

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 вычислительной
техники, математического моделирования
и математических методов в научных ис-
следованиях (физика, информатика, вычис-
лительная техника и автоматизация).

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата
технических наук.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор

В. А. Острейковский

кандидат технических наук, старший

научный сотрудник

Ю. В. Швыряев

Обнинск, 1992 г.

Геннадий

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
Глава 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ В ВЕРОЯТНОСТНЫХ АНАЛИЗАХ БЕЗО- ПАСНОСТИ АС.	9
1.1. Методы моделирования зависимостей.	11
1.2. Базы данных по отказам по общим причинам.	27
1.3. Определение целей и постановка за- дачи исследования.	29
Глава 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ЗАВИ- СИМЫХ ОТКАЗОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВАБ.	32
2.1. Характеристика атомной станции как объекта исследования.	32
2.2. Характеристика вероятностного ана- лиза безопасности как метода иссле- дования.	45
2.3. Требования к методике анализа за- висимых отказов.	48
2.4. Разработка методики анализа функ- циональных зависимостей.	52
2.5. Разработка методики анализа отка- зов по общей причине. Математические модели.	67
2.6. Разработка метода введения событий	

отказов по общей причине в логическую модель.	86
2. 7. Описание программы анализа функциональных зависимостей.	95
2. 8. Описание программы анализа отказов по общей причине.	98
2. 9. Заключение.	103
Глава 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ОТКАЗАМ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АС.	105
3. 1. Цель, организация сбора данных и их состав.	105
3. 2. Классификация отказов.	109
3. 3. Общая характеристика статистического материала.	113
3. 4. Оценка параметров моделей отказов по общим причинам по статистическим данным.	117
3. 5. Заключение.	127
Глава 4. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АНАЛИЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ВВЭР С УЧЕТОМ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ.	128
4. 1. Особенности проектов анализируемых АЭС.	128
4. 2. Результаты оценки вклада отказов по общей причине в частоту серьезного повреждения активной зоны реактора.	129
4. 3. Заключение.	138
Заключение.	139
Список использованной литературы.	141
Приложение 1. Список сокращений.	155

ВВЕДЕНИЕ.

В настоящее время техногенная цивилизация столкнулась с глобальными проблемами, порожденными предшествующим научно-техническим развитием и затрагивающими сами основы ее существования. Как отмечалось на 14-ом Мировом энергетическом конгрессе, немалую лепту в возможность вырождения человечества вносит и развитие энергетики, связанное с проблемами кислотных дождей, парникового эффекта, смога в городах и радиоактивности /1/.

Последняя проблема, относящаяся в первую очередь к атомной энергетике и определяющая ее потенциальную опасность, вызывает рост требований и решений, направленных на замораживание или ликвидацию атомной энергетики. Как правило, главным и справедливым основанием для таких решений является недостаточное обоснование безопасности атомных станций (АС).

В ряде работ /2,3/ показано, что АС обладает всеми свойствами сложной человеко-технической системы. Поэтому исследование такого объекта должно проводиться методами системного анализа. Такое комплексное исследование безопасности как одного из основных свойств АС обеспечивает аппарат вероятностного анализа безопасности (ВАБ), позволяющий оценить вероятность и размеры радиационных воздействий на население, персонал АС и окружающую среду. Этот метод признан как сторонниками /4,5/, так и противниками атомной энергетики /6/ единственным практическим средством для качественной и количественной оценки уровня безопасности АС. ВАБ также является эффективным инструментом для выработки решений о возможности эксплуатации АС или целесообразности конструктивных и технологических изменений /7/.

Уникальное значение ВАБ определяется природой безопасности.

Для производства энергии АС используется тепло, выделяемое при делении ядер урана и плутония, что сопровождается накоплением в реакторе значительных количеств радиоактивных продуктов деления. К настоящему времени большинство эксплуатирующихся АС сооружено с реакторами водо-водяного типа. Как показывает мировой опыт, АС с такими реакторами представляют собой источник энергии, удовлетворяющий самым жестким экологическим требованиям при сохранении условий их нормальной эксплуатации. Потенциальная опасность АС проявляет себя при авариях, сопровождающихся радиоактивным выбросом, когда накопленные в реакторе радионуклиды выходят за пределы, предусмотренные для их локализации.

Отсюда следует двойственный характер безопасности АС: радиационный и вероятностный, так как при нормальной эксплуатации АС являются экологически чистыми объектами, а любая радиационная авария - это случайное редкое событие. Поэтому детерминистические методы не могут обеспечить полноценной количественной оценки уровня безопасности. В то же время ВАБ позволяет рассмотреть АС как целостный объект, формируемый различными видами связей, обладающих иерархической структурой и активно взаимодействующий с окружающей средой и подсистемами.

Важной характеристикой АС как сложной человеко-технической системы является принципиальная несводимость ее свойств к сумме свойств составных частей (неаддитивность), и, наоборот, - невыводимость из последних свойств целостного объекта.

Следствием этого является невозможность оценки количественных показателей безопасности АС по статистическим данным об интенсивностях отказов оборудования и вероятностях ошибок персонала АС, предполагая абсолютную независимость таких событий. Поэтому неот-

емлемой и важнейшей задачей любого ВАБ должно быть адекватное моделирование различных зависимостей на всех этапах его проведения.

Среди зависимостей различаются следующие:

-зависимости между функциями безопасности, когда выполнение одной функции безопасности влияет на возможность выполнения другой функции;

-зависимые отказы оборудования(систем безопасности) АС.

Зависимые отказы, в свою очередь, делятся на /8/:

-отказы, вызванные функциональными причинами, когда отказ одного оборудования(системы безопасности) приводит к отказу другого оборудования (системы безопасности). Частным случаем таких событий являются каскадные отказы, когда отказ одного оборудования приводит к отказу и повреждению другого оборудования, вызывающему необходимость восстановления последнего;

-отказы по общей причине, связанные с широким классом случайных ошибок человека на всех этапах жизненного цикла объекта или стохастическими внешними воздействиями.

Ранние ВАБ для отечественных АС с ВВЭР /9,10/ выполнялись без учета отказов по общей причине. Это объясняется трудностями моделирования и отсутствием исходных данных по таким видам отказов. Однако, 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 /11/. Так, в ряде завершенных или откорректированных зарубежных ВАБ, получено, что отказы по общей причине вносят от 15% до 90% вклад в частоту повреждения активной зоны на различных АС США /12/, Швеции /13/ и ФРГ /14/.

Важность анализа зависимых отказов закреплена в нормативных

документах МАГАТЭ /15/ и СССР /16/. Последний предписывает, в частности, обязательность такого анализа при проектировании АС. Это позволит считать актуальной тему настоящей работы.

Настоящая работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском, проектно-конструкторском и изыскательском институте "Атомэнергопроект". Ее основные результаты отражены в работах /17-31/ и внедрены в ряд проектов АС с ВВЭР /32-36/.

Диссертационная работа состоит из четырех глав.

В первой главе рассматривается современное состояние проблемы моделирования зависимостей при проведении вероятностных анализов безопасности АС, создания базы данных по отказам по общей причине, и ставятся задачи исследования.

Во второй главе характеризуется АС как объект исследования и вероятностный анализ безопасности АС как метод исследования, разработаны методики количественного анализа зависимых отказов, приведено описание расчетных программ, в которых реализованы эти методики.

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.

В четвертой главе содержатся результаты вероятностных анализов безопасности АС с ВВЭР с учетом зависимых отказов и разработанные на их основе рекомендации по снижению вклада таких отказов в нарушение безопасности АС.

Автор сердечно благодарит к. т. н. Морозова В. Б. и к. т. н. Швыряева Ю. В. за большую помощь в разработке научных основ диссертационной работы и совместную разработку методики анализа зависимых отказов, к. т. н. Морозова В. Б. и Байкову Е. В. за участие в разработке расчетных программ, Гайдадея А. В., Наумова Л. П., Шахисламова Э. С. за

большую помощь в сборе первичной эксплуатационной информации по отказам. Диссертационная работа не могла состояться без большой группы специалистов института "Атомэнергопроект", выполнявших вероятностные анализы безопасности АС, и особенно, к. т. н. Швыряева Ю. В., Барсукова А. Ф., к. т. н. Морозова В. Б., к. т. н. Деревянкина А. А., Байковой Е. В., Краснорядцевой О. О., Гуськовой Л. И., Золотова В. С., Альтшулера А. М., Маскиля Ф. и .

Автор особенно признателен Гуськовой Л. И. за большую помощь в оформлении работы.

ГЛАВА I. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ В ВЕ- РОЯТНОСТНЫХ АНАЛИЗАХ БЕЗОПАСНОСТИ АС.

Первым крупным исследованием в области ВАБ стал доклад Расмуссена WASH-1400, опубликованный в 1975 году в США /37/. В 1979 году выполнен аналогичный ВАБ в ФРГ /38/, а к настоящему времени в ряде стран проведено в различном объеме свыше 30 ВАБ /5/.

Следует отметить, что большая неопределенность результатов ранних ВАБ вызвала необходимость их корректировки в последние годы, в т.ч. в части моделирования различного рода зависимостей /12, 14/.

В Советском Союзе первые ВАБ выполнены лишь в 1988 году /10, 39/. К настоящему времени завершено несколько анализов для различных типов реакторов /32-36, 40-42/. Полученные в них результаты можно рассматривать как предварительные из-за ряда допущений и ограничений, принятых при проведении этих анализов.

Серьезным недостатком всех завершенных ВАБ является значительная неопределенность полученных результатов. Одним из основных источников неопределенности является моделирование зависимостей при проведении ВАБ (см. рис. I.1) как вследствие использования достаточно грубых моделей, так и вследствие значительной неопределенности базы данных. Поэтому в последние пять лет наблюдается большая активность как в области разработки методов качественного анализа зависимых отказов и их моделирования в логических моделях, так и в создании базы данных по отказам по общей причине. Однако, проблемы с исходными данными и

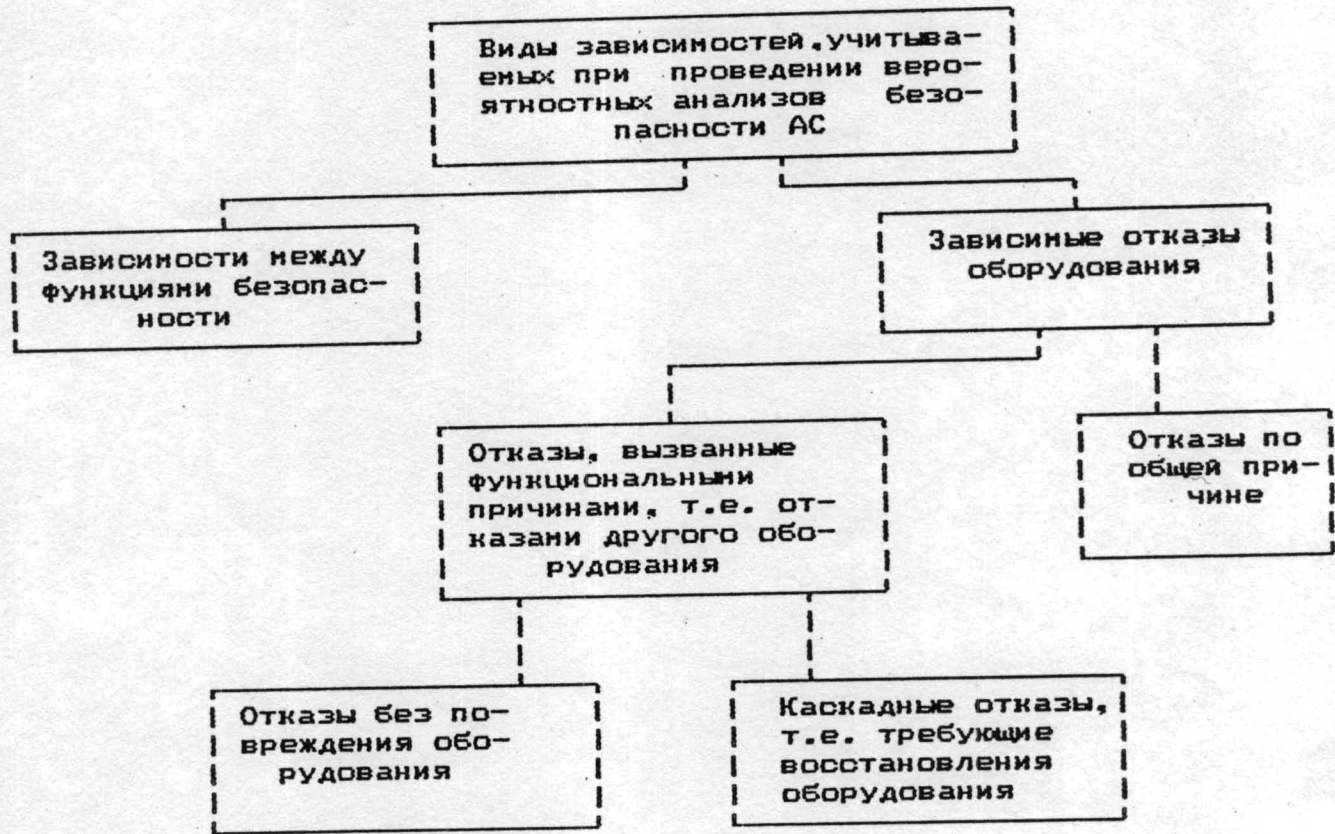


Рис.1.1. Классификация видов зависимостей, учитываемых при проведении вероятностных анализов безопасности АС.

неотработанность методов моделирования пока приводят к значительным расхождениям в оценках, что подтверждают результаты параллельных международных исследований/8,43,44/.

I.I. Методы моделирования зависимостей.

I.I.I. Зависимости между функциями безопасности.

Для моделирования зависимостей между функциями безопасности практически повсеместно используется графоаналитический метод дерева событий/12,14,45-47/. Как правило, строится малое функционально-системное дерево событий. В нем за начальную точку берется исходное событие и, в зависимости от выполнения функций (или состояния систем, их выполняющих), осуществляется логический перебор различных путей развития аварии. Зависимости между функциями безопасности отображаются явно путем исключения соответствующих путей развития аварии.

I.I.2. Отказы, вызванные функциональными причинами.

Идентификация и моделирование функциональных зависимостей с самого начала включаются в анализ путей развития аварии. Обычно каждый вид отказа объекта анализируется в отношении его влияния на работоспособность других систем и/или элементов/8/.

Результаты качественного анализа функциональных зависимостей между системами отражаются в матрицах зависимостей /48-51/, а результаты анализа функциональных зависимостей между элементами - в таблицах видов и последствий отказов (FMEA)/18,43/. При моделировании функциональных зависимостей используется их явное отображение на соответствующих логических диаграммах: деревьях

отказов или системных *) деревьях событий. Эта процедура выполняется либо аналитически /9,10/, либо с помощью компьютерных программ/48/. Процедура моделирования каскадных отказов в литературе подробно не описана.

Основным недостатком логических моделей, используемых для моделирования функциональных зависимостей, является их громоздкость. Это не только повышает вероятность ошибки при аналитических процедурах, но и ограничивает возможности детального моделирования путей развития аварии на соответствующих АС с ВВЭР/49-51/. Эти ограничения связаны с объемом памяти и быстродействием ЭВМ и вызывают необходимость предварительной аналитической модуляризации (укрупнения) используемых логических моделей. Такой алгоритм анализа связан с риском потери важных зависимостей, например, значимых отказов по общей причине.

Исследование практики анализа функциональных зависимостей позволяет сформулировать две задачи, требующие решения:

1. Необходимо разработать алгоритм анализа неготовностей, вызванных функциональными причинами, с применением компактных логических моделей.

2. Необходимо разработать модели для анализа каскадных отказов.

1.1.3. Отказы по общей причине.

Отказы по общей причине обусловлены возникновением случайных событий, имеющих стохастический характер и являющихся следствием

*) Системные деревья событий - это такие деревья событий, на которых в качестве промежуточных событий отображаются состояния (работоспособные и отказовые) отдельных структурных частей систем безопасности, например, отдельных их каналов.

повторяющихся человеческих ошибок при проектировании, сооружении и эксплуатации резервируемых объектов или следствием неблагоприятных воздействий окружающей среды. Многофакторность общих причин определяет принципиальную невозможность разработки для каждой из них отдельной модели, детерминированно описывающей причинно-следственный механизм. Поэтому для моделирования отказов по общей причине общепринято использование стохастических параметрических моделей /43,44,52/.

При проведении качественного анализа отказов по общей причине осуществляется последовательное исследование перечня причин, под воздействием которых могут попасть элементы систем, влияющих на протекание рассматриваемого пути развития аварии. Особое внимание здесь уделяется факторам, влияющим на зависимость резервируемых элементов: использованию групп идентичных элементов, их компоновке, подверженности элементов различным нагрузкам из окружающей среды, потенциальным множественным человеческим ошибкам при проектировании, изготовлении, сооружении и эксплуатации, примененным в проекте мерам защиты против отказов по общей причине.

На основании практики проведения ВАБ разработан ряд принципов защиты против отказов по общей причине, а именно /53-59/:

-полная функциональная независимость резервируемых элементов систем безопасности друг от друга и от систем нормальной эксплуатации;

-физическое разделение резервируемых объектов;

-разнопринципность, т.е. выполнение определенных функций различными объектами, функционирование которых основано на различных физических принципах, и применение различных по конструкции элементов;

-использование пассивных элементов или различных конструктивных решений ,обеспечивающих пассивное выполнение функции безопасности сразу после возникновения отказа;

-периодические испытания со сдвигом моментов проверок резервируемых объектов;

-осуществление эксплуатационных процедур на резервируемых объектах различными группами эксплуатационного персонала;

-автоматизация всех функций управления,требуемых в стрессовых ситуациях;

-проведение пуско-наладочных испытаний в максимально возможном объеме.

Эти принципы позволяют минимизировать влияние тех или иных классов общих причин.Однако,полное их исключение в проекте АС невозможно,так как отказы по общей причине могут быть выявлены только при реализации всех характерных условий,возникающих при аварии,что практически не может быть смоделировано в полном объеме при проведении испытаний.

Для моделирования эффективности различных средств защиты и характера проявления различных классов общих причин на рассматриваемых объектах необходима разработка детальных вероятностных моделей. Детализация моделей позволяет снизить уровень неопределенности результатов. Поэтому недостатком общепринятого подхода представляется объединение в одну группу всех различных по физической природе общих причин, воздействующих на резервируемые элементы/39,43,44,52,60/. Последующее моделирование обычно проводится с помощью какой-либо одной параметрической модели.

Такой обобщенный подход ведет к слишком грубым оценкам по ряду причин:

-из-за невозможности детального моделирования специфических

особенностей эксплуатации резервируемого оборудования и мер защиты против отказов по общей причине;

-из-за инвариантности получаемых количественных оценок относительно числа различных классов общих причин, воздействующих на группу резервируемых элементов;

-из-за отсутствия алгоритма адекватного моделирования общих причин, воздействующих на частично перекрывающиеся группы элементов;

-из-за невозможности учета различного характера проявления и видов контроля отказов, вызванных различными классами общих причин.

Такое огрубление во многом является следствием как рассматриваемых ниже трудностей с исходными данными, так и общепринятого метода введения отказов по общей причине в логическую модель надежности системы. Этот метод заключается в явном отображении таких событий непосредственно на дереве отказов аналогично независимым отказам /52,60/. С этой целью для каждого элемента системы разрабатывается дерево отказов (см.рис.1.2), которое является фрагментом дерева отказов системы. Последний включает все характерные для элемента независимые и каскадные отказы, а также полный набор первичных событий отказа данного элемента по каждой общей причине с любой возможной комбинацией отказов других элементов, подверженных воздействию рассматриваемой общей причины.

Таким образом, отказы по общей причине моделируются в виде первичных событий, вероятности возникновения которых определяются с помощью параметрических моделей и обрабатываются наравне с независимыми отказами по правилам Булевой алгебры.

Этот способ обладает тремя принципиальными недостатками:

-значительным увеличением размеров дерева отказов, задаваемого в качестве исходной информации для расчетной программы и, следова-

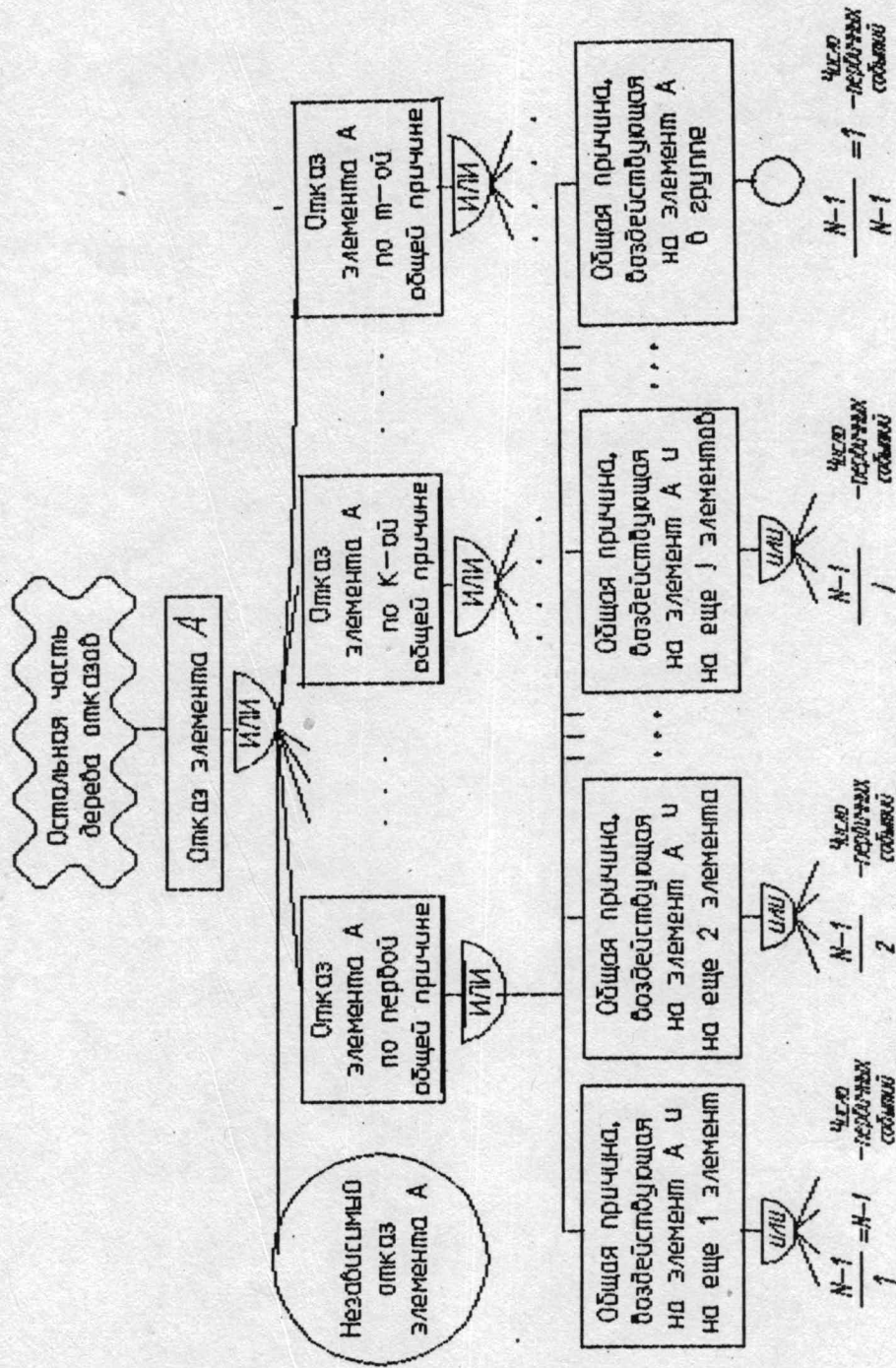


Рис.1.2. Фрагмент дерева отказов элемента А, подверженного воздействию m общих причин, первая из которых распространяется на группу из N элементов.

тельно, затрат машинного времени на проведение количественных анализов;

-сложностью корректного аналитического определения (для задания в качестве исходных данных) временных характеристик устранения события множественного отказа для ряда задач;

-невозможностью корректного задания в качестве исходных данных типа контроля и его периодичности для ряда отказов по общей причине.

Трудностей, отмеченных выше, позволяет избежать альтернативный путь логического моделирования отказов по общей причине, применимый для решения задач любой сложности. В соответствии с этим подходом отказы по общей причине вводятся в логическую модель неявно/61,62/. Суть способа заключается в анализе базовых минимальных сечений, набор которых определяется по дереву отказов, построенному с учетом только независимых отказов. Если базовое минимальное сечение содержит отказы двух или более элементов, подверженных воздействию общей причины, то производится генерация дополнительных сечений. Эти сечения содержат отказы по общей причине вместо независимых отказов соответствующих элементов.

Неявный способ введения отказов по общей причине в логическую модель требует разработки специальной расчетной программы. Эта программа должна осуществлять генерацию полного и уникального (без повторов) набора дополнительных сечений и определение всех требуемых характеристик отказов по общей причине (интенсивности или вероятности возникновения, времени восстановления, вида, периодичности и стратегии контроля таких событий). Трудности в создании адекватного расчетного алгоритма сдерживают применение метода.

Для количественной оценки интенсивностей (вероятностей) отказов по общей причине, имеющих стохастическую природу (не функциональные причины), существуют различные параметрические модели. В идеале параметрическая модель должна быть простой, универсальной, корректной, а также обеспечивать четкое определение параметров, совместимость с существующими источниками данных и возможность учета специфических для системы и ее элементов факторов, например, кратности резервирования /63/. Сложностью удовлетворения всей совокупности требований объясняется появление большого разнообразия параметрических моделей, в которых отдается приоритет тем или иным достоинствам. Классификация параметрических моделей представлена в табл. I. I.

Наиболее распространенной параметрической моделью является модель β -фактора. Это объясняется простотой определения ее единственного параметра β , который требуется дополнительно к интенсивности (вероятности) отказов элементов системы. Кроме того, оценки β -фактора не зависят от наличия информации на срабатывание системы или ее элементов. Численно β -фактор равен отношению интенсивности (вероятности) отказов элементов по общим причинам к полной интенсивности (вероятности) его отказа, т.е. является условной вероятностью множественного отказа всей резервируемой системы по общей причине при отказе элемента. Он позволяет определить интенсивность отказов по общим причинам λ_n группы, состоящей из любого числа N элементов по формуле:

$$\lambda_n = \frac{\beta}{1-\beta} * \lambda_{\text{нез}} \quad (1.1)$$

где $\lambda_{\text{нез}}$ - интенсивность независимых отказов одного элемента.

Характеристики параметрических моделей

Таблица I.I.

Класс моделей	Наименование модели	Источник
Однопараметрические	β -фактора	/8,52,55,60,64-67/
	σ -фактора	/ 64,71 /
Эмпирические	α -фактора	/ 52,72 /
Нешоковые	Модернизированного β -фактора	/ 69 /
Многопараметрические	Греческих букв	/43,44,52,60,74/
	Базового параметра	/ 8,52,60 /
	Частичного β -фактора	/ 52,62 /
Полуэмпирические	Геометрического ряда	/ 69 /
	Квадратного корня	/ 37 /
	Распределенных вероятностей отказов	/ 75,76 /
	Биномиальная	/43,44,52,60,74/
Шоковые	Полиномиальная	/ 67 /
	Произвольных вероятностей отказов	/ 77 /

Основной недостаток модели-излишний консерватизм при оценке глубоко резервируемых структур: в случае доминирующего влияния отказов по общей причине модель дает одинаковые оценки показателей надежности систем с любой кратностью резервирования.

Различные расширения модели β -фактора разработаны для устранения этого недостатка. Так, при проведении ВАБ Воронежской и Горьковской АСТ /39,68/ предполагалось, что условная вероятность множественных отказов β_n уменьшается при увеличении кратности резервирования:

$$\beta_n = \beta_2 * (10^{1-n})^{1/2}, \quad (1.2)$$

где β_2 - β -фактор для двухканальной системы;
 n - число резервируемых элементов.

Таким образом, характер изменения коэффициента β_n занимает промежуточное положение между двумя случаями:

- 1) величина β_n остается постоянной при $n \geq 3$;
- 2) $\log \beta_n$ меняется по линейной экстраполяции точек $n=2$ и $n=3$ для $n > 3$.

Это можно рассматривать как развитие модели квадратного корня, использованной в докладе WASH-1400 /37/. Модель квадратного корня предполагает, что значение интенсивности отказов двух элементов является средним геометрическим значений для полной зависимости и полной независимости.

Существуют и другие степенные модели: общей нагрузки, геометрического ряда /69/. В последней, например, вероятность P_n множественного отказа n элементов определяется по формуле:

$$P_n = P_1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{n-1}, \quad (1.3)$$

где P - вероятность единичного отказа;

α - эмпирически определяемый коэффициент для каждого конкретного случая.

В настоящее время отсутствует как достаточное эмпирическое обоснование степенных моделей, так и их физическая интерпретация, что является серьезным недостатком этих моделей.

При использовании частичной модели β -фактора /52,62/ для резервируемых элементов задается начальное значение коэффициента $\beta=0,1-0,16$ и диапазон изменения факторов, на него влияющих. В числе варьируемых факторов рассматриваются: независимость проверки работоспособности элементов, опыт персонала, проводящего техническое обслуживание и другие. Затем экспертно выбираются значения факторов в заданных диапазонах, которые складывают по законам логики, а полученное число используют для корректировки начального β -фактора. Кроме того, для β -фактора установлены нижние граничные значения:

0,02 - для резервируемой системы, состоящей из однотипных элементов;

0,001 - из разнотипных.

Модель привлекательна попыткой детального моделирования различных факторов, влияющих на зависимость элементов. Однако, произвольность выбора начального и граничного значений β , а также масштаба его измерений, не позволяет получать обоснованные количественные оценки.

Достаточно широко распространена модель греческих букв, являющаяся модификацией модели β -фактора /43,44,52,60,67/. В этой модели используются три параметра:

β -условная вероятность того, что причина отказа одного элемента приведет к отказу еще, как минимум, одного элемента;

γ -условная вероятность того, что общая причина отказа двух или более элементов приведет к отказу, как минимум, трех элементов;

δ -условная вероятность того, что общая причина отказа трех или более элементов приведет к отказу не менее, чем четырех элементов.

В общем виде интенсивность λ_k отказа по общей причине к элементов из группы n элементов определяется как:

$$\lambda_k = \frac{1}{C_{n-1}^{k-1}} * \left(\prod_{i=1}^k \rho_i \right) * (1 - \rho_{k+1}) \frac{\lambda_{\text{нез}}}{1 - \beta}; \quad k=1, 2, 3, 4, \quad (1.4)$$

где $\lambda_{\text{нез}}$ - интенсивность независимых отказов элементов;

$$\rho_1=1; \rho_2=\beta; \rho_3=\gamma; \rho_4=\delta; \rho_5=0$$

При наличии в группе свыше 4-х элементов $\lambda_n = \lambda_4$, ибо невозможно получить отдельно достоверные статистические оценки для отказа 4-х, 5-ти, 6-ти и т.д. элементов.

Следует отметить, что существуют трудности получения достоверных оценок, а также и параметров γ и δ , оказывающих решающее влияние на оценку надежности системы. Это обстоятельство вызывает значительный разброс оценок этих параметров /11, 44, 60, 70/ и является одним из основных недостатков модели греческих букв.

Процедура оценок параметров моделей β -фактора и греческих букв по эксплуатационной статистике несколько упрощается при использовании частот событий множественных отказов в системе вместо частот отказов элементов. Модифицированные модели С-фактора /64, 71/ (аналог β -фактора) и α -фактора /52, 72/ (аналог модели греческих букв) имеют аналогичные долевые коэффициенты и принципиально ничем не отличаются от аналогов. В частности, в модели α -фактора интенсивность λ_k множественных отказов к элементов в

группе n элементов определяется по формулам:

$$\lambda_k = \frac{k}{C_{n-1}^{k-1}} * \prod_{i=1}^k \left[\frac{k}{\left(\sum_{k=2}^n k * \alpha_k \right) + \alpha_1} \right] * \lambda_{\Sigma}, \quad k=2, \dots, n \quad (1.5)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

где λ_{Σ} - суммарная интенсивность отказа одного элемента;
 α_k ($2 \leq k \leq n$) - доля интенсивности отказов k элементов по общей причине в суммарной интенсивности всех видов отказов в системе;
 α_1 - доля интенсивности единичных независимых отказов в системе.

Модель β -фактора и все рассмотренные выше ее модификации используют предположение о существовании пропорциональности между отказами по общей причине и независимыми отказами, определяемой на основании эксплуатационной статистики. Основанием для этого может служить предположение, что событие, связанное с единичным отказом, может рассматриваться как общая причина для множественных отказов. При таком предположении общая причина возникает с частотой единичных отказов.

Основным общим принципиальным недостатком моделей является недоказанность этого предположения, особенно для систем, имеющих разную степень защиты против отказов по общей причине. Это подтверждают выводы работы /73/, где показан различный относительный вклад определенных причин в интенсивность независимых и зависимых отказов. Например, среди отказов по общей причине вызванные ошибками человека составляют 50%, а среди независимых отказов - 30%.

Этого недостатка лишена модель базового параметра /8,52,60/.

Эта модель использует статистически оцениваемые интенсивности λ_k (вероятности q_k) ($2 \leq k \leq n$) отказов по общей причине определенных k элементов в группе из n элементов, подверженной воздействию этой общей причины. Таким образом, для расчета каждого конкретного минимального сечения с отказом по общей причине непосредственно задается показатель безотказности, характеризующий такой отказ в той же форме, как и для независимых отказов. Модель базового параметра обеспечивает наиболее простой и точный способ расчета. Однако, проблема оценки всех требуемых параметров, сдерживающая применение модели, является пока труднорешаемой задачей.

Из полуэмпирических моделей наибольшее распространение получила биномиальная модель интенсивностей отказов/43,44,52,60,74/ Модель описывает событие отказа как последствие воздействий, влияющих на отдельные элементы и на всю систему. Предполагается, что существуют два вида воздействий - нелетальные и летальные. В случае возникновения нелетального воздействия отказы элементов являются условно независимыми, и их число описывается биномиальным распределением. При этом момент любого множественного отказа синхронизирован. При летальных воздействиях все элементы отказывают с условной вероятностью I . Таким образом, интенсивность отказа k элементов λ_k из группы n элементов по общей причине определяется как:

$$\lambda_k = \begin{cases} \mu * p^{k-1} * (1-p)^{n-k} & k=1, 2, 3, \dots, n-1 \\ \mu * p^n + \omega & k=n \end{cases} \quad (1.6)$$

где μ и ω - интенсивности нелетальных и летальных воздействий, соответственно;

p -условная вероятность отказа элемента при нелегальном воздействии.

К недостаткам модели относятся сложность обработки статистической информации для оценки параметров и необходимость привнесения в обработку дополнительного, по сравнению с другими моделями, субъективизма. В то же время, модель является достаточно физической и поэтому удобна при более детальном рассмотрении отдельных классов общих причин отказов и их последствий. В этом случае, статистические оценки параметров можно комбинировать с целенаправленно выполняемыми экспертными оценками.

Полимиальная модель интенсивности отказов /67/, которая является гибридом моделей греческих букв и биномиальной, предполагает определение кратности множественного отказа в случае возникновения воздействия с помощью долевых коэффициентов. Обилие параметров затрудняет ее использование, и пока на практике эта модель широко не применялась.

Дальнейшее развитие и усложнение биномиальной модели нашло отражение в работах /75-77/, где предполагается, что параметр p модели сам является случайной величиной с функцией распределения. В /75,76/ предложена модель распределенной вероятности отказа, в которой вероятностям отказа каждого элемента поставлены в соответствие переменные во времени совокупности внешних факторов. При таком подходе вероятность отказа n элементов $P(F^n)$ определяется по формуле:

$$P(F^n) = \int_0^1 x^n * f(x) dx \quad (1.7)$$

где x -вероятность отказа элемента при определенных внешних условиях;

$f(x)$ -плотность функции распределения вероятностей