

ОБНИНСКИЙ ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

УДК 621.039.58'68

ТОКМАЧЕВ Геннадий Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АС  
С РЕАКТОРАМИ ТИПА ВВЭР С УЧЕТОМ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ.

Специальность: 05.13.16 – Применение вычислитель-  
ной техники, математи-  
ческого моделирования и  
математических методов  
в научных исследованиях  
(физика, информатика,  
вычислительная техника  
и автоматизация).

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата

технических наук.

Обнинск, 1992 г.

Работа выполнена во Всесоюзном государственном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте "Атомэнергпроект".

Научные руководители: -доктор технических наук, профессор Острейковский В.А.  
-кандидат технических наук, Швыряев Д.В.

Официальные оппоненты: -доктор технических наук, Сорокин А.П.

-кандидат технических наук, Поляков Е.Ф.

Ведущая организация: Опытное конструкторское бюро "Гидропресс"

Защита состоится 18 июня 1992 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного Совета К 064.27.01 в Обнинском институте атомной энергетики по адресу: Калужская область, г.Обнинск, ИАТЭ.

Отзывы на автореферат /в двух экземплярах, заверенных печатью/ просим высылать по адресу: 249020, г.Обнинск Калужской обл., ИАТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАТЭ.

Автореферат разослан " . " мая 1992 г.

Ученый Секретарь  
специализированного Совета,  
кандидат технических наук



А.И.Перегуда

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** Комплексное системное исследование и обоснование безопасности как одного из основных свойств атомных станций (АС) обеспечивает аппарат вероятностного анализа безопасности (ВАБ), позволяющий оценить вероятность и размеры радиационных воздействий на население, персонал АС и окружающую среду. Важной характеристикой АС как сложной человеко-технической системы является принципиальная несводимость ее свойств к сумме свойств составных частей (неаддитивность) из-за существования различных взаимосвязей. Поэтому неотъемлемой и важнейшей задачей любого ВАБ должно быть адекватное моделирование различных зависимостей на всех этапах его проведения. В настоящее время общепризнано, что отказы по общей причине, наряду с другими видами зависимых отказов, имеют доминирующее значение и оказывают решающее влияние на количественные и качественные результаты ВАБ. Важность анализа зависимых отказов закреплена в нормативных документах МАГАТЭ и СССР.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Целью настоящей работы является разработка метода анализа зависимых отказов оборудования АС с доведением его до уровня инженерной методики, реализованной в программном комплексе для выполнения ВАБ и обеспеченной необходимой базой данных.

Для достижения сформулированной цели в данной работе ставятся следующие задачи исследования:

1. Разработать методику построения вероятностных моделей безопасности АС с учетом зависимых отказов;
2. Разработать детальные модели отказов по общей причине и методику оценки вероятностей реализации аварийных последовательностей с учетом этих моделей;
3. Разработать алгоритм и программу расчета вероятностных показателей безопасности АС, реализующие вышеуказанные методики;
4. Разработать принципы сбора и обработки информации по отказам по общей причине на отечественных АС и создать базу данных для проведения анализов таких отказов;
5. Провести качественный и количественный анализ зависимых отказов в рамках выполнения вероятностных оценок безопасности нескольких проектируемых АС с ядерным реактором ВВЭР.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА.** На основе анализа опыта эксплуатации отечественных и зарубежных АС разработаны детальные вероятностные модели

зависимых отказов на системном и элементном уровнях, учитывающие специфику работы, контроля, технического обслуживания и ремонта систем безопасности. Разработана методика анализа зависимых отказов с использованием этих моделей при проведении вероятностного анализа безопасности АС. Методика реализована в расчетных программах для персональной ЭВМ.

Разработана система сбора и обработки эксплуатационной информации по отказам по общим причинам оборудования систем безопасности АС и создана база данных по таким событиям на АС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Проведены практические анализы зависимых отказов при выполнении ВАБ ряда АС, и разработаны на их основе рекомендации по снижению вклада таких отказов в нарушение безопасности АС.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.** Разработанные методики анализа зависимых отказов и расчетные программы использованы при проведении вероятностных анализов безопасности проектов 6-ти АС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-440. При выполнении этих анализов были:

- получены вероятности серьезных повреждений активной зоны и оценки вклада отказов по общей причине в этот показатель безопасности;
- исследована эффективность различных проектных решений, и разработаны рекомендации по повышению безопасности анализируемых проектов АС;
- сформулирован подход к проектированию АС нового поколения в части защиты против отказов по общей причине.

Методика анализа зависимых отказов включена в качестве составной части в отраслевой методический материал "Руководство по проведению вероятностных анализов безопасности АС".

Методика анализа зависимых отказов и база данных по отказам по общей причине используются при выполнении вероятностных анализов безопасности действующих АС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 в рамках отраслевой программы по повышению безопасности.

#### НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ:

- 1) вероятностные модели различных видов зависимых отказов, в том числе детальные модели отказов по общим причинам, связанным с общностью конструкции или размещения резервируемых элементов или эксплуатационных процедур, модели контроля и восстановления таких отказов;
- 2) методика анализа зависимых отказов и расчетные программы, в которых она реализована;
- 3) результаты сбора и обработки статистической информации по отказам по общим причинам оборудования систем безопасности АС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000;
- 4) совокупность количественных оценок влияния отказов по общей

причине на безопасность конкретных энергоблоков с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ.** Проведенные по разработанной методике конкретные анализы зависимых отказов включены в разделы по обоснованию безопасности 6-ти проектов АС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-440.

Результаты зависимых отказов на АС "Темелин" (Чехословакия) в составе документации по обоснованию безопасности этого объекта были представлены и прошли предварительную техническую экспертизу МАГАТЭ. Аналогичные материалы в составе проектной документации по 3-му блоку АС "Ловииза" (Финляндия) прошли экспертизу и были приняты финской стороной. Методические положения и результаты моделирования зависимых отказов оборудования 2-го блока АС "Паки" (Венгрия) докладывались на совещаниях и неоднократно подвергались совместному анализу экспертов МАГАТЭ и представителей стран-участниц Программы координированных исследований МАГАТЭ по вероятностному моделированию аварийных последовательностей.

Номенклатура статистической информации, требуемой для проведения анализов отказов по общей причине, предлагалась и обсуждалась на международных совещаниях по эксплуатации Информационной системы по качеству оборудования (ИСКО) АС МХО "Интератомэнерго".

Результаты анализов зависимых отказов докладывались на советско-английском семинаре по вероятностному анализу безопасности АС (Москва, 1991 г.).

Основное содержание работы отражено в 3-х статьях и 10-ти научно-технических отчетах и проектных документах.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа изложена на 156 страницах, в том числе основного текста - 115 страниц, 16 рисунков, 9 таблиц, библиографический список из 140 наименований на 14 страницах и приложение на 2 страницах.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во ВВЕДЕНИИ обосновывается актуальность работы, определяется ее цель, и кратко излагается ее содержание.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ приводится аналитический обзор состояния проблемы моделирования зависимостей при проведении вероятностных анализов безопасности АС и создания базы данных по общим причинам, выявляются наименее изученные аспекты этой проблемы и формулируется постановка задачи исследования.

Серьезным недостатком всех завершенных ВАР является значитель-

ная неопределенность полученных результатов. Одним из основных источников неопределенности является моделирование зависимостей при проведении БАБ как вследствие использования достаточно грубых моделей, так и вследствие значительной неопределенности базы данных.

При моделировании функциональных зависимостей используется их явное отображение на соответствующих логических диаграммах: деревьях отказов или системных деревьях событий. Основным недостатком логических моделей, используемых для моделирования функциональных зависимостей, является их громоздкость. Это не только повышает вероятность ошибки при аналитических процедурах, но и ограничивает возможность детального моделирования путей развития аварии на соответствующих АС ВВЭР. Эти ограничения связаны с объемом памяти, быстродействием ЭВМ и вызывают необходимость предварительной аналитической модуляризации (укрупнения) используемых логических моделей.

Для моделирования отказов по общей причине общепринято использование стохастических параметрических моделей. Недостатком общепринятого подхода представляется объединение в одну группу всех различных по физической природе общих причин, воздействующих на резервируемые элементы, что не позволяет адекватно учитывать эффективность средств защиты против отказов по общей причине и приводит к слишком грубым оценкам.

Такое огрубление во многом является следствием общепринятого метода явного отображения таких событий непосредственно на дереве отказов аналогично независимым отказам. Этот способ обладает принципиальными недостатками: значительным увеличением размеров дерева отказов, сложностью корректного аналитического определения временных характеристик устранения события множественного отказа, типа контроля и его периодичности для ряда отказов по общей причине.

Неопределенность исходных данных по отказам по общим причинам связана с редкостью таких событий, трудностью их классификации, несовершенством системы сбора информации, а также с тем, что отказы по общей причине являются проявлением всей совокупности свойств конкретной АС. Поэтому они находятся в сильной зависимости от конкретных особенностей проекта, условий изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования. Следовательно, применение данных других объектов, например, зарубежных АС, практически делают проблематичным использование результатов анализа и соответствующих выводов.

Потенциальными источниками информации по отечественным АС являются базы данных ССОИН, эксплуатируемая во ВНИИАЭС, ИСКО АС, эксплуатируемая в МХО "Интератомэнерго", "Информационная система по нарушениям в работе АС", эксплуатируемая во ВНИИАЭС. Для всех этих систем

характерно отсутствие целенаправленного сбора и обработки информации по отказам по общей причине.

В заключении главы сформулированы основные задачи работы:

1. Разработать методiku построения вероятностных моделей безопасности АС с учетом зависимых отказов;
2. Разработать детальные модели отказов по общей причине и методiku оценки вероятностей реализации аварийных последовательностей с учетом этих моделей;
3. Разработать алгоритм и программу расчета вероятностных показателей безопасности АС, реализующие вышеуказанные методики;
4. Разработать принципы сбора и обработки информации по отказам по общей причине на отечественных АС и создать базу данных для проведения анализов таких отказов;
5. Провести качественный и количественный анализ зависимых отказов в рамках выполнения вероятностных оценок безопасности нескольких проектируемых АС с ядерным реактором ВВЭР.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ характеризуется АС как объект исследования и ВАБ АС как метод исследования, дана классификация зависимых отказов, разработаны методики их количественного анализа, приведено описание расчетных программ, в которых реализованы эти методики.

АС представляет собой сложную человеко-машинную систему, характеризующуюся различными детерминированными и случайными связями составляющих ее элементов и большим числом возможных состояний.

Зависимость между объектами может быть вызвана функциональными причинами, имеющими детерминистическую природу. Функциональными причинами отказа или неготовности являются отказы других объектов. Ос- тальные виды зависимостей вызывают отказы по общей причине, имеющие стохастический характер. На основании анализа нарушений на АС СССР, собранных во ВНИМАЭС "Информационной системой по нарушениям в работе АС" за последние 7 лет, результатов обследований систем безопасности на отечественных АС, а также зарубежных данных проведена классификация общих причин отказов. Такими причинами могут быть: проектно-кон- структорские ошибки; ошибки, совершенные при реализации проектных решений; ошибки при эксплуатации; неблагоприятные условия окружающей среды. Для защиты от зависимых отказов предусматриваются разнообразные меры, обладающие определенной эффективностью. Разнообразие ис- точников зависимых отказов, степени их проявления в различных струк- турах и мер защиты против таких отказов придает уникальность каждой конкретной АС. Поэтому для учета специфики указанных аспектов необ- ходима разработка детальных моделей.

ВАБ представляет собой системное исследование, проводимое с

целью оценки вероятностей и размеров радиационных воздействий на население, окружающую среду и персонал АС для случаев возникновения опасных нарушений в работе АС (аварий).

Анализ и моделирование функциональных зависимостей проводится на различных этапах выполнения ВАБ. Особенностью методики проведения ВАБ, разработанной в институте "Атомэнергопроект", являются три уровня моделирования путей развития аварии. На верхнем уровне моделирование проводится с помощью функционально-системных деревьев событий. На втором уровне разрабатываются логические диаграммы в виде структурно-функциональных схем (см. рис.1), описывающие условия реализации отдельных путей развития аварии. Элементами диаграммы являются модули, представляющие отдельные каналы технологических и обеспечивающих систем или их части, а также наиболее важные действия персонала. На этом уровне проводится моделирование функциональных зависимостей между системами безопасности (их частями). На основании построенных диаграмм производится преобразование при помощи ЭВМ каждого пути развития аварии (функционального минимального сечения) в набор модульных минимальных сечений, т.е. сечений, элементами которых являются отказы модулей. На третьем уровне производится разработка детальных вероятностных моделей, характеризующих рассматриваемые пути развития аварий. Эти модели представляют собой элементные деревья отказов для отдельных модулей.

Получение набора модульных минимальных сечений, характеризующих рассматриваемый путь развития аварии, дает возможность проводить их качественное просеивание на промежуточном этапе анализа. Для проведения просеивания модульных минимальных сечений разработаны следующие принципы:

1) просеивание осуществляется на основании результатов грубого оценивания вероятностей реализации модульных минимальных сечений;

2) для проведения оценивания элементам модульных минимальных сечений присваиваются следующие вероятности:

$1 \cdot 10^{-1}$  - модулям, представляющим собой ошибочные действия персонала;

$1 \cdot 10^{-3}$  - части модульного минимального сечения (нескольким модулям), имеющей в своем составе хотя бы одну группу элементов, подверженных воздействию общей для всей группы причины;

$1 \cdot 10^{-2}$  - остальным модулям, элементы которых не подвержены воздействию общих причин совместно с элементами модулей, образующих оцениваемое сечение;

3) критерием исключения модульных минимальных сечений из дальнейшего рассмотрения является  $P_{\max} \cdot 10^{-3}$ , где  $P_{\max}$  - наибольшая



вероятность реализации среди оцененных сечений. Исключаются сечения, имеющие меньшую, чем критериальное значение, вероятность.

Использование промежуточной логической модели (структурно-функциональной схемы) для моделирования функциональных зависимостей на уровне систем имеет следующие достоинства:

- уменьшение объема и наглядность исходной логической информации;
- возможность проведения просеивания результатов на ранних этапах вычислений, позволяющую значительно сократить их объем;
- облегчение инженерного анализа получаемых результатов.

Методика анализа функциональных зависимостей реализована в программе APRA (см. рис.2). Программа APRA является составной частью программного комплекса VEGA, предназначенного для проведения ВАР АС. Программа APRA реализована на персональной ЭВМ типа IBM PC/AT. Объем исполняемого файла программы APRA составляет 200 кБт.

Программа APRA имеет следующие ограничения: число генерируемых модульных минимальных сечений не более 1000; общее число элементов исходной логической диаграммы - не более 50.

Основная цель разработки методики отказов по общим причинам состояла в создании эффективного инструмента, который бы позволил как количественно прогнозировать результат воздействия таких отказов на вероятностные показатели безопасности с возможно меньшей неопределенностью, так и гибко реагировать на различные проектные решения, направленные на повышение степени защищенности оборудования систем безопасности. Это обеспечивается:

- определением вероятностей возникновения отказов по общей причине путем отдельного моделирования событий, имеющих различные по происхождению источники;
- определением вида и периодичности контроля события отказа по общей причине с учетом вида, периодичности и стратегии контроля отказов отдельных элементов, отказавших в событии;
- определением среднего времени устранения отказа по общей причине с учетом стратегии и среднего времени восстановления отдельных отказавших элементов, их влияния на выполнение системой требуемых функций, регламентных ограничений.

Методика предусматривает выделение трех классов групп элементов, подверженных возможности отказа по общей причине. Признаками принадлежности групп элементов к тому или иному классу являются следующие:

- класс общность конструкции резервируемых элементов;
- класс общность размещения резервируемых элементов различных

каналов;

3 класс - одинаковые для различных элементов процедуры технического обслуживания и/или проверок, которые сопровождаются или могут сопровождаться изменением состояния элемента или его составных частей.

К первому классу отнесены элементы, у которых отказы по общей причине вызываются наличием дефектов изготовления и монтажа. Это приводит к снижению несущей способности элементов, что не всегда выявляется при пуско-наладочных или периодических испытаниях систем, т.к. нагрузки при испытаниях зачастую не полностью адекватны аварийным. Очевидно, что отказы такого типа являются неконтролируемыми при нормальной эксплуатации и не зависящими от времени безаварийной эксплуатации системы. Для их моделирования удобно использовать модель базового параметра, т.е. непосредственные статистические оценки вероятностей (или интенсивностей) отказов по общей причине определенных комбинаций резервируемых элементов.

Элементы второго класса подвержены отказам по общей причине из-за экстремальных внешних воздействий окружающей среды. Эти внешние воздействия делятся на два подкласса по характеру их проявления для рассматриваемых элементов: ударные воздействия, приводящие к идентификации неработоспособного состояния вскоре после своего возникновения (например, пожар) и воздействия, вызывающие скрытые отказы элементов (например, повышенная влажность, температура, вибрация). Последние связаны с нарушением нормальных эксплуатационных условий расположенного в одном помещении резервируемого оборудования. Такое оборудование систем безопасности эксплуатируется в режиме ожидания с периодическими проверками работоспособности, поэтому эти отказы являются периодически контролируемыми.

Множественные отказы элементов 3-го класса связаны с повторяющимися ошибками эксплуатационного персонала при операциях технического обслуживания или проверок работоспособности резервируемого оборудования. Возможны два типа источников отказов по общей причине вследствие ошибок персонала:

-периодические обходы и/или техническое обслуживание резервируемых элементов, проводимое одной группой лиц в течение одной смены, при которых требуются или могут потребоваться активные действия персонала, влияющие на работоспособность оборудования, например, регулировка расхода, корректировка уровня;

-периодические проверки работоспособности или техническое обслуживание резервируемых элементов, проводимое одной группой лиц в течение одной смены, на период которых требуется отключение оборудования.

Отказы по общей причине обоих типов возникают в режиме ожидания оборудования и являются периодически контролируруемыми. Их моделирование также проводится с помощью одноименной модели:

$$\lambda_i = \begin{cases} \nu * p^i * (1-p)^{n-i} & i=1, \dots, n-1 \\ \nu * (p^n + \omega) & i=n \end{cases}$$

- где  $n$  - число обслуживаемых испытываемых резервируемых элементов;  
 $\lambda_i$  - интенсивность отказа вследствие таких ошибок одновременно ровно  $i$  определенных элементов, 1/час;  
 $\nu$  - частота осмотров (операций технического обслуживания) оборудования или испытаний с отключением оборудования, 1/час;  
 $p$  - условная вероятность неправильного выполнения персоналом исполнительской части функции контроля;  
 $\omega$  - условная вероятность неправильного выполнения персоналом подфункции принятия решения функции контроля.

Остальные характеристики события отказа по общей причине (вид и периодичность контроля, время и возможность устранения) зависят от свойств конкретных отказавших элементов. Методика их определения ориентирована на использование расчетной программы в процессе генерации дополнительных минимальных сечений с отказами по общей причине.

При их определении учитываются следующие факторы:

- а) различия в видах и моментах контроля элементов, входящих в рассматриваемое минимальное сечение;
- б) различные стратегии контроля и восстановления отказавших элементов;
- в) регламентные ограничения;
- г) неполнота данных по интенсивностям (вероятностям) возникновения события большой кратности.

Для определения вида контроля события отказа по общей причине используются следующие правила:

- событие имеет непрерывный тип контроля, если  $n_p + n_n \leq LEV$ ;
- событие имеет периодический тип контроля, если  $n_n \leq LEV < n_p + n_n$ ;
- событие является неконтролируемым, если  $n_n > LEV$ ;

где  $n$  - число отказавших элементов с периодическим видом контроля отказов;

$n$  - число отказавших неконтролируемых элементов;

LEV -уровень детализации, т.е. максимальная кратность рассматриваемых отдельно отказов, выше которой возможен только один отказ всей группы элементов.

Далее, если отказ по общей причине имеет периодический тип контроля, то необходимо определить его периодичность. Рассмотрим

случай отказа по общей причине  $m$  периодически контролируемых элементов ( $n_p = m$ ) из группы  $n$  элементов, подверженной воздействию общей причины и входящей в  $N$  каналов системы безопасности ( $n \geq N$ ). Периодичность контроля события зависит от стратегии проверки каналов.

1 стратегия - все каналы проверяются одновременно с одинаковой периодичностью. При этой стратегии периодичность контроля отказа по общей причине будет равна периодичности контроля отказа отдельных элементов.

2 стратегия - все каналы проверяются с одинаковой периодичностью  $t_{oi}$ , но моменты проверок различных каналов сдвинуты на равные промежутки времени  $t_{oi}/N$  относительно друг друга. Учитывая то, что возникновение события отказа по общей причине равновероятно на интервале наблюдения  $t_{oi}$  период контроля такого события  $t_{om}$  определяется как средневзвешенный по множеству периодов между проверками каналов:

$$t_{om} = \left( \sum_{i=1}^k \frac{(k_1+1)^2}{N^2} \right) * t_{oi}$$

где  $k_1$  - число проверяемых подряд каналов без отказавших элементов на  $i$ -ом шаге, начиная с последнего момента проверки одного из  $m$  элементов;

$k$  - общее число шагов:

$$\sum_{i=1}^k (k_1+1) = N$$

Для определения времени восстановления отказа по общей причине использован метод, который предполагает, что событие отказа по общей причине существует вплоть до исчезновения условия отказа системы безопасности. В этом случае среднее время восстановления  $t_v$  определяется как среднее время, требуемое на восстановление элементов в определенном числе каналов системы безопасности. При этом учитываются регламентные ограничения при устранении отказов в режиме ожидания.

Время восстановления отказа по общей причине зависит от стратегии ремонта отказавших элементов. В настоящей работе рассмотрены две стратегии восстановления - последовательная и параллельная.

Первая стратегия, являющаяся наиболее консервативной, предусматривает, что одновременно восстанавливается только один элемент, и восстановление каждого последующего элемента начинается в момент окончания предыдущего. Такая последовательная стратегия реальна в условиях ограниченности ресурсов ремонта. При моделировании этой стратегии предполагается равновероятность выбора отказавшего элемента, с которого начинается процесс восстановления. В

дальнейшем восстанавливаются элементы этого же канала до полного восстановления работоспособности последнего.

Применение этой стратегии для случая, когда необходимо восстановление элементов в  $k$  каналах из  $N$  приводит к результату:

$$t_B = \frac{k}{N} * \sum_I t_{B_i}$$

где  $t_{B_i}$  - среднее время восстановления  $i$ -го элемента (суммирование производится по всем элементам, отказавшим в событии).

Стратегия параллельного восстановления, являющаяся наиболее оптимистической, предусматривает, что восстановление всех отказавших элементов начинается и производится одновременно. Эта стратегия предполагает неограниченность ресурсов ремонта. Случайное время до ликвидации события с отказом по общей причине  $\tau$  при параллельной стратегии восстановления ( в случае достаточности восстановления работоспособности одного канала для восстановления работоспособности системы ) может быть выражено:

$$\tau = \min_{1 \leq i \leq N} \max_{1 \leq j \leq k} \tau_{ij}$$

где  $\tau_{ij}$  - случайное время восстановления  $j$ -го элемента  $i$ -го канала;  
 $N$  - число отказавших каналов;

$k$  - число элементов, отказавших в  $i$ -ом канале.

Достаточно точная и эффективная оценка  $t_B = M[\tau]$  может быть получена путем принятия следующих приближенных соотношений:

$$t_B = \left( \sum_{i=1}^N \mu_i \right)^{-1}$$

$$\mu_i = \left( M \cdot \left[ \max_{1 \leq j \leq k_i} \tau_{ij} \right] \right)^{-1} = \left\{ \max_{1 \leq j \leq k_i} \left( t_{B_{ij}} ; t_{B_i}^* \cdot \ln \left[ \frac{3}{2} * (k_i + 1) \right] \right) \right\}^{-1}$$

$$t_{B_i} = \frac{1}{k_i} * \sum_{j=1}^{k_i} t_{B_{ij}}$$

где  $\mu_i$  - интенсивность восстановления работоспособности  $i$ -го канала;

$t_{B_{ij}}$  - среднее время восстановления  $j$ -го элемента в  $i$ -ом канале.

Определение максимума случайной величины через максимумы средних времен восстановления значительно упрощает инженерные расчеты. В то же время погрешность приближенных формул по сравнению с точными оценками для реальных задач не превышает 10%.

При разработке метода введения событий отказов по общей причине в логическую модель преследовалась цель минимизации трудозатрат и объема вычислений при использовании метода. Этого позволяет достичь неявный способ ведения отказов по общей причине в логическую модель.

который основывается на предварительном получении набора элементарных минимальных сечений, составленных только из независимых отказов и характеризующих условия реализации пути развития аварии (отказа системы). Суть способа заключается в анализе базовых минимальных сечений, набор которых определяется по дереву отказов для независимых отказов. Если базовое минимальное сечение содержит отказы двух или более элементов, подверженных воздействию общей причины, то производится генерация дополнительных сечений, содержащих отказы по общей причине вместо независимых отказов соответствующих элементов. При этом производится генерация и так называемых объемлющих сечений, которые содержат следующее событие: отказ по общей причине элементов базового минимального сечения вместе с другими элементами, подверженными воздействию этой общей причины. При воздействии нескольких общих причин на два или более элементов базового минимального сечения генерация набора дополнительных сечений проводится для каждой из этих общих причин. Выявление элементов, подверженных воздействию общей причины, осуществляется путем сравнения идентификаторов, характеризующих признаки общности элементов (общность конструкции, расположения и/или эксплуатационных процедур).

Процедура генерации дополнительных сечений с отказами по общей причине предусматривает, что объемлющие сечения проверяются на уникальность и одинаковые с образованными ранее отбрасываются. Эта операция необходима, т.к. из различных базовых минимальных сечений могут генерироваться одинаковые объемлющие сечения. Сокращение объема вычислений обеспечивается процедурами просеивания получаемых минимальных сечений.

Методика моделирования отказов по общей причине была реализована в различных версиях программы SOSAFAN, работающих в составе программного комплекса VEGA или автономно (см. рис.3). Программа SOSAFAN реализована на персональной ЭВМ типа IBM PC/AT. Исполняемый файл программы SOSAFAN занимает объем 175 КБт. Программа SOSAFAN имеет следующие ограничения: максимальное число учитываемых независимых первичных событий (отказов) - 500; максимальное число независимых событий в одном сечении - 8; максимальное число базовых минимальных сечений с независимыми отказами - 5000; максимальное число различных общих причин, учитываемых в анализе - 60; максимальное число минимальных сечений с отказами по общей причине, формируемых на основе одного базового сечения с независимыми отказами - 200.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ разработана система сбора и обработки эксплуатационной информации по отказам по общей причине оборудования систем безопасности АС, и представлена база данных по таким событиям.

Для повышения достоверности собираемой информации по отказам по общим причинам требуется сократить до минимума число промежуточных звеньев и установить обеспечение задач ВАБ приоритетной целью сбора и обработки данных. Это достигается путем ретроспективного сбора данных непосредственно по первичной эксплуатационной документации АС (оперативным журналам, журналам испытаний, дефектов, состояний оборудования, актам испытаний и расследований нарушений). Такой сбор должен осуществляться по техническому заданию, составленному специалистами в области ВАБ, и под их методическим руководством, особенно в части классификации событий.

Ретроспективный сбор информации о потенциальных отказах по общим причинам был организован на 3-4 блоках Кольской АС с реакторами ВВЭР-440 (проект В-213) и на 2-5 блоках Запорожской АС (проект В-320). Длительность наблюдения составила 3 года по каждому блоку Кольской АС и свыше 10 лет суммарно по 4 блокам Запорожской АС.

При проведении этого анализа было выявлено, что его процедура тесно связана и регламентируется конкретными методическими подходами ВАБ, в обеспечение которого создается база данных по отказам по общей причине. Среди аспектов ВАБ, влияющих на процедуру обработки данных, можно отметить следующие:

- 1) перечень функций безопасности, выбранных для моделирования;
- 2) критерии выполнения функций безопасности;
- 3) режимы работы АС;
- 4) принципы разделения систем, общих для нескольких энергоблоков;
- 5) границы оборудования, в рамках которых оно моделируется как один элемент;
- 6) размерность групп общих причин, т.е. число элементов в группах, моделируемых на отказы по общим причинам;
- 7) виды используемых параметрических моделей.

Общее число групп элементов Кольской и Запорожской АС составило 152 (число элементов в группе варьировалось от 2 до 12 единиц). Общая длительность наблюдения за этими группами составила  $3,6 \cdot 10^6$  часов. За время наблюдения было зарегистрировано 364 отказа оборудования систем безопасности. В результате качественного анализа было выявлено 31 событие-кандидат, потенциально являющиеся отказом по общей причине.

На основании анализа собранного статистического материала можно сделать следующие выводы:

1. Существующие информационные системы собирают относительно малое число отказов по общей причине;
2. Наибольшая субъективность связана с обработкой отказов оборуду-

дования различных каналов, выявляемых одновременно;

3. Вызывает сомнение достоверность информации, собранной таким способом по отказам по общим причинам в управляющих системах безопасности. Это может быть связано с плохой регистрацией таких событий в первичной эксплуатационной документации или с их включением в число отказов более крупных объектов.

Оценка параметров моделей была проведена в основном в соответствии с процедурой, рекомендуемой Руководством США "Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies. Volume 1,2 - NRC, NUREG/CR-4780, 1988, USA." Исключения касались не рассмотренной в нем специфики анализируемых АЭС, выявленных отказов и используемых параметрических моделей. Для получения количественных оценок обычно решались следующие задачи:

1) формирование массива отказов по общей причине из событий-кандидатов с определением числа исходов (вектора воздействия) события в системе, в которой оно произошло;

2) определение возможности распространения результатов анализа информации по отказам с АС, на которой были собраны данные, на АС, являющуюся объектом проведения ВАБ;

3) проецирование (перенос) событий отказов по общей причине на рассматриваемые системы.

Процедура переноса событий для групп с числом элементов не более 4-х подробно изложена в Руководстве США. При обработке информации по Кольской АЭС возникла необходимость проецирования событий из групп большей размерности. Для этого была получена универсальная формула переноса событий с уменьшением размерности группы элементов:

$$P_1^{(n)} = \sum_{k=1}^{l+m-n} \frac{C_{m-n}^{k-1} * C_n^1}{C_m^k} * P_k^{(m)} \quad \begin{matrix} l \in (0, n) \\ m > n \end{matrix}$$

где  $P_k^{(m)}$  - число исходов отказов  $k$ -ой кратности (вектор воздействия) в исходной группе из  $m$  элементов;

$P_1^{(n)}$  - число исходов 1-ой кратности (вектор воздействия) в анализируемой группе из  $n$  элементов;

$C_j^i$  - число сочетаний из  $i$  по  $j$  (биномиальный коэффициент);

4) статистическая оценка параметров моделей отказов по общей причине по статистическим данным;

5) оценка неопределенностей значений параметров.

Как показывает зарубежная практика статистическая неопределенность исходных данных, связанная с объемом выборки, не является основным вкладчиком в неопределенность оценок параметров. Для оценки



основного источника неопределенности ( классификации событий-кандидатов) были использованы рекомендации руководства США. Эти рекомендации заключаются в оценке параметров для предельно консервативных и оптимистических предположений в процессе классификации событий-кандидатов. Разброс значений параметров позволяет оценить пределы изменений результатов вследствие субъективного фактора при классификации событий-кандидатов. В таблице 1 приведены результаты исследования неопределенности значений параметров;

б)экспертная оценка параметров моделей, не поддающихся статистическому оцениванию.

Полученные статистические оценки параметров моделей по эксплуатационным данным не в полной мере характеризуют всю совокупность общих причин, которые могут воздействовать на оборудование систем безопасности. Поэтому во избежание недооценки вероятностных показателей безопасности АС статистические оценки параметров дополнялись экспертными для ряда моделей.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ содержатся результаты ВАБ 6-ти АС с ВВЭР с учетом зависимых отказов и разработанные на их основе рекомендации по снижению вклада таких отказов в нарушение безопасности АС.

Проведены ВАБ 6-ти АС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с учетом зависимых отказов, включая отказы по общей причине. Результаты проведенных анализов обобщены в табл.2. Следует отметить, что эти ВАБ выполнены в разном объеме, что оказывает влияние на значения полученных частот разрушения активной зоны. Поэтому в табл.2 приведены относительные вклады отказов по общей причине. На результаты анализов влияли также отраженные в табл. 2 различия в моделях и исходных данных. Тем не менее, можно сделать общий вывод, что отказы по общей причине являются наиболее значимым вкладчиком в частоту повреждения активной зоны.

Показано, что проектные решения, основанные на разнопринципности, являются эффективным средством снижения влияния отказов по общей причине и должны быть основой при разработке АС нового поколения. Примерами таких проектных решений являются:

1) применение пассивных и активных систем для выполнения одной функции безопасности (реализация физической разнопринципности).

Такое техническое решение было реализовано в проекте 5-го, 6-го блоков Балаковской АС в виде системы пассивного отвода тепла. Обоснование эффективности этого решения было осуществлено при проведении ВАБ 5-го, 6-го блоков Балаковской АС. Внедрение системы пассивного отвода тепла позволило значительно уменьшить вклад как независимых отказов, так и отказов по общей причине, в результате чего частота

повреждения активной зоны 5-го, 6-го блоков Балаковской АС уменьшилась приблизительно в 150 раз по сравнению с Ростовской АС, где такая система отсутствует. Отсутствие значительно выделяющихся доминантных вкладчиков по группам исходных событий на Балаковской АС показывает, что этот проект является более сбалансированным, чем проект Ростовской АС;

2) использование различных режимов функционирования резервируемых каналов систем безопасности, часть из которых являются постоянно работающими, а остальные - эксплуатирующимися в режиме ожидания;

3) разработка регламента испытаний систем безопасности со сдвигом моментов проверок работоспособности отдельных каналов.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. Рассмотрены особенности АС как объекта исследования различных зависимостей при проведении ВАБ. Дана классификация зависимостей, включая отказы по общей причине, на основании опыта эксплуатации отечественных и зарубежных АС.

2. Разработана методика и программное обеспечение анализа функциональных зависимостей на системном уровне. Модель обеспечивает:

- уменьшение объема исходной логической информации;
- сокращение объема вычислений путем процедуры промежуточного просеивания модульных минимальных сечений;
- наглядность представления исходных данных и получаемых результатов.

3. Разработана методика и программное обеспечение анализа отказов по общей причине. Методика предусматривает раздельное моделирование различных классов отказов по общей причине и введение таких событий в логическую модель в неявном виде на уровне минимальных сечений. Модель обеспечивает:

- детальный учет степени защиты против отказов по общей причине;
- определение всех необходимых количественных характеристик таких первичных событий;
- сокращение объема вводимой в программу исходной логической информации;
- уменьшение объема вычислений за счет процедур просеивания элементарных минимальных сечений.

4. Методика анализа зависимых отказов, в том числе отказов по общей причине, включена в проект отраслевого Руководства по выполнению ВАБ АС, используемого в институтах "Атомэнергопроект" для проведения ВАБ.

5. Разработана система сбора и обработки данных по отказам по

общей причине оборудования систем безопасности отечественных АС. На основании статистической информации получены оценки параметров моделей таких отказов по ряду типов тепломеханического оборудования АС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

6. Разработанная методика анализа зависимых отказов и полученные оценки параметров моделей отказов по общей причине использованы при проведении ВАБ 6-ти отечественных и зарубежных АС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. 5 анализов включены в состав проектов соответствующих АС.

Получены количественные оценки частоты повреждения активной зоны реактора с учетом влияния зависимых отказов и оценки вклада отказов по общей причине в этот вероятностный показатель безопасности. Проведено обоснование проектных решений, направленных на защиту против отказов по общей причине. Методика и результаты ВАБ АС "Пакиш" (Венгрия), "Темелин" (Чехословакия) и "Ловииза" (Финляндия) прошли экспертизу МАГАТЭ и зарубежных заказчиков и партнеров.

Разработаны принципы, обеспечивающие снижение влияния отказов по общей причине в проектах АС повышенной безопасности.

Основные материалы диссертации изложены и опубликованы в работах:

1. Токмачев Г.В. Параметрические модели отказов по общей причине. - В кн.: Диагностика и прогнозирование надежности элементов ядерных энергетических установок. Сборник научных трудов № 6 кафедры АСУ. -Обнинск, ОИАТЭ, 1990, с.3-8.

2. Токмачев Г.В. Проблемы сбора и обработки данных по отказам по общим причинам. - В кн.: Диагностика и прогнозирование надежности элементов ядерных энергетических установок. Сборник научных трудов № 7 кафедры АСУ. -Обнинск, ОИАТЭ, 1991, с.4-9.

3. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. -М.:Ядерное общество СССР, 1992.

4. Швыряев Ю.В., Морозов В.Б., Токмачев Г.В. Анализ зависимых отказов при проведении вероятностных анализов безопасности. -М.:Советско-Английский семинар по вероятностному анализу безопасности АЭС, апрель 1991.

5. Комплекс программ для ЭВМ по оценке вероятностных показателей АС. -М.:АЭП, инв.№ 0-ХIII.1.3/90, 1990.

6. Моделирование аварийных последовательностей для АЭС с ВВЭР-440 по Программе координированных исследований МАГАТЭ. Выполнение окончательного моделирования и проведение анализа чувствительности. -М.:АЭП, инв.№ 13/0-91, 1991.

Средние оценки базового параметра для  
трехэлементной системы

Таблица 1.

№№	Наименование оборудования	АЗС	Вероятность на требование			
			Двойные отказы		Тройные отказы	
			Консервативная оценка	Реалистическая оценка	Консервативная оценка	Реалистическая оценка
1	Насос	КолАЗС	$9,1 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$
		ЗАЭС	$1,8 \times 10^{-3}$	$9,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-4}$
2	Дизель-генератор	КолАЗС	$3,6 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-5}$
		ЗАЭС	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-4}$	-
3	Вентилятор	КолАЗС	$1,6 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-4}$	0	0
4	Запорная арматура с эл/привод.	КолАЗС	$9,8 \times 10^{-5}$	$9,6 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$
5	Регулирующая арматура	КолАЗС	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	0	0

Таблица 2.

Результаты моделирования отказов по общей причине в проведенных вероятностных анализах безопасности.

Наименование АЭС	Тип АЭС	Характер моделирования отказов по общей причине	Использованные модели	Источник исходных данных		Вклад отказов по общей причине в вероятность плавления активной зоны %
				по независимым отказам	по отказам по общей причине	
	2	3	4	5	6	7
Темелин, *) Чехословакия	ВЕЗР-1000, стандартный блок	Раздельное моделирование общих причин	Базового параметра, биномиальная	База данных МАГАТЭ	США	93
Ростовская, ОССР	ВЕЗР-1000, стандартный блок	Обобщенное моделирование общих причин	Греческих букв	База данных МАГАТЭ	США	86,5
Балаковская-5, 6, ОССР	ВЕЗР-1000, усовершенствованный блок	Обобщенное моделирование общих причин	Греческих букв	База данных МАГАТЭ	США	76
Ловицца-3, *) Финляндия	ВЕЗР-1000, усовершенствованный блок	Обобщенное моделирование общих причин	Греческих букв	База данных МАГАТЭ	США	83
Хурагуа, *) Куба	ВЕЗР-440, усовершенствованный блок	Обобщенное моделирование общих причин	Базового параметра	Кольская АЭС	Кольская АЭС	43
Пакш, *) Венгрия	ВЕЗР-440, стандартный блок	Раздельное моделирование общих причин	Базового параметра, биномиальная	База данных МАГАТЭ	США	78

\*) Рассмотрено ограниченное число исходных событий аварии.

- О — обеспечивающие системы
- Д — дополнительная система АПЭН
- А — система АПЭН
- Б — БРУ—А
- К — система расхолаживания через технологические конденсаторы
- С — SA03 высокого давления
- Р — питательные узлы дополнительной системы АПЭН
- Л — питательные узлы системы АПЭН
- X, Y, Z — индексы каналов систем
- Фв — функция персонала по управлению БРУ—А
- Фт — функция персонала по подготовке к работе системы расхолаживания через технологические конденсаторы

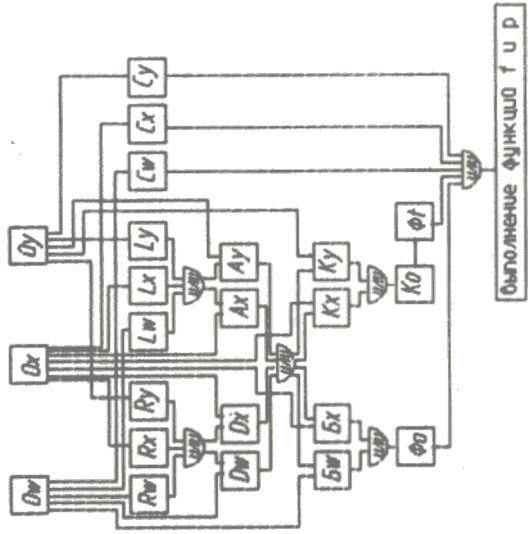


Рис. 1. Структурно-функциональная схема собственного выполнения функций f u p.

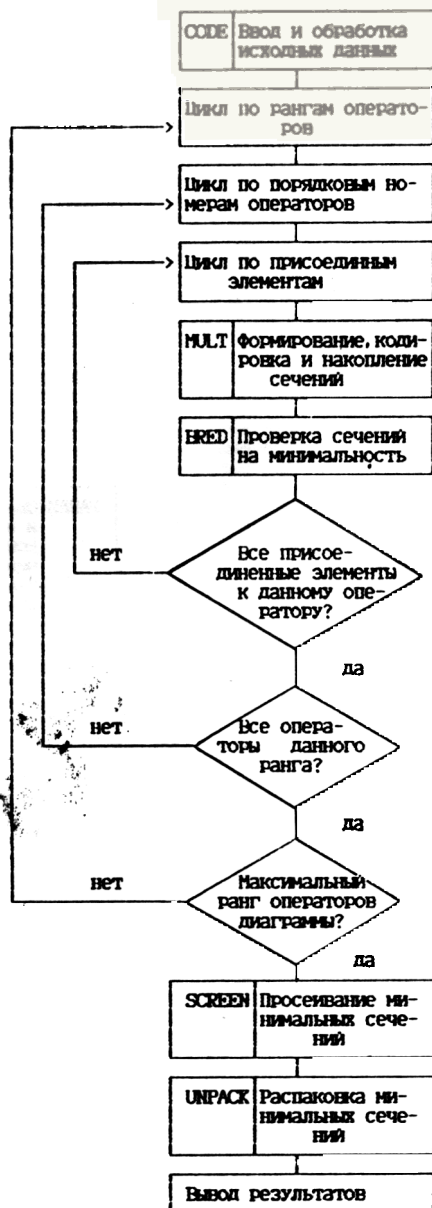


Рис. 2. Блок-схема программы APRA.

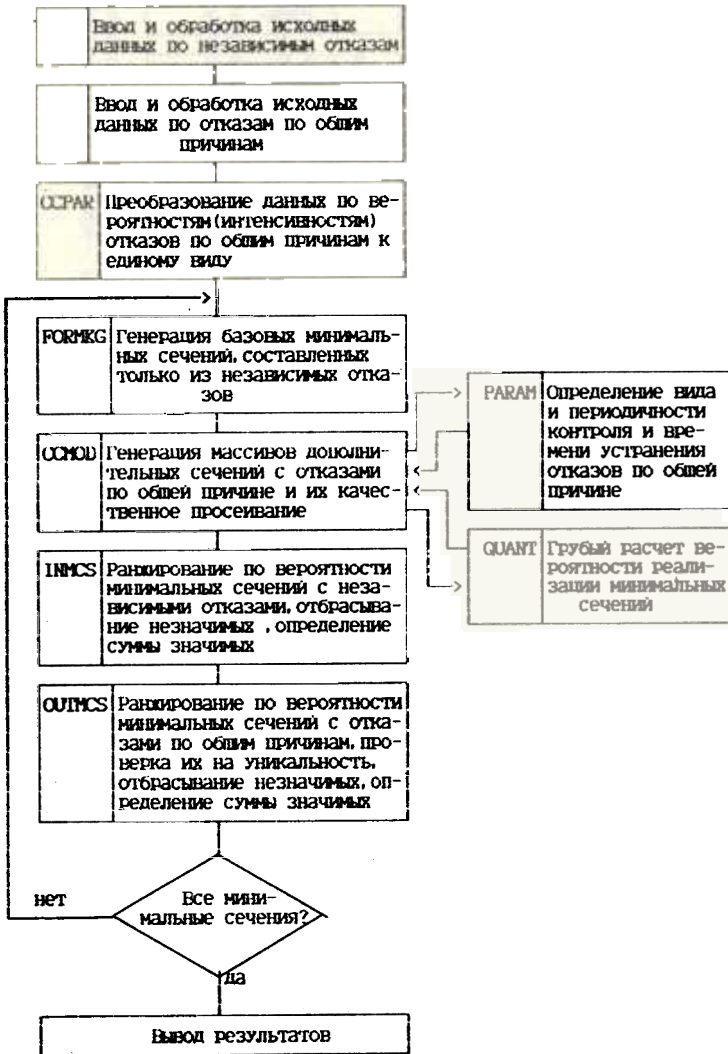


Рис. 3. Блок-схема программы SOSAFAN.