

УДК 539.172:543.522

## АНАЛИЗ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ВЕРОЯТНОСТНЫМИ МЕТОДАМИ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Басов В.С.

Научные руководители – старший преподаватель Буров А.Л., старший преподаватель Романко В.А.

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) является количественным методом оценки частоты и последствий аварий, которые могут произойти на атомных электростанциях (АЭС). Основная польза от выполнения ВАБ заключается в детальном системном анализе проекта станции, ее эксплуатационных характеристик и внешних воздействий, включая определение доминантных вкладчиков в риск и изучение возможностей для снижения риска. ВАБ дает согласованную интегральную модель безопасности АЭС, предоставляя, таким образом, согласованную и всестороннюю структуру для принятия решений, связанных с безопасностью. ВАБ также дает количественные оценки риска АЭС, включая количественную оценку неопределенностей этих оценок. Однако необходимо четко понимать, что получение количественных оценок риска является лишь промежуточным этапом всего процесса выполнения ВАБ; количественные оценки риска являются в основном лишь средством помощи при проведении ВАБ в решении технических вопросов безопасности [1].

В международной практике сформировались три уровня ВАБ:

уровень 1: оценка частоты повреждения активной зоны реактора;

уровень 2: оценка частоты возможных выбросов радионуклидов за пределы АЭС с учетом поведения контайнмента после аварии с повреждением активной зоны;

уровень 3: оценка рисков для населения и/или окружающей среды вследствие выброса радионуклидов за пределы контайнмента, сопровождающего аварию с повреждением активной зоны [1].

Основные математические методы, используемые при проведении ВАБ, включают теорию множеств, Булеву алгебру и теорию вероятности. ВАБ выполняется путем построения интегральной логической модели (обычно, набор соединенных друг с другом деревьев событий и деревьев отказов), состоящую из логических операторов (Булевы операторы, такие как И, ИЛИ, НЕ и т.д.) и базовых событий (различные исходные события, отказы оборудования, неготовность оборудования вследствие проверок или обслуживания, отказы по общим причинам и ошибки оператора). Вероятность каждого базового события оценивается с использованием статистических данных, дополненных, где это возможно, мнением экспертов. Интегральная логическая модель последовательно решается путем применения булевых методов редукции для определения важных аварийных последовательностей. Как правило, решения интегральной логической модели представлены в терминах доминантных минимальных сечений, которые представляют собой комбинации исходных событий, отказов оборудования и ошибок оператора, необходимых и достаточных для того, чтобы вызвать интересующее вершинное событие, и определяют в совокупности основной вклад в вероятность (частоту) данного события (повреждение активной зоны, выброс за пределы контайнмента/конфайнмента и т.д.).

Существует тесная связь между разработкой логических моделей ВАБ (деревья событий и деревья отказов) и подготовкой данных, используемых для оценки вероятностей базовых событий. При выполнении ВАБ необходимо учитывать (1) конечную цель исследования, (2) требование точного представления характеристик отказа станции, систем и оборудования в рамках логических моделей, и (3) наличие соответствующих данных в обеспечение логических моделей. Большинство исследований ВАБ выполняются для определения вклада в величину риска АЭС от различных источников (надежности оборудования, технического обслуживания,

ошибок персонала и т.д.), а не просто для получения количественной оценки общего риска; соответственно, строится подробная интегральная модель. В принципе, возможно такую модель разработать с любой желаемой степенью детализации (например, насос с электродвигателем может быть разбит на составные части, такие как рабочее колесо, диффузор, корпус насоса, подшипники, соединение вала, электродвигатель и т.д.). Однако, излишняя подробность моделирования может и не требоваться, учитывая конечную цель исследования, и только усложняет разработку, поддержание и решение логических моделей ВАБ. Более того, может оказаться невозможным разработать значимые оценки вероятностей для всех базовых событий, содержащихся в излишне подробной модели деревьев отказов. Таким образом, разработчики логической модели должны работать в тесном контакте с исследователями данных в целях достижения разумного баланса между целями ВАБ и того, что является практически достижимым.

ВАБ на примере системы аварийной питательной воды. Система аварийной питательной воды (LAR/LAS) предназначена для обеспечения питательной водой парогенераторов в режимах нарушений нормальной эксплуатации и в проектных авариях, когда подача питательной воды от штатной системы и вспомогательной системы невозможна. Система должна функционировать при инициирующих событиях, связанных с понижением уровня воды в парогенераторах и требующих аварийного расхолаживания или поддержания блока в горячем резерве [2].

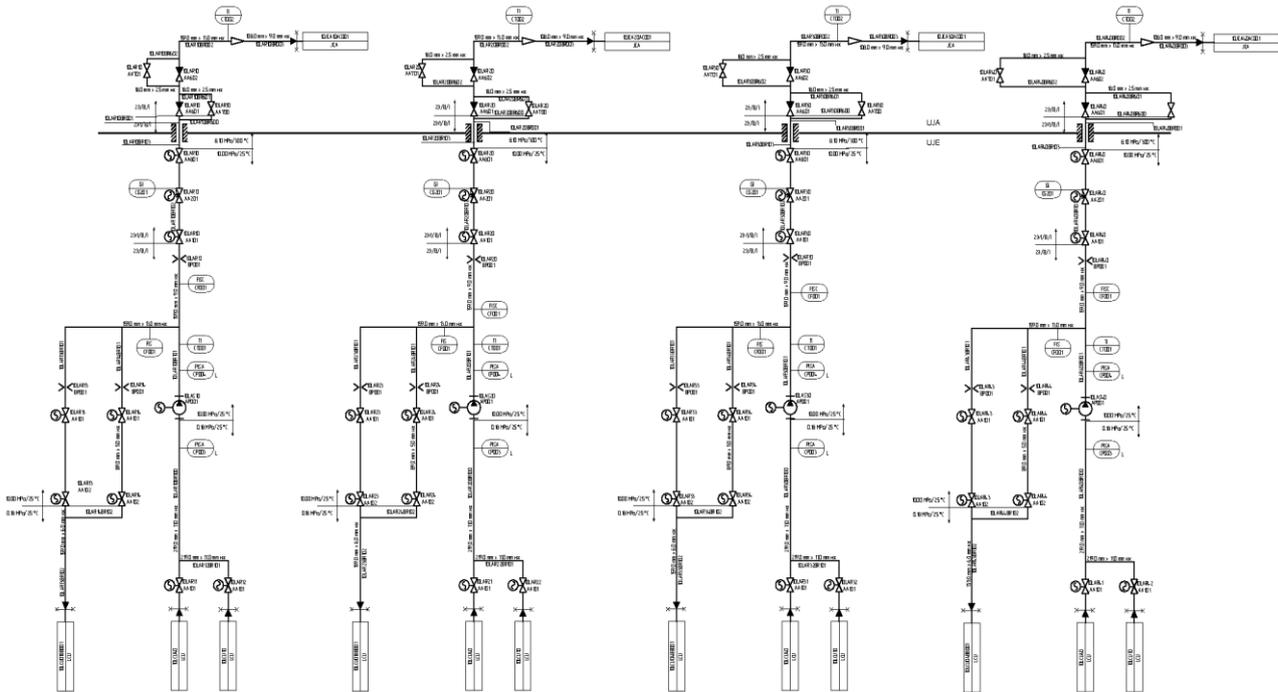


Рисунок 1 – Система подачи аварийной питательной воды энергоблока с реактором типа ВВЭР

Система состоит из четырех одинаковых и полностью независимых один от другого каналов.

В каждом канале предусмотрены:  
аварийный питательный насос;  
арматура;  
трубопроводы.

При выборе производительности канала предполагается, что один канал может быть в ремонте, второй канал имеет зависимый от инициирующего события отказ, в третьем канале – независимый отказ. Система аварийной питательной воды структурно состоит из четырех каналов производительностью 100 % каждый. Каждый канал подсоединен к бакам запаса обессоленной воды емкостью 700 м<sup>3</sup> каждый. В баках поддерживается заданная температура обессоленной воды от плюс 20 °С до плюс 25 °С.

Функцией безопасности, выполняемой системой аварийной питательной воды является обеспечение питательной водой парогенераторов в режимах нарушений нормальной эксплуатации и в проектных авариях, когда подача питательной воды от штатной системы и вспомогательной системы невозможна.

Критерии успеха системы: функция безопасности считается выполненной, если подается питательная вода в парогенераторы при работе одного любого канала системы.

Деревья отказов системы. Деревья отказов были выполнены при помощи компьютерного кода Risk Spectrum for Windows. Поскольку ДО всех каналов LAR/LAS одинаковы, ниже приведено ДО только для одного канала системы (рисунок 2).

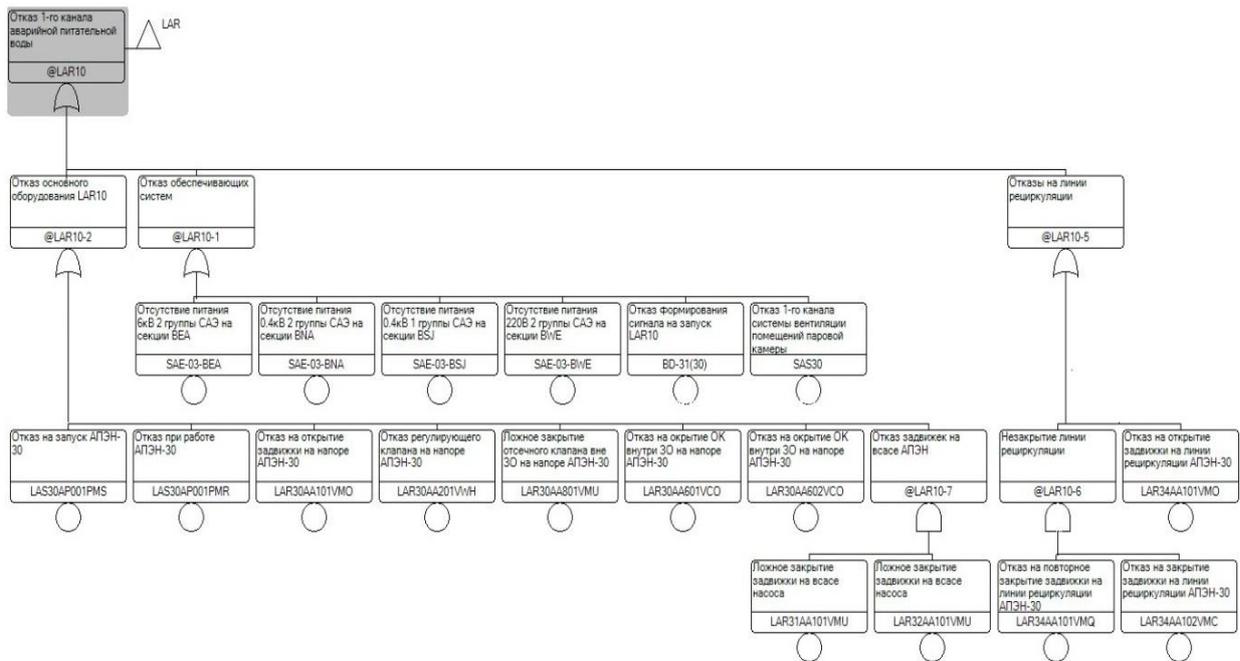


Рисунок 2 – Дерево отказов для одного канала системы подачи аварийной питательной воды

Результаты расчета для ИС.

Расчет проводился исходя из критерия успеха «Подача аварийной питательной воды в один из парогенераторов» и рассматриваемого времени работы 24 часа.

Среднее значение вероятности отказа системы по функции подачи аварийной питательной воды равно:  $2,43 \cdot 10^{-9}$ .

Среднее значение вероятности отказа основного оборудования одного канала:  $7 \cdot 10^{-4}$ .

Среднее значение вероятности отказа вспомогательных систем одного канала:  $10^{-5}$ .

Среднее значение вероятности отказа линии рециркуляции одного канала:  $2,4 \cdot 10^{-4}$ .

### Литература

1. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ): Учебное пособие / В.В. Бегун, О.В. Горбунов, И.М. Каденко и др. – К.: 2000. – 568 с.
2. Солонин В.И. Безопасность и надежность реакторных установок. Учебное пособие по курсу "Расчеты и проектирование ядерных энергетических установок". – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 80 с., ил.