

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ершов Г.А., д-р. техн. наук, проф., Козлов Ю.И., канд. техн. наук, Солодовников А.С., канд. техн. наук. (Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Атомэнергопроект»)

Можжаев А.С., д-р. техн. наук, проф. (Специализированная инжиниринговая компания «Севзап-монтажавтоматика»).

УДК 621.039.58

В статье изложено основное содержание вероятностного анализа безопасности (ВАБ), выполняемого при проектировании атомных энергетических объектов, результаты анализа методов и программ для ПЭВМ, используемых в мировой практике для ВАБ. Показаны направления совместного использования наиболее популярных подходов, позволяющие повысить эффективность исследований в данной предметной области. Изложены основные результаты выполнения ВАБ Тяньваньской АЭС.

В настоящее время к безопасности атомных энергетических объектов (АЭО) предъявляются исключительно жесткие требования. Поэтому в процессе проектирования, строительства и эксплуатации АЭО прикладываются огромные усилия, чтобы обеспечить их соответствие действующим очень жестким международным нормам. В соответствии с ними вероятность тяжелого повреждения активной зоны (а.з.) *ядерного реактора* (ЯР) не должна превышать $1 \cdot 10^{-5}$ на реактор в год, вероятность предельного аварийного выброса радиоактивных веществ (РВ) - $1 \cdot 10^{-7}$ на реактор в год. Радиационное воздействие атомной электростанции (АЭС) на население и окружающую среду не должно превышать $\sim 1\%$ дозы, получаемой от источников естественной радиации. Данные требования распространяются не только на АЭС, но и на корабельные и судовые ядерные энергетические установки (ЯЭУ), другие АЭО. Разрешение на строительство АЭС дается только в том случае, когда безопасность ее доказана и прошла международную экспертизу.

Серьезность этих требований подтверждается тем фактом, что величина перечисленных выше вероятностных показателей безопасности (ВПБ) даже для лучших из уже эксплуатируемых АЭС на порядок ниже. Современные строящиеся и проектируемые АЭС, например, Тяньваньская (ТАЭС) и АЭС «Куданкулам» соответствуют этим требованиям полностью, но достигнуто это за счет усложнения структуры систем безопасности (СБ), увеличения их количества, ввода пассивных СБ, реализации целого ряда других технических решений и, соответственно, за счет удорожания проекта АЭС.

В этой связи не может не возникнуть вопрос о качестве исследований, в ходе которых производится оценка безопасности АЭС. Ясно, что для расчета заданных ВПБ необходимо построение математической модели безопасности АЭС. Однако каждая модель неполна, отражает только некоторые стороны исследуемого объекта. Следовательно, величина рассчитываемых ВПБ может отличаться от фактических значений, в общем случае, как в худшую, так и в лучшую сторону. Очевидно, что второе должно быть исключено из практики исследований безопасности. Менее очевидным является то, что снятие излишнего консерватизма расчетов и получение более точных оценок ВПБ могло бы позволить избежать излишних материальных затрат. Т.о. анализ качества методического и математического аппарата, используемого при оценке ВПБ ЯЭО на стадии проектирования, представляет далеко не академический интерес.

Известно, что в этих исследованиях важное место занимает процедура вероятностного анализа безопасности (ВАБ). В зависимости от содержания, целей и предназначения результатов различают 4 уровня ВАБ [1].

ВАБ-0 содержит качественный и количественный анализы надежности систем и оборудования АЭС, важных для ее безопасности. Он предусматривает анализ и оценку надежности персонала, внешних и внутренних воздействий, отказов по общей причине, перечни исходных событий аварии (ИСА) и др.

ВАБ-1 предполагает разработку вероятностных моделей (ВМ) для определения состояний с повреждением источников, содержащих ядерное топливо и радиоактивные материалы. По этим моделям производится оценка количества выделяющихся при авариях РВ, определяются причины таких событий, рассчитываются вероятности или частоты проявления аварий. ВАБ-1 должен производиться для всех эксплуатационных состояний станции (ЭСС) - работа на полной, частичной или малой мощности, плановое техническое обслуживание, перегрузка топлива, ремонт, переходные режимы.

ВАБ-2 предусматривает анализ состояний с повреждением станции, моделирование системы локализации, определение состава и количества выбрасываемых в окружающую среду РВ, оценку вероятностей или частот таких событий.

ВАБ-3 подразумевает анализ распространения выбрасываемых за пределы герметичной оболочки РВ, оценку создаваемых при этом на местности доз облучения, расчет комплексных показателей безопасности, включая оценку риска от АЭС.

Как следует из вышеизложенного, выполнение ВАБ высших уровней связано с моделированием и расчетом ряда физических показателей, зависящих от конструкции ЯР, состава а.з., параметров системы локализации, района и условий протекания аварии. Рассмотрение этих вопросов выходит за рамки данной публикации, поэтому в дальнейшем мы будем иметь в виду только вероятностную часть ВАБ.

На этапе проектирования необходимо [2] рассчитать величины установленных ВПБ для альтернативных структур АЭС. Расчеты производятся на основе априорной исходной информации о надежности оборудования и частотах событий, которые могут инициировать нарушение условий и пределов безопасной эксплуатации АЭС – инициирующих событий (ИС). На основе этих расчетов выбирается оптимальная, в смысле надежности и безопасности, структура систем станции; разрабатывается стратегия технического обслуживания и ремонта, методика контроля и диагностирования технического состояния оборудования и т.п.

Первая задача (расчет вероятностных показателей безопасности) также решается в несколько этапов. Вначале определяется перечень ИС, которые могут привести к нарушению условий и пределов безопасной эксплуатации АЭС. Производится отбор и группировка эксплуатационных состояний станции (ЭСС), в течение которых возможно проявление каждого ИС. Затем, при необходимости, производится группировка этих ЭСС и ИС. На следующем этапе разрабатываются схемы развития аварийных ситуаций для каждого (каждой группы) ИС и ЭСС с учетом срабатывания СБ, предусмотренных в составе станции при проектировании, действий персонала и т.д. Одновременно для каждой СБ разрабатываются модели, позволяющие оценить вероятность успешного (неуспешного) выполнения этой СБ предписанных функций. Параллельно осуществляется сбор сведений о вероятности (частоте) реализации каждого ИС и о характеристиках надежности оборудования АЭС.

Как следует из вышеизложенного, для оценки безопасности АЭС необходимо иметь математическую (вероятностную) модель безопасности, позволяющую рассчитать частоту повреждения а.з., вероятность выхода РВ за пределы контейнента, коэффициенты неготовности СБ и т.д.

Математическая модель безопасности может быть представлена, например, в виде вероятностного многочлена:

$$P_c = P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 \dots A_n) \quad (1)$$

в виде уравнений Колмогорова-Чепмена:

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -C_k(t)P_k(t) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N \lambda_{lk}(t)P_l(t), k = \overline{1, N}, \quad (2)$$

в виде систем логических уравнений, схемы статистических испытаний и т.д. [1-5]

При анализе реальных сложных систем, таких как АЭС, непосредственное получение требуемых расчетных выражений практически невозможно. Поэтому искомую вероятностную модель получают обычно в несколько этапов [1-5], см. рис. 1.

На первом этапе разрабатывается вербальная модель безопасности. Составляющими такой модели являются, например, хорошо известные таблицы качественного анализа надежности систем безопасности, описания аварийных последовательностей и т.п.

На втором этапе вербальная модель формализуется, т.е. описывается с помощью того или иного математического аппарата. Практика анализа безопасности показывает, что наиболее удобной формой такой формализации является использование различного вида графов.

На третьем этапе графическая модель (ГМ) преобразуется в модель, представляемую с помощью средств алгебры логики (математической логики) - логическую функцию (ЛФ). ЛФ обычно представляют собой либо множество минимальных сечений отказов (МСО), либо множество кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ).

На четвертом этапе логическая модель (ЛМ) преобразуется в расчетную вероятностную функцию (ВФ), представленную либо в совершенной дизъюнктивной нормальной форме, либо в бесповторной дизъюнктивной нормальной форме, либо в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме.

На пятом этапе, на основе ВМ, производятся расчеты требуемых вероятностных характеристик безопасности, проверка и, при необходимости, корректировка модели.

На стадии построения ГМ отображается основная часть закономерностей функционирования АЭС. Качество построения графа во многом определяет адекватность модели и точность последующих расчетов. Это определяет исключительную важность данного этапа. Большинство современных расчетных кодов, используемых при ВАБ, позволяют автоматизировать все остальные этапы моделирования, исключить человека из их выполнения, что в еще большей степени повышает требования к качеству построения ГМ.

Наиболее известными способами графического моделирования надежности и безопасности сложных организационно-технических систем являются [1-5] последовательно-параллельные схемы, блок-схемы, графы связности, деревья событий и/или деревья отказов (ДС/ДО), марковские графы состояний и переходов, ГО-схемы, релейно-контактные схемы, схемы функциональной целостности (СФЦ).

При выполнении ВАБ наибольшее применение нашли ДО/ДС. Менее известны ГО-схемы и СФЦ. Руководства МАГАТЭ не исключают использования последовательно-параллельных схем и марковских графов состояний и переходов. Графы связности и релейно-контактные схемы в практике ВАБ почти не применяются. Все основные методы построения ГМ реализованы на ПЭВМ в виде программных комплексов (ПК), оснащенных графическими редакторами, встроенными базами данных и т.п.

Широкое использование ДО/ДС вызвано простотой и ясностью исходной идеи, используемой при постановке задачи моделирования. Действительно, поскольку нас интересует вероятность (частота) появления события, связанного с нарушением безопасности, то кажется вполне разумным начать анализ именно с него и, последовательно разбираясь с причинами появления этого события и отображая эти причины на графе, в конце концов, получить требуемую модель.



Рис. 1. Последовательность этапов моделирования и расчета при производстве ВАБ

ДО позволяют отображать конъюнктивность и дизъюнктивность условий обеспечения, мажоритарные структуры, последовательность событий. Важнейшим достоинством ДО является то, что дерево, построенное в строгом соответствии с законами теории графов, позволяет исключить один из самых трудоемких этапов моделирования - преобразование логической функции в вероятностную. В качестве положительных сторон технологии ДО выделяют [1, 5, 6] относительную простоту теоретических основ и средств графического отображения; значительный опыт практического применения технологии ДО в отечественной и зарубежной атомной промышленности (примерно с 1985 г.); возможность графического представления и учета в ЛМ и ВМ различных комбинаторных комбинаций групп базовых событий и отказов по общей причине.

Эти достоинства ДС/ДО обусловили их использование в составе многих кодов для ВАБ, часть из которых перечислена в таблице 1.

Таблица 1.
Коды для ВАБ, основанные на деревьях событий/деревьях отказов

Название Кода	Разработчик
CAFTA+/ETA-II	Корпорация SAIC, США
SAPFIRE	Комиссия ядерного регулирования США
PRA Workstation	Корпорация NUS, США
SETS	Брукхевенская национальная лаборатория, США
RISK-MAN	Компания PLG
MLD-Code	
MPLD-Software	Компания Scientech, США
RISK-Spectrum	Компания Relcon Teknik AB, Швеция
CRISS	ОКБМ
RISK	ОЦПК МИНАТОМ
Relex	Relex Software

Вместе с тем можно выделить ряд объективных недостатков и ограничений этой технологии. К ним следует отнести: ограниченность логической базы графических и аналитических средств, что не позволяет реализовать все возможности алгебры логики; невозможность представления в различных ветвях ДО последовательностей событий; невозможность использования множественных, логически противоположных, составных и немонотонных критериев возникновения и/или не возникновения аварийных ситуаций; невозможность непосредственного представления в ДО циклических (мостиковых) связей между элементами; ориентацию технологии построения ДО на так называемую "обратную" логику рассуждений, т.е. необходимость мысленного перебора комбинаций отказов элементов при формировании графических сценариев отказов или аварий исследуемой системы; ориентация кодов на использование приближенных методов расчета вероятностных показателей надежности и безопасности.

В целях преодоления указанных недостатков и ограничений технологии ДО в РФ и за рубежом выполняются разработки других методов, технологий и ПК, основанных на альтернативных подходах. В США это метод ГО-схем [2], в России - общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ), предусматривающий использование схем функциональной целостности (СФЦ) [4, 7, 8]. Оба метода были разработаны примерно в одно и то же время в организациях, связанных с Вооруженными силами США и СССР. В США ГО-метод стал применяться в гражданских отраслях с середины 80-х годов. В РФ ОЛВМ, технология и ПК автоматизированного структурно-логического моделирования начали применяться для анализа надежности и безопасности СБ АЭС с начала 90-х годов [8], АСУТП химически опасных и взрывоопасных производственных объектов – с конца 90-х годов прошлого века [9].

На наш взгляд, графический аппарат СФЦ и теоретические основы ОЛВМ объединяют в себе достоинства метода ДО/ДС и метода ГО-схем, не обладая, в то же время, их недостатками. Главным преимуществом теории ОЛВМ и СФЦ является математически строгая реализация всех возможностей алгебры логики в полном базисе операции "И", "ИЛИ", "НЕ". Полная автоматизация наиболее громоздких и трудоемких этапов построения ЛМ и ВМ делает соответствующую

технологии автоматизированного структурного моделирования (АСМ) перспективной для практического применения, дальнейшего развития и адаптации к задачам ВАБ. Основные изобразительные средства, используемые при построении СФЦ, приведены на рис. 2.

Для иллюстрации и сравнительного анализа технологий ДО/ДС и АСМ на рис. 3 приведены результаты выполнения основных этапов (см. рис.1) моделирования надежности системы, состоящей из четырех элементов [11]. В левой верхней части рис.3 приведены исходные данные, необходимые для выполнения этой задачи. Ниже изображена схема использования технологии ДО, а правее – технологии АСМ. Как следует из рис. 3, часть операций моделирования выполняется вручную, а часть – с помощью ЭВМ.

В обеих технологиях вручную строятся ГМ системы. При этом ДО строится на основе обратной логики (рис. 3.1.б), а СФЦ может строиться, как на основе прямой (рис. 3.2.а), так и обратной логики (рис. 3.2.в). Видно, что СФЦ (рис. 3.2.в) аналогична ДО (рис. 3.1.б). Ввод графических моделей в ПК осуществляется также вручную.

ЛМ неработоспособности системы в виде множества МСО (технология ДО) и ЛМ работоспособности/неработоспособности в виде множества КПУФ/МСО (технология АСМ) строятся с помощью ЭВМ. При этом прямому выходу СФЦ соответствует ЛМ работоспособности, а инверсному (обратному) – ЛМ неработоспособности. Для ДО, построенного с помощью графического аппарата СФЦ, модели инвертируются.

Далее с помощью ЭВМ производится получение расчетных ВФ и расчет требуемых характеристик. При этом в технологии ДО используются приближенные ВФ (см. ниже), строящиеся на основе ЛФ в виде МСО, а в технологии АСМ ЛФ преобразуется, по особым правилам, в точный вероятностный многочлен. Именно последним обстоятельством объясняется несовпадение результатов расчетов вероятностей, приведенных на рис.3.1.г и рис.3.2.б, г.

Выбор вида графического аппарата (ДО/ДС или СФЦ), применяемого для ВАБ, вида технологии (ДО или АСМ), осуществляет исследователь, исходя из своих умений, накопленного опыта, требований точности моделирования и стремлений уменьшить вероятность ошибки.

Однако, по нашему мнению, СФЦ, формируемые на основе прямой логики рассуждений, во многих случаях могут оказаться предпочтительными, поскольку: специалисты обычно лучше знают условия правильной, безотказной и безаварийной работы проектируемой или эксплуатируемой АЭС и хуже знают возможные условия возникновения отказов и аварий. Поэтому построить СФЦ работоспособности или безопасности системы проще, чем ДО; построение СФЦ, как правило, менее трудоемко и в большей степени гарантировано от ошибок; подобие СФЦ функциональным схемам исследуемых систем облегчает процесс и контроль правильности их построения; размеры СФЦ значительно меньше соответствующих ДО; на основе СФЦ можно автоматически строить все виды ЛМ – КПУФ, МСО и различные их немонотонные комбинации.

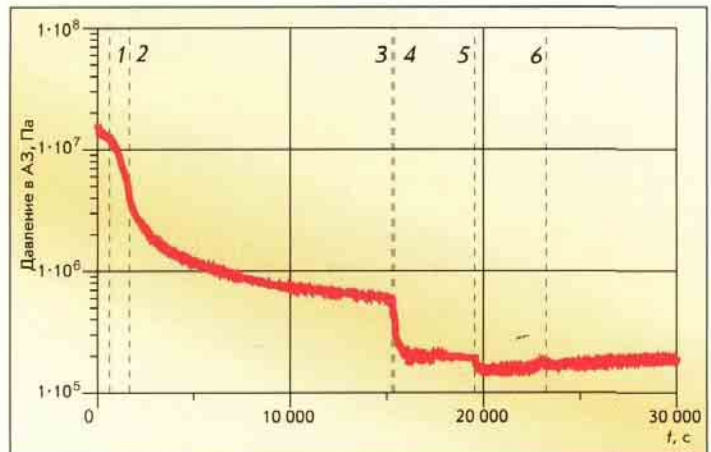


Рис. 2. Хронологическая последовательность работы систем безопасности при аварии с течью Ду 25:
 1 – открытие клапана СПОТ; 2 – срабатывание гидроемкости САОЗ; 3 – открытие системы АБР; 4 – начало заливки из баков САОЗ; 5 – открытие переливного трубопровода; 6 – окончание затопления аварийного бассейна

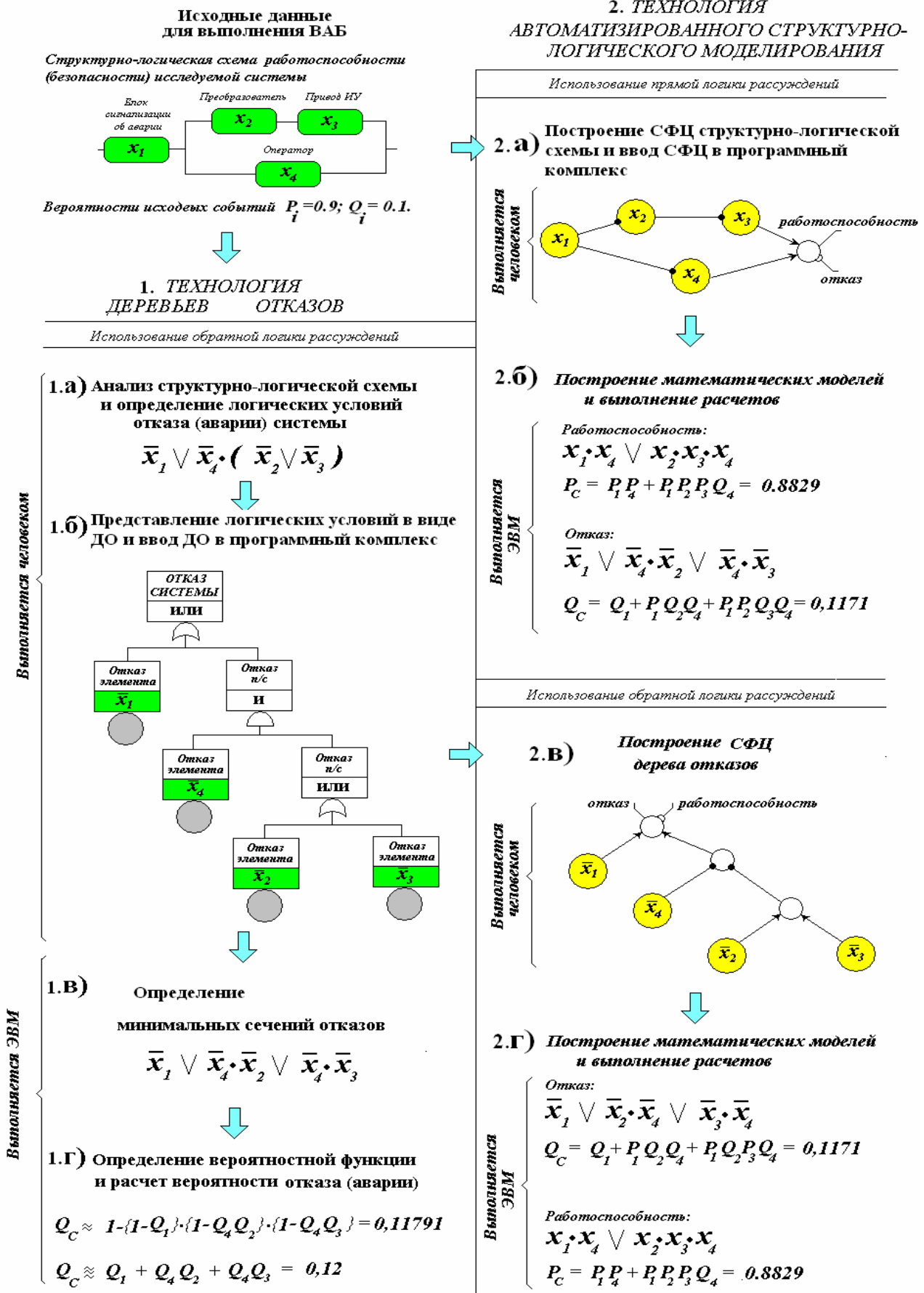


Рис. 3. Сравнительный анализ технология ДО/ДС и АСМ

Теперь рассмотрим более сложный пример. На рис. 4 представлена СФЦ, отображающая фрагмент ГМ реальной ЯЭУ. При этом вершина 1 отображает событие успешного выполнения функции системой поддержания вакуума в секциях главного конденсатора (СГК). Вершины 2 и 3 отображают события успешного выполнения функции СГК левого и правого каналов (ЛК и ПК). Вершины 5 и 6 отображают события успешного выполнения функции конденсатными насосами (КН) ЛК и ПК. Вершина 4 отображает событие успешного выполнения своей функции переключкой между ЛК и ПК. Вершины 9 и 10 отображают события успешного выполнения функции питательными насосами (ПН) ЛК и ПК. Вершины 11 и 12 отображают события успешного выполнения функции блоками питательных клапанов (БПК) ЛК и ПК. Вершины 13-16 отображают события успешного выполнения функции парогенераторами (ПГ) ЛК и ПК. Вершина 23 отображает событие успешного выполнения функции турбогенератором (ТГ). С помощью фиктивных вершин 7 и 8 отображены условия, при которых возможна работа КН одного канала на ПН другого канала. С помощью фиктивных вершин 17-22 отображено условие мажоритарности – для успешного функционирования ЯЭУ достаточно успешного функционирования любых двух ПГ из четырех.

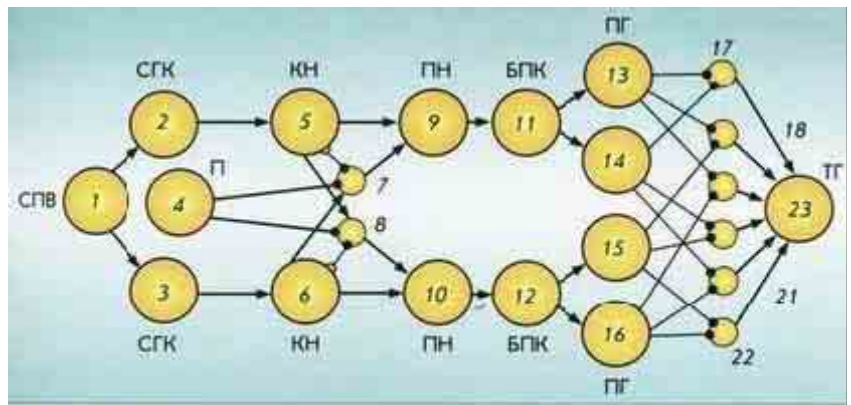


Рис. 4. СФЦ мажоритарной подсистемы АЭС

На рис. 5 данная система отображена с помощью графического аппарата ДО. Нетрудно подсчитать, что в СФЦ использовано 15 функциональных вершин, 7 – фиктивных, 36 ребер. В ДО использовано 64 логических элемента, 30 логических операторов, 64 ребра. Т.о., как и следовало ожидать, ДО получилось более громоздким.

Дальнейшее моделирование и расчеты произведем с помощью четырех ПК – Risk Spectrum (этот код, наряду с кодом SAPFIRE, наиболее часто используется при производстве ВАБ АЭС в России), а также ПК АСМ 2001 [7], ПК АСМ SZMA [9] и NEWАСМ [8].

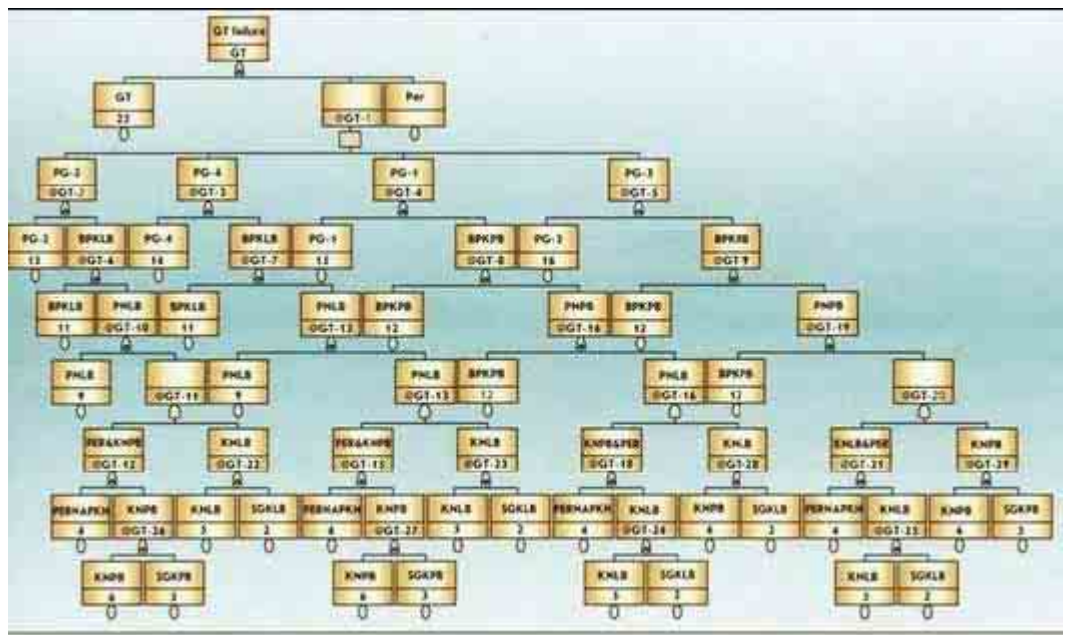


Рис. 5. Дерево отказов мажоритарной системы

Результаты построения ЛМ (в виде множества МСО) оказались полностью идентичными (см. табл.2 и ЛФНРС), совпали и общее количество сечений (по 38), и состав каждого сечения в отдельности. Это, безусловно, свидетельствует о правильности (по крайней мере – непротиворечивости) обеих моделей.

**Таблица 2. Перечень минимальных сечений отказов мажоритарной системы
(полученный с помощью кода Risk Spectrum)**

№№ сечения	Абсолютный вклад в величину отказа системы	Вклад в величину отказа системы, %	Номера элементов, входящих в сечение		
1	3,00E-01	32,86	1		
2	3,00E-01	32,86	23		
3	9,00E-02	9,86	12	14	
4	9,00E-02	9,86	16	9	
5	9,00E-02	9,86	10	11	
6	9,00E-02	9,86	3	5	
7	9,00E-02	9,86	10	13	
8	9,00E-02	9,86	11	16	
9	9,00E-02	9,86	12	13	
10	9,00E-02	9,86	11	15	
11	9,00E-02	9,86	2	6	
12	9,00E-02	9,86	5	6	
13	9,00E-02	9,86	11	12	
14	9,00E-02	9,86	12	9	
15	9,00E-02	9,86	2	3	
16	9,00E-02	9,86	15	9	
17	9,00E-02	9,86	10	14	
18	9,00E-02	9,86	10	9	
19	2,70E-02	2,96	3	4	9
20	2,70E-02	2,96	12	4	5
21	2,70E-02	2,96	16	2	4
22	2,70E-02	2,96	10	4	5
23	2,70E-02	2,96	12	2	4
24	2,70E-02	2,96	14	4	6
25	2,70E-02	2,96	13	14	15
26	2,70E-02	2,96	10	2	4
27	2,70E-02	2,96	14	3	4
28	2,70E-02	2,96	13	4	6
29	2,70E-02	2,96	15	4	5
30	2,70E-02	2,96	13	15	16
31	2,70E-02	2,96	13	3	4
32	2,70E-02	2,96	11	4	6
33	2,70E-02	2,96	15	2	4
34	2,70E-02	2,96	11	3	4
35	2,70E-02	2,96	4	6	9
36	2,70E-02	2,96	16	4	5
37	2,70E-02	2,96	14	15	16
38	2,70E-02	2,96	13	14	16

Логическая функция неработоспособности мажоритарной системы (полученная с помощью кода NEWACM):

$$Y_c = \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_9 \cdot \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{13} \cdot \bar{x}_{14} \cdot \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_9 \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_9 \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_6 \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_5 \vee \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_6 \vee \bar{x}_{10} \cdot \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_9 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_{10} \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_{10} \cdot \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{12} \cdot \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_9 \cdot \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{12} \cdot \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{13} \cdot \bar{x}_{15} \cdot \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_9 \cdot \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_{14} \cdot \bar{x}_{15} \cdot \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_{13} \cdot \bar{x}_{14} \cdot \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_{23}$$

А вот результаты расчетов вероятности отказа системы не совпадают, несмотря на то, что вероятностные характеристики базисных событий приняты одинаковыми ($P_i = 0.7$). Вероятность отказа, рассчитанная с помощью ПК АСМ, составляет 0.847965, а рассчитанная с помощью Risk Spectrum – 0.913. Это весьма значительное расхождение.

Примечание:

Результаты расчетов по кодам, основанным на технологии АСМ, совпадают

В то же время результаты расчета показателей относительной важности элементов ЯЭУ (значимости по ОЛВМ и значимости по Веселы-Фасселу) дают практически одинаковую качественную картину. Совпадают номера как наиболее (1 и 23), так и наименее (2, 3, 5, 6) значимых элементов. Не совпадают только значимости 4-го элемента. Хотелось бы, впрочем, отметить, что показатель значимости по ОЛВМ более чувствителен к параметрам модели, чем значимость по Веселы-Фасселу.

Наиболее вероятной причиной расхождения результатов расчетов системной характеристики может являться различное количество и характер допущений и ограничений, принятых в сравниваемых методах. Известно [11, 12], что при производстве ВАБ с помощью ДО/ДС используются следующие допущения:

- приближенные оценки для вероятностей отказа элементов;
- приближенные формы многочленов ВФ, определяемых непосредственно по ЛФ, представленной в виде множества МСО;
- отсечение «малозначащих» МСО.

Рассмотрим эти допущения более детально.

1. При оценке вероятности отказа элементов с экспоненциальным распределением наработки до отказа используется следующее выражение [6]: $q = 1 - e^{-\lambda t}$ (3)

Разложение в ряд этой функции имеет вид: $1 - e^{-\lambda t} = \lambda t - \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} - \dots$ (4)

Для элементов систем АЭС обычно справедливо неравенство $\lambda t \ll 1$, поэтому выражение для приближенной оценки вероятности отказа элемента можно записать в следующем виде:

$$q = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t \quad (5)$$

λt является верхней оценкой для q с абсолютной погрешностью $\Delta_q < (\lambda t)^2 / 2$ и относительной погрешностью $\approx \lambda t / 2$.

Из сказанного следует, что использование данного подхода всегда дает завышенное (по сравнению с действительным) значение вероятности отказа. Однако в рассматриваемом примере эта причина должна быть отброшена, поскольку вероятности отказов элементов были заданы не в экспоненциальной форме.

2. В [10, 11] указано, что для расчетов вероятности осуществления верхнего события ДО в ПК Risk Spectrum используются две приближенные формы многочленов ВФ:

$$Y(\bigvee_{j=1}^M \Omega_j) = Y(\bigvee_{j=1}^M \& x_i) \Rightarrow P(\{p_i(t)\}, i = 1, 2, \dots, H) = \sum_{j=1}^M \prod_{i \in \Omega_j} p_i(t) \quad (6)$$

$$Y(\bigvee_{j=1}^M \Omega_j) = Y(\bigvee_{j=1}^M \& x_i) \Rightarrow P(\{p_i(t)\}, i = 1, 2, \dots, H) = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \prod_{i \in \Omega_j} p_i(t)) \quad (7)$$

Здесь $\Omega_j = \& x_i$ - конъюнкции исходной ЛФ, представляющие МСО. Приближение (6)

является ненормированным, т.е. расчеты во всем диапазоне возможных значений параметра $p_i(t) \in [0, 1]$ могут привести к вычислению вероятностей больше 1. Приближение (7) является нормированным, но его относительная точность обеспечивается только в случаях, когда все значения параметров p_i элементов системы близки к нулю или близки к единице. Кроме того, в про-

граммном комплексе Risk Spectrum используются еще два дополнительных метода аппроксимации [10]:

$$Y(\bigvee_{j=1}^M \Omega_j) = Y(\bigvee_{j=1}^M \&_{i \in \Omega_j} x_i) \Rightarrow P(\{p_i(t)\}, i = 1, 2, \dots, H) = \sum_{j=1}^M \prod_{i \in \Omega_j} p_i(t) - \sum_{k=1}^{C_M^2} \prod_{i \in \Omega_k} p_i(t) \quad (8)$$

$$Y(\bigvee_{j=1}^M \Omega_j) = Y(\bigvee_{j=1}^M \&_{i \in \Omega_j} x_i) \Rightarrow P(\{p_i(t)\}, i = 1, 2, \dots, H) = \sum_{j=1}^M \prod_{i \in \Omega_j} p_i(t) - \sum_{k=1}^{C_M^2} \prod_{i \in \Omega_k} p_i(t) + \sum_{l=1}^{C_M^3} \prod_{i \in \Omega_l} p_i(t) \quad (9)$$

где $\Omega_k = \&_{i \in \Omega_k} x_i$ - конъюнкции, полученные в результате логического перемножения всех

C_M^2 комбинаций пар из M конъюнкций исходной ЛФ;

$\Omega_l = \&_{i \in \Omega_l} x_i$ - конъюнкции, полученные в результате логического перемножения всех C_M^3

комбинаций троек из M конъюнкций исходной ЛФ.

Модели (8) (9) позволяют, в определенных случаях, вычислять более точные значения вероятностных показателей, чем (6). Как и (7), модели (8), (9) являются ненормированными, т.е. расчеты, во всем диапазоне возможных значений $p_i(t) \in [0, 1]$, могут привести к вычислению вероятностей больше 1.

Для более глубокого изучения данного вопроса были проведены расчеты для системы, состоящей из 22 элементов ($P_i = 0.3$). Рассчитывались вероятности осуществления различных вариантов мажоритарности, начиная от 1 из 22 и заканчивая 22 из 22. При этом установлено, что результаты расчетов на ПК Risk Spectrum совпадают с точными в случаях 1 из 22 и 22 из 22. Расчеты, проведенные при варьировании значений P_i , показали, что результаты расчетов по Risk Spectrum начинают совпадать с точными при условии, что все $p_i \leq 0.01$. Это соответствует условиям применения ПК Risk Spectrum, записанным в технической документации на данный код [10]

В коде Risk Spectrum реализовано, как уже указывалось, и допущение, связанное с необходимостью отсечения МСО при превышении определенного порогового значения. Оно приводит к снижению точности расчета системной характеристики и показателей, характеризующих относительный вклад в безопасность АЭС отдельных аварийных последовательностей, МСО, отдельных компонентов. Степень погрешности в значительной степени зависит от особенностей моделируемой системы, главным образом – от количества логических переменных, входящих в отсекаемые МСО и значений вероятностных характеристик этих переменных. Для рассматриваемой в настоящей статье мажоритарной системы отсечение МСО начинает значительно сказываться на точности результатов только после исключения из ЛФ большей части сечений, насчитывающих один и два базисных события.

Необходимо отметить, что допущения, реализованные в коде Risk Spectrum, приводят к консервативным (завышенным) оценкам при расчете показателей безопасности, т.е. не вызывают занижения уровня опасности АЭС.

Как уже указывалось, в настоящее время выполнение ВАБ является обязательным этапом проектирования АЭС. В соответствии с данным требованием при проектировании Тяньваньской АЭС (ТАЭС) были выполнены ВАБ-1 для работы на мощности, ВАБ-1 для стояночных режимов, ВАБ-2 (для режимов работы на мощности и стояночных режимов), «пожарный» ВАБ. В соответствии с контрактом и требованиями Заказчика при этом была использована технология ДС/ДО.

В результате выполнения ВАБ ТАЭС были получены следующие оценки показателей безопасности проектируемой станции:

- частота повреждения а.з при работе АЭС на мощности выше 2% от номинальной не превышает – $3.36 \cdot 10^{-6}$ 1/год;
- частота повреждения а.з при нахождении АЭС в стояночных режимах составляет – $3.56 \cdot 10^{-7}$ 1/год;
- вклад внутренних возгораний в частоту повреждения а.з. составляет - $5.03 \cdot 10^{-8}$ 1/год;
- вероятность предельного аварийного выхода РВ не превышает - $6.4 \cdot 10^{-8}$ 1/год.

Результаты ВАБ успешно прошли экспертизу МАГАТЭ в октябре 2002 года (ВАБ-1 для работы на мощности), ноябре 2002 года (пожарный ВАБ), феврале 2004 года (ВАБ-2 и стояночный ВАБ). В соответствии с рекомендациями миссий МАГАТЭ выполненные ВАБ использованы Заказчиком для получения лицензий на строительство и пуск энергоблоков №1, 2 ТАЭС.

Т.о. ТАЭС удовлетворяет всем установленным требованиям по безопасности. Однако необходимо отметить, что фактический уровень безопасности ТАЭС безусловно выше, поскольку, как уже указывалось, использование кода Risk Spectrum дает заниженную оценку безопасности.

В настоящее время, по нашему мнению, использование методов и кодов, основанных на большом количестве допущений уже нецелесообразно, более того (учитывая рост требований к величине вероятностных показателей безопасности) - недопустимо. Дело в том, что для понижения любого ВПБ, например ЧПЗ, на одну десятитысячную требуется вложение огромных материальных средств. И эти средства вкладываются! Между тем, использование более точных методов моделирования и расчета позволило бы избежать этих затрат. Тем более что рост вычислительной мощности ЭВМ, наличие новых разработок в области теории графов, нового математического, алгоритмического и программного обеспечения позволяет исключить из расчетных кодов и методик ограничения и допущения, оставшиеся от тех времен, когда вероятностные расчеты производились вручную или на маломощных ЭВМ.

Реализация этого подхода возможна как путем совершенствования технологии ДО, так и путем перехода на технологию АСМ. На наш взгляд второй путь более перспективен, однако мы не отвергаем и первый, поскольку он имеет в себе определенный потенциал для совершенствования.

Список литературы:

1. **Швыряев Ю.В.** и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1992.
2. **Ершов Г.А., Гавриленко В.М., Козлов Ю.И. и др.** Обеспечение надежности и безопасности ядерных энергетических объектов в процессе проектирования. Методология и практика. Теплоэнергетика, №2, 2004.
3. **Рябинин И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем. // СПб.: Политехника, 2000.
4. **Можаев А.С.** Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988.
5. **Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото.** Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984.
6. **Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б.** Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. **Можаев А.С.** Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды МНШ "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК – 2001). СПб.: Издательство ООО "НПО "Омега", 2001, с.56-61.
8. **Гусев Л.Б., Ершов Г.А.** Методология, теория и практика комплексного обеспечения безопасности судовых энергетических установок. Морская технология, №2. 1996.
9. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). Техническая документация. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2003.
10. Risk Spectrum PSA Professional 1.20. Theory Manual. RELCON AB, 1998.
11. Методика квантификации, анализа значимости, чувствительности и неопределенности при проведении вероятностного анализа безопасности корабельных ядерных энергетических установок. М.: РНЦ «Курчатовский институт», ОКБМ им. И.И. Африкантова, 2003.