безопасностью первого контура необходима, но не достаточна для предотвращения плавления АкЗ. Как отмечалось, если температура теплоносителя  $\chi$  достигнет температуры парообразования  $z_2$ , должны сработать система защиты и прекратиться выделение ядерной энергии.

Чтобы оценить виртуальную аварию — плавление АкЗ, следует учесть упомянутый выше контур защиты, состоящий из подсистем контроля и защиты. Точную оценку события виртуальной аварии — плавление АкЗ  $\Phi_{\Pi} = (\chi > z_2)$  с учетом контура защиты, как обосновано в [2, 3], определить невозможно из-за отсутствия его закономерностей. Поэтому целесообразно использовать оценку сверху события виртуальной аварии  $\Phi_{\Pi} = (\chi > z_2)$ , как *события потери управляемости безопасностью АкЗ*. Согласно [2, 3] оценка сверху события  $\Phi_{\Pi} = (\chi > z_2)$  равна

$$\text{Оц}(\Phi_{\Pi}) < \frac{R_{k1}^* R_3}{1 - P_3 R_{k1}^*}. \quad (19)$$

где  $P_3 = (1 - R_3)$  — вероятность работоспособности системы контроля и защиты. Вероятность отказа системы контроля и защиты  $R_3$  согласно [2, 3] равна вероятности отказа подсистемы контроля. Вероятность отказа подсистемы контроля вызвана погрешностью измерений значения температуры АкЗ, в результате чего показания контроля  $\mu < z_2$ , тогда как температура теплоносителя  $\chi > z_2$ . Обычно значение вероятности отказа подсистемы контроля  $R_3 = (1 - P_3) \approx P[(\mu < z_2)/(\chi > z_2)] < 0,003 \Rightarrow P_3 \approx 0,997$ , где  $P[(\mu < z_2)/(\chi > z_2)]$  — условная вероятность наступления события  $(\mu < z_2)$  при наличии события  $(\chi > z_2)$ . Для значений  $P_{к1}^* = 0,9815$ ,  $R_{к1}^* = 0,0185$ ,  $R_3 = 0,003$  оценка виртуальной аварии плавления АкЗ (19) удовлетворяет неравенству  $\text{Оц}(\Phi_{п}) < 5,65 \cdot 10^{-5}$ .

Чтобы оценить виртуальную аварию с выбросом продуктов деления за пределы защитной оболочки — виртуального события  $\Phi_A = (\chi > z_3)$ , требуется учесть отказы первого и второго контуров управления, используя граф событий второго контура управления безопасностью, приведенный на рис. 3. Подобно оценке плавления АкЗ (19), находим оценку виртуального события  $\Phi_A = (\chi > z_3)$ :

$$\text{Оц}(\Phi_A) < \frac{\text{Оц}(\Phi_{п})R_E}{1 - P_E \text{Оц}(\Phi_{п})}, \quad (20)$$

где правая часть является показателем отказа второго контура управления с учетом оценки (15). Соответственно, показатель отсутствия отказа второго контура

$$P_{к2} = 1 - \text{Оц}(\Phi_A) > \frac{P_{п}}{1 - P_E \text{Оц}(\Phi_{п})}, \quad (21)$$

где

$$P_{п} = 1 - \text{Оц}(\Phi_{п}) \geq \frac{P_{к1}^*}{1 - P_3 R_{к1}^*}. \quad (22)$$

При  $\text{Оц}(\Phi_{п}) < 5,65 \cdot 10^{-5}$ ,  $P_E = 0,9$ ,  $R_E = 0,1$  значение оценки виртуальной аварии с выходом продуктов деления за пределы защитной оболочки  $\text{Оц}(\Phi_A) < 5,65 \cdot 10^{-6}$ .

Следует заметить, что даже при пессимистических исходных значениях показателей надежности подсистем предупреждения, защиты и ослабления аварии оценка виртуальной аварии (20) имеет достаточно малые значения. Если увеличить надежность защитной оболочки, приняв значение показателя ее работоспособности  $P_E = 0,99$ , то значение оценки виртуальной аварии  $\text{Оц}(\Phi_A) < 5,65 \cdot 10^{-7}$ . Приведенные расчеты показывают достаточно высокую эффективность глубокоэшелонированной защиты в обеспечении безопасности АЭС.

Представляет интерес сравнить эффективность систем предупреждения аварии (системы управления безопасностью и системы защиты первого контура) с системой ее ослабления (подсистемы защитной оболочки). Для этого надо определить абсолютную погрешность показателя отсутствия отказа второго контура  $P_{к2}$ . С этой целью используем правую часть неравенства (21).

Абсолютная погрешность показателя  $P_{к2}$  — правой части неравенства (21)

$$\Delta P_{к2} = -[S_{п} \text{Оц}(\Phi_{п}) + S_E R_E], \quad (23)$$

где чувствительности

$$S_{п} = \frac{R_E}{[1 - P_E \text{Оц}(\Phi_{п})]P_{п}}, \quad S_E = \frac{\text{Оц}(\Phi_{п})}{1 - P_E \text{Оц}(\Phi_{п})}. \quad (24)$$

При  $O_{\Pi}(\Phi_{\Pi}) < 5,65 \cdot 10^{-5}$ ,  $P_{\Pi} > 0,99994$ ,  $R_E = 0,1$ ,  $P_E = 0,9$  значения чувствительностей  $S_{\Pi} = 0,111$ ,  $S_E = 5,65 \cdot 10^{-5}$ .

Пусть максимально допустимое значение оценки виртуальной аварии равно  $\alpha$ . Оно удовлетворяет неравенству

$$\alpha \leq [S_{\Pi} O_{\Pi}(\Phi_{\Pi}) + S_E R_E]. \quad (25)$$

Тогда оптимальное требование к надежности системы предупреждения виртуальной аварии

$$[O_{\Pi}(\Phi_{\Pi})]_{\text{opt}} < \alpha/2S_{\Pi} \approx 4,5\alpha, \quad (26)$$

а оптимальное требование к надежности системы ослабления виртуальной аварии

$$[R_E]_{\text{opt}} = \alpha/2S_E \approx 1,77 \cdot 10^4 \alpha. \quad (27)$$

Следует заметить, что максимально допустимое значение оценки виртуальной  $\alpha$  определяется согласно условию [2, 3]

$$\alpha \leq \frac{q}{h}, \quad (28)$$

где  $q$  — максимально допустимая согласно НРБУ-97/Д-2000 доза выбросов,  $h$  — максимальная доза совокупности продуктов деления, находящихся в реакторе. Если значение максимально допустимой дозы  $q$  задано согласно НРБУ-97/Д-2000 и поэтому известно, то чтобы определить значение максимальной дозы совокупности продуктов деления  $h$ , находящихся в реакторе, необходимы дополнительные исследования. Это объясняется тем, что управление безопасностью АкЗ ведется не только по температуре, но и по совокупности контролируемых величин. Поэтому для задания максимально допустимого значения оценки виртуальной  $\alpha$  (28), необходимо определить дозу  $h$  входного потока информации  $\theta_{\text{вх}}$ , который связан с управлением по температуре.

Анализируя значения чувствительностей (24) и требуемые оптимальные значения надежности первого и второго контуров (26), (27), приходим к выводу, что наиболее эффективным является первый контур управления безопасностью совместно с системой защиты. Это подтверждает тезис об управлении безопасностью АЭС на основе закономерностей технологии предупреждения аварии [2, 3].

Приведенный пример носит сугубо методический характер. Он иллюстрирует концепцию глубокоэшелонированной защиты и приоритет предупреждения аварии, как основы управления безопасностью. Показана важность учета погрешности управления и необходимость запасов управляемости безопасностью АЭС.

Заметим, что расчет вероятностного интервала запаса управляемости безопасностью  $\Delta_2$  реальных объектов атомной энергетики намного сложнее приведенного примера. В реальных условиях кроме температуры требуется учитывать несколько информационных переменных, по которым ведется управление безопасностью АкЗ. Поэтому необходима математическая модель с учетом всей совокупности контуров управления безопасностью по целому ряду контролируемых (не только температуры) величин (информационных переменных). Однако во всех случаях анализа эффективности каждого контура управления безопасностью необходимо и целесообразно исходить из конструктивных принципов управления, учитывая связь значений информационных переменных как продуктов деления (ядерного топлива) внутри реактора, так и подсистем управления безопасностью.



1. Пампуро В. И. Метод разработки математических моделей управления экологической безопасностью объектов // Доп. НАН України. – 1999. – № 1. – С. 197–203.
2. Шестопалов В. М., Пампуро В. И., Шибецкий Ю. А. Проблемы оптимального управления безопасностью геологического захоронения радиоактивных отходов. – Киев, 2008. – 171 с.
3. Пампуро В. И. Управление безопасностью объектов атомной энергетики согласно концепции виртуальной аварии // Доп. НАН України. – 2007. – № 11. – С. 198–204.
4. Хенли Э. Д., Кумато Х. Надежность технических систем и оценка риска. – Москва: Машиностроение, 1979. – 528 с.
5. Уивер Л. Риск от аварии на АЭС с легководными реакторами // Безопасность ядерной энергетики. – Москва: Атомиздат, 1980. – С. 114–133.
6. Бегун В. В., Горбунов О. В., Каденко И. Н. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. – Киев, 2000. – 568 с.
7. Пампуро В. И. Методологические ограничения метода дерева событий // Доп. НАН України. – 2008. – № 12. – С. 161–165.
8. Пампуро В. И. Структурный анализ систем управления безопасностью // Там само. – 2009. – № 12. – С. 194–203.
9. Пампуро В. И. Структурная информационная теория надежности систем. – Киев: Наук. думка, 1992. – 324 с.

Институт электродинамики НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 08.12.2009

## V. I. Pampuro

### Informational analysis of the safety-in-deep of NPP

*Informational analysis of the safety-in-deep of NPP is given. The probabilistic accident model and the virtual accident model are discussed. The prevention accident contour and the contour minimizing the accident consequences minimization are discussed. Virtual accident estimates using the NPP reactor example with two control contours are presented. The prevention accident contour is a more efficient contour of the safety control.*