

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.311

ЗАДАЧИ НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

Аминов Р.З., Борисенков А.Э., Олейник Н.А.

(Отдел энергетики Поволжья, Саратовский научный центр РАН)

Развитие ядерной энергетики предполагает увеличение числа эксплуатируемых ядерных реакторов, что выдвигает необходимость ужесточения требований к их безопасности. В этих условиях возникают задачи обоснования и оценки приемлемого риска крупных аварий и выбора оправданных путей и средств на повышение безопасности АЭС. Одной из таких задач является определение уровня приемлемого риска при функционировании АЭС и вытекающих из этого показателей надежности важных систем ее безопасности.

В качестве риска принимается среднеожидаемый ущерб, определяемый по формуле

$$R = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y_i,$$

где Y_i — ущерб от крупной i -й аварии, вероятностная частота наступления которой составляет λ_i . Если рассматривать запроектные аварии с расплавлением активной зоны, то их число n принимается равным единице.

При разработке нового поколения энергетических ядерных реакторов необходимо не только снижать вероятность радиационных аварий, но и быть уверенным, что любая из них не приведет к последствиям, ликвидация которых с экономической точки зрения поставит вопрос о целесообразности самого производства электроэнергии на АЭС в обозримом будущем [1].

В результатах вероятностного анализа безопасности, например, Балаковской АЭС представлена количественная оценка частоты повреждения активной зоны. Суммарная по рассмотренным в анализе группам исходных событий частота повреждения активной зоны составляет $8,27 \cdot 10^{-5}$ реактор-год $^{-1}$. Наибольший вклад в ее частоту вносят исходные события с обесточиванием (51,4%).

Рассмотрим подход к нормированию показателей надежности систем безопасности АЭС. В качестве нормативной предлагаем считать такую надежность, при которой реализованы все известные средства ее повышения с затратами на осуществление, не превышающими изменение вероятного риска. Запишем это условие в дифференциальном виде:

$$dZ \leq -dR, \quad (1)$$

где $dZ = dN\Sigma(1+E)'k_{уд}$ — затраты (инвестиции) на мероприятия по повышению надежности систем безопасности (для системы аварийного энергоснабжения АЭС это может быть, например, увеличение кратности резервирования мощности аварийного резерва на dN с удельными затратами $k_{уд}$, приведенными к расчетному году t путем введения коэффициента дисконтирования с нормой дисконта E); $-dR = Yd\lambda$ — уменьшение риска возникновения запроектной аварии при снижении ее вероятностной частоты наступления на $d\lambda$ при ущербе Y .

Очевидно, что при таком подходе дорогостоящие, но менее эффективные с точки зрения повышения надежности и безопасности мероприятия не могут быть реализованы. И наоборот, наиболее дешевые и интенсивно снижающие вероятную частоту появления аварий реализуются в первую очередь. В соответствии с этим условием могут быть определены мероприятия, которые целесообразно реализовать в качестве первоочередных.

После преобразований получим

$$-d\lambda/dN \geq \left(\sum (1+E)' k_{ya} \right) \gamma. \quad (2)$$

Условия (1), (2) означают, что мероприятия, которые могли считаться малозффективными из-за незначительного снижения исходной частоты наступления аварии λ , тем не менее должны быть реализованы при условии их невысокой стоимости.

Рассмотрим конкретный пример. Для снижения риска на АЭС применяется многократно дублируемая система резервного питания собственных нужд. Система резервного энергоснабжения предназначена для питания электроэнергией потребителей систем безопасности при возникновении исходных событий аварий и при нормальной эксплуатации. Исходные события разделяются на следующие группы [2]: без потери и с потерей внешних источников энергоснабжения. По отношению к событиям с потерей внешних источников система резервного энергоснабжения наиболее уязвима, поскольку потеря электроснабжения от внешних источников приводит к зависимой потере напряжения на распределительных устройствах 6 кВ всех каналов систем безопасности от рабочих и резервных трансформаторов. На АЭС с ВВЭР-1000 система резервирования собственных нужд состоит из трех независимых одинаковых по структуре и набору оборудования каналов, снабжающих электроэнергией потребителей технологических, управляющих и обеспечивающих систем безопасности. В каждый канал входят три подсистемы, которые питают потребителей различных групп надежного электроснабжения.

Некоторые наиболее типичные причины отказа системы резервного энергоснабжения собственных нужд АЭС таковы: отказ дизель-генераторов при пуске (вероятность отказа $2 \cdot 10^{-2}$) и элементов системы управления их пуском, вспомогательных систем, исполнительных механизмов, повреждение щитов электропитания или кабельных линий, ошибочная блокировка сигналов на пуск дизель-генераторов. Возможное число отказов может достигать 1—2 на 10 требований.

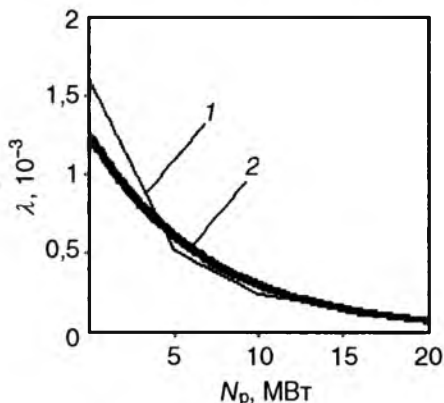
Разработаны математические модели и проанализированы следующие варианты с избыточной надежностью по сравнению со схемой энергоснабжения собственных нужд АЭС: схемы с установкой дополнительного дизель-генератора (стационарного или передвижного) с прокладкой дополнительных кабелей и аппаратуры для одного или всех энергоблоков, перекоммутация каналов — обеспечение работоспособности второго канала системы безопасности (полное обесточивание собственных нужд с отказом трех дизель-генераторов на одном энергоблоке) путем подачи напряжения на секцию 6 кВ питания от дизель-генератора второго канала безопасности одного из трех остальных энергоблоков (для АЭС с четырьмя энергоблоками).

Построенная функция изменения частоты отказов системы энергоснабжения собственных нужд в зависимости от числа устанавливаемых резервных каналов и дизель-генераторов (мощности резерва) для рассмотренных ситуаций представлена на рис. 1, где кривая 1 — расчет по предлагаемым моделям резервирования; 2 — экспоненциальная аппроксимация расчетной кривой (уравнение аппроксимирующей кривой $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-3} \exp(-1 \cdot 10^{-4} N)$). Здесь мощность одного дизель-генератора составляет

5 МВт. Изменение мощности резерва от 5 до 15 МВт осуществляется путем изменения числа резервных каналов от 1 до 3, от 15 до 20 МВт — за счет установки четвертого резервного дизель-генератора с подачей напряжения на шины собственных нужд.

На рис. 2 построены кривая (1) изменения $d\lambda/dN$ (уравнение кривой $d\lambda/dN = -1,3 \cdot 10^{-3} \exp(-1 \cdot 10^{-4} N)$) в зависимости от мощности резерва и ограничивающие кривые 2, 3, которые показывают область приемлемости увеличения резерва для рассматриваемых вариантов — между ограничивающей прямой и кривой изменения $d\lambda/dN$.

Ограничивающие прямые построены для рассматриваемых вариантов резервирования собственных нужд АЭС. В расчетах использовали следующие диапазоны значений: ущерб от запроектной аварии — $31 \cdot 10^{10}$ — $77,5 \cdot 10^{11}$ руб. (в ценах 2002 г.), норма дисконта — 0,08—0,12 год⁻¹, удельные капиталовложения —



Р и с. 1. Зависимость вероятностной частоты отказов системы энергоснабжения собственных нужд от суммарной мощности резервных дизель-генераторов

31 тыс. руб./кВт для варианта с установкой дополнительной дизель-генераторной станции (2), 620 руб./кВт для варианта с перекоммутацией каналов (3).

Из рис. 2 следует, что наличие трех дизель-генераторов (трехканальная действующая система резервирования) является необходимым условием функционирования энергоблока. Наличие четвертого дизель-генератора в соответствии с предлагаемой методикой нормирования нецелесообразно. Простая перекоммутация на соседний канал смежного блока путем подключения к одному из его дизель-генераторов оказывается целесообразной даже при ее завышенной оценочной стоимости $31 \cdot 10^5$ руб. (увеличение мощности резерва на блок сопоставимо с установкой дополнительного дизель-генератора на 5 МВт, удельные капиталовложения на прокладку кабеля исходя из оценочной стоимости перекоммутации составляет 620 руб./кВт).

Таким образом, в соответствии с изложенной методикой нормативной следует считать такую надежность рассматриваемых систем, при которой реализованы все известные мероприятия по увеличению ее уровня, обеспечивающие большее или равное снижение вероятного риска по сравнению с ростом денежных инвестиций на мероприятия по повышению надежности.

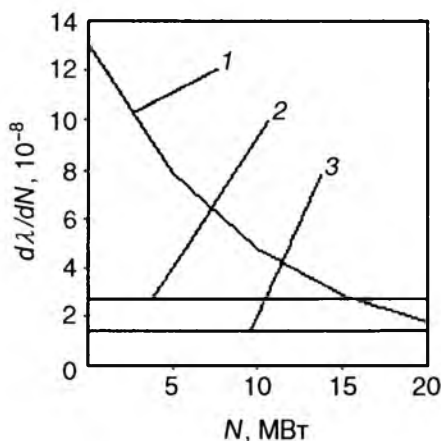
Расчеты на примере обесточивания АЭС показывают, что в соответствии с принятым подходом установка четвертой резервной дизель-генераторной станции нецелесообразна, экономически оправдана перекоммутация на соседний канал безопасности смежного блока.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ №00-02-16097.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Е.А., Хамьянов Л.П. Допустимая вероятность и масштаб тяжелой аварии на АЭС. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 2, с. 107—113.
2. Аминов Р.З., Борисенков А.Э., Хрусталева В.А. Оценка частоты внешнего обесточивания энергоблоков АЭС с ВВЭР. — Там же, 1997, т. 83, вып. 2, с. 124—127.

Поступило в Редакцию 13.02.02



Р и с. 2. Достаточность мощности резервных дизель-генераторов в систему резервирования собственных нужд при разных оценках вероятного ущерба при запроектной аварии

УДК 539.171; 620.186; 621.039 ОЦЕНКА ОСЛАБЛЕНИЯ И ЗАМЕДЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ НАНОСТРУКТУРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Артемов В.А. (НИИ технологии материалов)

В настоящем сообщении обсуждаются особенности ослабления и замедления нейтронов в ультрадисперсном порошке с размером частиц ~ 10 нм.

Ослабление нейтронов в наноструктурном материале. Сопоставимость размеров a структурных единиц материала (частиц ультрадисперсного порошка) и длины волны медленных нейтронов λ обуславливает эффективное когерентное рассеяние нейтронов малыми частицами на характерный угол $\sim \lambda/a$ дополнительно к рассеянию нейтронов отдельными ядрами вещества. Вследствие этого уменьшается коэффициент диффузии нейтронов и увеличивается их поглощение в таком материале по сравнению с обычными сплошным (поликристаллическим, аморфным) или мелкодисперсным материалами со средним характерным размером неоднородностей ~ 10 — 100 мкм.