

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

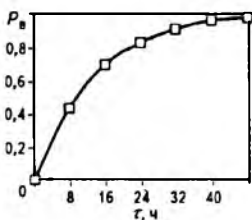
УДК 621.311

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ПРИ ЕЕ ОБЕСТОЧИВАНИИ И НАРУШЕНИИ СВЯЗЕЙ С СИСТЕМОЙ

Аминов Р.З. (Отдел энергетики Поволжья СНЦ РАН),
Игнатов В.И. (Балаковская АЭС)

В настоящее время вероятностный анализ безопасности энергоблоков АЭС стал неотъемлемой частью как при разработках на уровне проекта, так и в процессе эксплуатации оборудования. Во многих странах по результатам такого анализа предельная частота повреждения активной зоны составляет не более 10^{-4} (реакторо-лет) $^{-1}$ (США, Япония, Бельгия, Нидерланды, Швейцария и др.). При этом вероятный выход радиоактивных продуктов деления за пределы АЭС должен быть в 10 или 100 раз меньше. С учетом возможного глобального характера последствий крупных аварий на ядерных реакторах и в связи с ростом их числа в мире эти показатели должны непрерывно ужесточаться. Так, для проектируемых АЭС нового поколения предполагается снизить эти показатели и довести частоту повреждения активной зоны до $< 10^{-5}$ (реакторо-лет) $^{-1}$. Приведенные значения получены в основном на базе усредненных и обобщенных характеристик и показателей и, как правило, не отражают текущего состояния оборудования конкретной АЭС. Однако текущий вероятностный анализ необходим для обнаружения слабых мест в технологическом процессе АЭС с точки зрения ее безопасности для оценки улучшенных показателей надежности оборудования, проектных усовершенствований и других эксплуатационных доработок. Управление качеством на современных АЭС требует определения сроков плановых проверок оборудования, планово-предупредительного ремонта, периодического опробования резервных агрегатов, оценки состояния оборудования, его старения и др.

Выполненный «Атомэнергопроектом» вероятностный анализ безопасности АЭС с водо-водяными реакторами первого уровня, в частности, 4-го блока Балаковской АЭС можно рассматривать как базовый вариант, используемый для формирования методических подходов к решению поставленных задач. В соответствии с этим анализом обесточивание как исходное событие составляет более половины всех вероятностных событий (51,4%), развитие которых может привести к повреждению активной зоны. При этом вклад обесточивания на время более 1 ч в частоту повреждения активной зоны составляет ~ 35% и оказывается самым значительным из всех наиболее вероятных.



Р и с. 1. Функция восстановления связи АЭС с внешней системой

с системой $P_в$ от ее продолжительности $t_с$ (рис. 1). С достаточной степенью точности можно принять, что

интенсивность восстановления $\mu_в = \frac{1}{(1 - P_в)} (dP_в / dt_с)$ постоянна на всем участке $t_с$ и тогда

$$P_в = 1 - \exp(-\mu_в t_с).$$

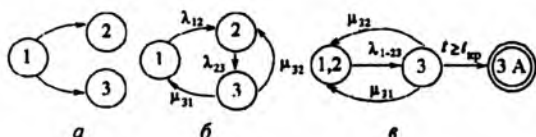
В этой связи изучение возможных ситуаций, связанных с обесточиванием АЭС, можно свести к определению вероятности отказа $P_{(t=t_0)}$ функционирования аварийных собственных нужд в момент времени $t = t_0$ и восстановления этих функций на интервале времени $t > t_0$. Итоговая вероятность отказа основных функций по выводу реакторной установки в холодный резерв в результате обесточивания будет определяться их произведением

Возможные последовательности событий (зависимых и независимых) при появлении обесточивания представляются в виде дерева событий, на котором даются возможные конечные состояния, в том числе и самые нежелательные. Задачей настоящей работы и является определение вероятностей этих состояний. Решение можно получить путем решения марковских уравнений переходов и построения соответствующих графов состояний. Из множества числа аварийных последовательностей можно выделить такие, которые даже при длительном обесточивании не приводят к повреждению активной зоны. Для таких последовательностей необходимо учитывать вероятность возможного восстановления нарушенной связи с энергосистемой $P_в$.

Время восстановления связей является случайной величиной и имеет свою функцию распределения. Используя статистические данные и материалы наблюдений [1—3], можно определить зависимость восстановления связи АЭС

$$P = P_{(t=t_0)} P_{(t>t_0)}$$

Если принять в качестве допущения, что восстановление электроснабжения аварийных собственных нужд в момент обесточивания АЭС путем включения (либо отказа) резервных каналов укладывается в момент времени t_0 , то состояние, соответствующее этому моменту, представлено на рис. 2, а. Здесь λ_{12} характеризует интенсивность (частоту) нарушения связей с энергосистемой. При этом



Р и с. 2. Состояние при обесточивании АЭС в момент $t = t_0$ (а), при $t > t_0$ (б), упрощенное состояние (в): 1 — отсутствие нарушений связи с системой; 2 — связь с системой прервана, выполнение функций одним из резервных каналов; 3 — отсутствие функционирования собственных нужд

$$P_{\lambda}(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_{12} dt\right).$$

При наступлении внешнего обесточивания поочередно в работу включаются независимые резервные каналы электроснабжения собственных нужд. Каждый канал имеет в своем составе резервный источник электропитания (дизель-генератор) и исполнительную систему, состоящую из насосов подачи технической воды, борированной в первый контур для охлаждения зоны путем прокачки и спринклерного насоса. После каждого насоса установлена запорная арматура. Источник питания и перечисленные основные технологические исполнительные элементы образуют последовательную вероятностную цепь. В этом случае вероятность успешного пуска канала P_i будет определяться произведением вероятностей включения резервного источника $P_{д-г}$ и вероятностей выполнения рабочих функций P_j каждым из ответственных исполнительных элементов канала

$$P_i = P_{д-г} \prod_{j=1}^J P_j$$

В том случае, когда имеется дополнительное резервирование источников питания в виде общестанционного дизель-генератора либо линии связи с одной из соседних электростанций, вероятность P_i определяется зависимостью

$$P_i = \left[1 - (1 - P_{д-г})(1 - P_{доп})\right] \prod_{j=1}^J P_j$$

где $P_{доп}$ — вероятность успешного включения в работу дополнительного источника питания.

При наличии нескольких независимых каналов систем безопасности с вероятностью пуска и включения в работу каждого из них P_i достаточной будет для безаварийных условий охлаждения активной зоны реактора успешная работа одного из них. В этом случае вероятность P_3 отказа выполнения своих функций резервными источниками собственных нужд будет определяться соотношением

$$P_{3(t=t_0)} = (1 - P_1) \prod_{i=1}^I (1 - P_i), \quad (1)$$

где I — число независимых резервных каналов вывода реакторной установки в холодное состояние.

В свою очередь вероятность выполнения своих функций одним каналом

$$P_{2(t=t_0)} = (1 - P_1) \left[1 - \prod_{i=1}^I (1 - P_i)\right].$$

С использованием зависимости (1) была рассчитана вероятность $P_{3(t=t_0)}$ отказ на требование каждого дизель-генератора $1,5 \cdot 10^{-2}$, отказ на требование каждого из трех исполнительных механизмов аварийных собственных нужд (включая арматуру) $1,8 \cdot 10^{-2}$.

При наличии трех резервных каналов на блоке вероятность наступления полного обесточивания составляет $1,12 \cdot 10^{-4}$. Сооружение дополнительной связи с соседней электростанцией либо энергосистемой с вероятностью включения в работу в режиме обесточивания АЭС, составляющей 0,999, при тех же условиях приводит к снижению $P_{3(t=t_0)}$ до $5,5 \cdot 10^{-5}$.

С момента времени $t > t_0$ вероятность состояния P_3 будет уменьшаться за счет возможности восстановления связей с системой, а также восстановления одного из всех отказавших резервных источников (рис. 2, б). Здесь учитывается также возможность отказа в процессе работы резервного источника с интенсивностью λ_{23} .

При рассмотрении процессов, связанных с безаварийным выводом реакторной установки в холодный резерв, принципиально может не иметь значения способ восстановления электроснабжения собственных нужд. Это позволяет объединить состояния 1 и 2 в одно и получить упрощенное состояние (рис. 2, в). Здесь время полного обесточивания $t_{кр}$ является критическим. Для любых заданных аварийных последовательностей критическое время определяется расчетным путем. Условие $t_0 < t < t_{кр}$ обеспечивает безопасное прохождение режимов охлаждения активной зоны реактора. При $t > t_{кр}$ состояние 3 переходит в 3А, соответствующее наступлению повреждения активной зоны.

В соответствии с состоянием, показанным на рис. 2, в, можно записать дифференциальные и нормировочные уравнения

$$\frac{dP_{1,2}}{dt} = -\lambda_{1-23}P_1 + P_3(\mu_{32} + \mu_{31});$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \lambda_{1-23}P_1 - P_3(\mu_{32} + \mu_{31});$$

$$P_{1,2} + P_3 = 1,$$

где λ_{1-23} — интенсивность обесточивания собственных нужд АЭС вследствие нарушения системных связей, ч^{-1} .

Решение дифференциальных уравнений с учетом граничных условий (при $t = t_0$, $P_{1,2} = 0$ и $P_3 = 1$) дает следующие конечные зависимости:

$$P_{3(t=t_0)} = \frac{\lambda_{1-23}}{\rho} + \frac{\mu_{31} + \mu_{32}}{\rho} \exp(-\rho t);$$

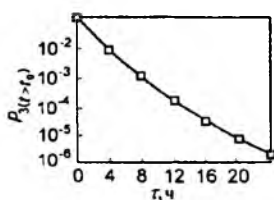
$$P_{1(t=t_0)} = \frac{\mu_{31} + \mu_{32}}{\rho} - \frac{\mu_{31} + \mu_{32}}{\rho} \exp(-\rho t);$$

$$\rho = \lambda_{1-23} + \mu_{31} + \mu_{32}.$$

Подставляя вместо t значения $t_{кр}$, находим условия наступления повреждения активной зоны:

$$P_{3(t=t_{кр})} = \frac{\lambda_{1-23}}{\rho} + \frac{\mu_{31} + \mu_{32}}{\rho} \exp(-\rho t_{кр});$$

$$P_{1(t=t_{кр})} = \frac{\mu_{31} + \mu_{32}}{\rho} (1 - \exp(-\rho t_{кр})).$$



Р и с. 3. Вероятность невыполнения функций собственных нужд при обесточивании в зависимости от его продолжительности

С использованием полученных зависимостей была рассчитана вероятность состояний для следующих условий: $\mu_s = 0,0635 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_{1-23} = 1,1 \times 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$, отказ в процессе работы канала системы безопасности $5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. Интенсивность восстановления каждого канала равна $0,15 \text{ ч}^{-1}$.

Для принятых условий выполнены расчеты текущих вероятностей обесточивания, начиная с момента t_0 (рис. 3). Таким образом, по истечении времени обесточивания вероятность этого состояния $P_{3(t=t_0)}$ круто падает. Примеры расчетов свидетельствуют о существенных резервах повышения безопасности АЭС в связи с системными условиями обесточивания и нарушениями связей.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ (грант 00-02-16097 от 01.04.2000 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кейв Л. Аварии на АЭС, связанные с прекращением подачи электроэнергии на собственные нужды. — Атомная техника за рубежом, 1991, № 2, с. 30—32.
2. Малевинский Г.В. Вероятностный анализ безопасности АЭС «Библис» (ФРГ). — Энергохозяйство за рубежом, 1990, № 4, с. 20—24.
3. Аминов Р.З., Борисенков А.Э., Хрусталев В.А. Оценка частоты внешнего обесточивания энергоблоков АЭС с ВВЭР. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 2, с. 124—128.