

моделировать на отказы по общей причине, осуществляет подпрограмма CSMOD. Выявление таких сечений производится по наличию в них двух или более отказов элементов с одним или несколькими одинаковыми идентификаторами, характеризующими общность конструкции или расположения элементов или осуществляемых над ними эксплуатационных процедур. Подпрограмма CSMOD формирует для каждого такого базового сечения массивы дополнительных сечений с отказами по общим причинам, просматривая весь список учитываемых общих причин. При этом учитываются как вложенные сечения (т.е. те, в которых общая причина охватывает элементы только базового минимального сечения), так и объемлющие дополнительные сечения (т.е. те, в которых общая причина охватывает как элементы базового минимального сечения, так и один или несколько элементов, не входящих в базовое сечение).

С целью уменьшения размеров формируемых массивов подпрограмма CSMOD осуществляет качественное просеивание дополнительных сечений. Критерии просеивания изложены в разделе 2.6. Пользователь может влиять на процедуру просеивания, варьируя значения параметров LEV и MCCS. Параметр LEV устанавливает единую глубину моделей отказов по общей причине в проводимом анализе. Например, при LEV=3 раздельно моделируются события с отказами по общей причине двух, трех и всех элементов в одной группе общности. Параметр MCCS определяет максимально возможное число событий отказов по общей причине в одном сечении. Параметры LEV и MCCS обеспечивают эффективное функционирование программы. Оптимальное задание их значений дает возможность находить компромисс между точностью моделирования с одной стороны и затратами машинного времени и памяти с другой.

Расчет вероятности реализации базовых и дополнительных сечений производит подпрограмма QUANT (рис. 2.12). Для расчета используются аналитические формулы /139/. Погрешность расчета вероятностей минимальных сечений по QUANT не превышает 10%. Определение необходимых

для расчета характеристик событий отказов по общей причине в виде, аналогичном независимым отказам, осуществляют подпрограммы CCFAR и PARAM. Функция первой из них состоит в преобразовании исходных данных с информацией по моделям общих причин к форме сводного массива с вероятностями (интенсивностями) отказов различной кратности. Для этого параметры всех моделей пересчитываются в параметры модели базового параметра. В этом блоке запоминается также некоторая дополнительная информация, касающаяся размерности параметров (на требование или на время) и их характера (абсолютные или условные вероятности). Подпрограмма PARAM дополняет массив событий характеристик отказов по общей причине другими необходимыми показателями: видом контроля, его периодичностью, средним временем восстановления. Методика их определения изложена в разделе 2.5.

Накопление массивов наиболее значимых минимальных сечений (до 1000 минимальных сечений) только с независимыми отказами осуществляет подпрограмма INMCS. Аналогичная операция с минимальными сечениями, состоящими как только из отказов по общей причине, так и из их комбинаций с независимыми отказами, производится подпрограммой OUTMCS. Процедуры формирования массивов результатов включают ранжировку минимальных сечений по вероятностям, проверку их на уникальность, отбрасывание незначимых сечений и оценку суммарной вероятности и вероятности отброшенных сечений.

Далее пользователь обладает следующими возможностями в зависимости от версии программы COCAFAN:

- 1) получением печати результатов;
- 2) передачей в расчетную часть программы VNF в непрерывном режиме списка значимых минимальных сечений с необходимой номенклатурой показателей для уточненного расчета;
- 3) получением такого списка в интерактивном режиме, на основании которого пользователь может произвести дальнейший отбор и

просеивание сечений с целью сокращения последующего времени вычисления программой VNF.

Программа СОСАFAN имеет следующие ограничения:

- 1) максимальное число учитываемых независимых первичных событий (отказов) - 500;
- 2) максимальное число независимых событий в одном сечении - 8;
- 3) максимальное число базовых минимальных сечений с независимыми отказами - 5000;
- 4) максимальное число различных общих причин, учитываемых в анализе - 60;
- 5) максимальное число минимальных сечений с отказами по общей причине, формируемых на основе одного базового сечения с независимыми отказами - 200.

Превышение при работе или задании исходных данных приводит к аварийному прерыванию работы программы.

2.9. Заключение.

Разработана методика анализа функциональных зависимостей между системами безопасности и их структурными частями, которая реализована в программе APRA программного комплекса VEGA, предназначенного для проведения вероятностных анализов безопасности АС. Методика основана на использовании структурно-функциональной схемы при моделировании пути развития аварии и обеспечивает:

- 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.

Разработана методика анализа каскадных отказов, обеспечивающая

их моделирование с использованием программ анализа независимых отказов. В методике представлен способ явного отображения каскадных отказов на дереве отказов и определения характеристик первичных событий, задаваемых в качестве исходных данных.

Разработана методика анализа отказов по общей причине, которая реализована в программе СОСАFAN, являющейся составной частью программного комплекса VEGA. Методика позволяет детально моделировать ряд особенностей систем безопасности и степень их защиты против воздействия общих причин отказов. 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.

Разработан неявный способ введения отказов по общей причине в логическую модель. Способ позволяет ограничивать размеры дерева отказов и трудозатраты при вводе в расчетную программу исходных данных. Сокращение объема вычислений обеспечивается процедурами просеивания получаемых минимальных сечений.

Методика анализа зависимых отказов, в том числе отказов по общей причине, включена в проект отраслевого Руководства по выполнению вероятностных анализов безопасности атомных станций /28/, используемого в институтах "Атомэнергопроект" для проведения таких анализов.

3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ОТКАЗАМ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АС.

3.1. Цель, организация сбора данных и их состав.

Целью сбора и обработки данных по отказам по общей причине является получение достоверной и представительной эксплуатационной информации, которая позволяет оценить с наименьшей неопределенностью значения параметров моделей, адекватно отражающих специфику конкретных объектов. Собранная информация должна учитывать сложный режим эксплуатации систем безопасности, обеспечивать возможность проведения классификации по видам отказов и общих причин.

Как было отмечено в разделе 1.2, база данных для выполнения ВАБ должна основываться на эксплуатационной информации по отечественным АС, являющимися объектом проведения ВАБ. Это позволяет значительно уменьшить влияние одного из важных источников неопределенностей, связанного с изменением конструктивных, схемных, компоновочных решений на различных АС, а также условий эксплуатации оборудования и квалификации персонала АС.

Особое внимание должно быть уделено реконструкциям систем безопасности, проведенным на рассматриваемой АС за период наблюдения. Значительные конструктивные изменения могут сделать малопригодными данные, собранные в предреконструктивный период. Например, по сведениям, содержащимся в Базе данных по нарушениям в работе АС (ВНИИАЭС), в 1985 - 1986 годах было свыше 10 множественных отказов на требование органов регулирования СУЗ (от 2-х до 6-ти штук) реакторов ВВЭР-1000, в то время как после проведения реконструкции не зарегистрировано ни одного множественного отказа в 1987-1989

годах. Аналогичная картина с отказами на закрытие клапанов БРУ-А ВВЭР-1000. Поэтому применимость базы данных, собранной в предреконструктивный период, в каждом конкретном случае должна быть предметом тщательного анализа.

Другим важным требованием к системе сбора и обработки данных является обеспечение максимальной достоверности информации. В первую очередь, должно быть минимизировано число нерегистрируемых системой событий. Как показывает опыт использования существующих в СССР информационных систем, число таких нерегистрируемых событий может превышать в ряде случаев 50% по сравнению с данными, содержащимися в первичной эксплуатационной документации. Это обстоятельство обусловлено двумя основными причинами: наличием промежуточных звеньев в передаче информации и ориентацией существующих информационных систем на задачи, не связанные с ВАБ. Следует также отметить, что в настоящее время в отечественной практике отсутствуют системы сбора и обработки эксплуатационных данных, имеющие целевую ориентацию на ВАБ.

Таким образом, 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.

Как показывает зарубежный опыт /52/, основным источником неопределенности при сборе и обработке данных по отказам по общей причине является их классификация. Для минимизации этого фактора необходимо участие специалистов по ВАБ, осуществляющих оценки параметров

моделей, в первичной обработке информации непосредственно на АС. Это помогает обеспечить необходимое понимание сущности зарегистрированных событий, оперативное получение необходимой дополнительной трудно формализуемой информации, а также привлечение к первичному анализу в случае необходимости представителей эксплуатационных и ремонтных цехов, участвовавших в выявлении и устранении отказа.

Номенклатура собранных первичных данных должна быть достаточной для проведения качественной классификации множественных отказов и оценки параметров моделей. Она должна включать три блока данных, характеризующих: события множественных отказов, объем наблюдения, а также отказавшее оборудование и условия его эксплуатации /27/.

Для характеристики события множественного отказа необходима следующая информация:

- оперативное обозначение и наименование отказавшего оборудования;
- дата и время обнаружения каждого из отказов в событии;
- функциональное проявление отказа (неоткрытие, незакрытие и т.п.);
- число отказавших элементов;
- число элементов в группе, на выполнение которыми заданных функций возникло требование;
- общее число элементов в группе, подверженной воздействию общей причины;
- описание события;
- причина отказа (недостаток проекта, дефект изготовления, монтажа, ремонта, наладки или технического обслуживания, ошибочные оперативные действия, функциональное воздействие других элементов или влияние окружающей среды) с предположением о наличии зависимости;
- режим эксплуатации оборудования в момент обнаружения отказа (ожидание, испытание, ремонт, реальное требование, работа);

- режим эксплуатации энергоблока в момент обнаружения отказа;
- способ обнаружения отказа;
- длительность восстановления оборудования;
- принятые корректирующие меры.

Объем наблюдения должен характеризоваться наработкой в режиме ожидания и в режиме выполнения функций, а также числом пусков (срабатываний) с выделением числа и кратности реальных требований по всему оборудованию, подверженному воздействию общей причины. Также должны быть четко определены границы оборудования.

Третий блок данных должен включать информацию о типе отказавшего оборудования, его заводе-изготовителе, компоновке, описание эксплуатационных процедур с указанием стратегии, периодичности и алгоритма технического обслуживания и испытаний.

Следует отметить, что наряду с информацией по множественным отказам необходимы также данные по единичным отказам. Это связано с двумя обстоятельствами:

1. Для определения оценок параметров некоторых моделей (α - и β -фактора, греческих букв) необходим статистический материал по независимым отказам;

2. Как правило, на АС с ВВЭР принята следующая стратегия проверки работоспособности резервируемого оборудования систем безопасности, эксплуатирующихся в режиме ожидания при нормальной эксплуатации. Системы безопасности проверяются ежемесячно со сдвигом моментов проверок отдельных каналов на 10 дней. Поэтому событие множественного отказа оборудования различных каналов, возникшее в режиме ожидания, может выявляться полностью одновременно. Для контроля полноты идентификации массива потенциальных множественных отказов и необходима информация обо всех единичных отказах с датами их выявления.

Руководствуясь изложенными выше принципами, был организован ре-

троспективный сбор информации о потенциальных отказах по общим причинам на 3-4 блоках Кольской АЭС с реакторами ВВЭР-440 (проект В-213) и на 2-5 блоках Запорожской АЭС (проект В-320).

Сбор данных осуществлялся по тепломеханическому и электрическому оборудованию защитных, локализирующих и обеспечивающих систем безопасности. Длительность наблюдения составила: 3 года по каждому блоку Кольской АЭС и свыше 10 лет суммарно по 4 блокам Запорожской АЭС.

3.2. Классификация отказов.

Собранный статистический материал был сначала подвергнут качественному инженерному анализу. Цель анализа заключалась в /35/:

1) формировании массива событий-кандидатов, которые потенциально могли быть вызваны воздействием общих причин, моделируемых при выполнении ВАБ;

2) определении перечня классов общих причин, отказы вследствие воздействия которых не попали в собранный статистический материал по тем или иным обстоятельствам;

3) классификации событий-кандидатов по общим причинам, их вызвавшим;

4) определении отказов, вызванных летальными и нелетальными воздействиями в случае их дальнейшего моделирования биномиальной моделью;

5) определении числа элементов, которые были подвержены воздействию, вызвавшему отказ по общей причине.

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.

Ниже приведены принципы просеивания и классификации событий-кандидатов, разработанные для информации по Кольской АЭС:

1) группы элементов, подверженных отказам по общей причине, формировались по принципу их однотипности. В рамках этих групп выделялись группы элементов, имеющих общность расположения или эксплуатационных процедур. Это позволило выявить отказы, вызванные воздействиями ряда общих причин:

-одинаковых конструктивных дефектов оборудования, проявляющихся при периодических проверках после редко возникающих условий работы, окружающей среды или редко проводимых эксплуатационных процедур;

-повторяющихся ошибок эксплуатационного персонала при проведении одинаковых эксплуатационных процедур на однотипном оборудовании;

-экстремальных воздействий окружающей среды на расположенное в одном помещении однотипное оборудование (системы безопасности турбинного цеха).

Неохваченными остались следующие виды отказов по общей причине:

-проявляющиеся только при аварии конструктивные дефекты;
-повторяющиеся ошибки эксплуатационного персонала при проведении одинаковых эксплуатационных процедур на разнотипном оборудовании ввиду отсутствия такой информации (следует отметить, что большая часть одинаковых эксплуатационных процедур проводится именно на однотипном оборудовании, поэтому это ограничение не такое существенное);

-экстремальные внешние воздействия на расположенное в одном помещении разнотипное оборудование (следует, отметить, что наиболее опасных внешних воздействий, таких как пожар и затопление зарегистрировано не было);

-редкие причины, для которых длительность наблюдения была слишком мала;

2) однотипные элементы, расположенные на разных блоках, образовывали разные группы. Этот принцип исключил из рассмотрения два события двойных отказов в системе САОЗ низкого давления, но тем не менее позволил избежать значительной недооценки параметров из-за расширения размеров всех групп вдвое;

3) насосная система технической воды, состоящая из 9 насосов (по 3 в каждом канале), является общей для двух блоков. Однако, при периодических испытаниях с запуском насосов от дизель-генераторов и при авариях могут работать только два определенных насоса из трех для обеспечения выполнения заданных функций системами безопасности аварийного блока. Поэтому насосы технической воды консервативно разбивались на две частично перекрывающиеся группы по 6 определенных насосов в каждой;

4) так как зарегистрированные на Кольской АЭС отказы являются скрытыми, выявляемыми при периодических проверках, моменты которых сдвинуты относительно друг друга для разных каналов, то отказы эле-

ментов различных каналов, выявленные во время смежных проверок включались в состав событий-кандидатов;

5) функциональные неготовности или отказы, вызванные отказами других элементов и моделируемые явно на деревьях отказов или событий, исключались из рассмотрения;

6) зависимые отказы, которые вызваны отказом общего элемента, входящего в состав рассматриваемого оборудования, классифицировались как отказ по общей причине (зарегистрировано одно такое событие - отказ двух насосов технической воды из-за подгорания контактов реле);

7) множественные отказы, вызванные наличием поперечных функциональных связей, по которым могут передаваться возмущения (гидроудары, короткие замыкания и т.п.), классифицировались как отказы по общей причине;

8) события, при которых отказы элементов не влияют на выполнение рассматриваемых функций безопасности, исключены из рассмотрения (два события - ложные срабатывания 2-х задвижек и 2-х предохранительных клапанов гидроемкости);

9) если событие возникло, было выявлено и устранено в период планово-предупредительного ремонта энергоблока, то оно не учитывалось (например, неоткрытие в этот период 4-х пневмоклапанов при проверке);

10) если второй отказ в событии возник после устранения первого, то оба они рассматривались как независимые;

11) события, относящиеся к повреждениям, которые не нарушают критерии выполнения функций элементами, включались в состав событий-кандидатов для обеспечения необходимой степени консерватизма оценок (зарегистрировано одно такое событие - износ торцевого уплотнения двух насосов, которое учитывалось с весовым коэффициентом 0,1);

12) в случае моделирования общих причин биномиальной моделью все воздействия, вызвавшие отказ неполной группы элементов, относились к нелетальным. Воздействия, вызвавшие полный отказ группы элементов, разбивались на типы на основании инженерных качественных оценок с использованием весовых коэффициентов;

13) как правило, воздействия распространялись на всю группу элементов. Исключения могли составить случаи срабатывания неполного числа элементов по требованию или эксплуатационных процедур, распространяющихся не на всю группу элементов. Таких воздействий, вызвавших отказ по общей причине, не выявлено.

3.3. Общая характеристика статистического материала.

Ретроспективный анализ на Кольской АЭС был проведен на глубину 3 года. Общее время наблюдения составило 6 реакторо-лет. За время наблюдения было зарегистрировано 209 отказов оборудования систем безопасности /140/. В результате качественного анализа было выявлено 17 событий-кандидатов, потенциально являющихся отказами по общей причине. Результаты анализа представлены в табл.3.1.

Общее число групп элементов Кольской АЭС, объединенных по принципу общности конструкции, составило 132 (число элементов в группе варьировалось от 2 до 12 единиц). Общая длительность наблюдения за этими группами составила $3,2 \times 10^6$ часа. Вследствие достаточно малого периода наблюдения статистическая информация была объединена по типам оборудования. В числе типов оборудования, за которыми велось наблюдение, были следующие: насосы, вентиляторы, запорная и регулирующая арматура с электроприводом, клапаны БРУ-А, пневмоотсечная арматура, предохранительные и обратные клапаны, дизель-генераторы, трансформаторы, выключатели 6 кВ, устройства агрегата бесперебойного пита-

Статистическая информация об отказах по общей причине на 3-4 блоках
Кольской АЭС в 1986-88 годах.

Таблица 3.1.

№	Наименование оборудования	Число групп оборудования подверженного отказам по общей причине	Число единиц оборудования	Наработка в режиме ожидания		Число отказов оборудования					
				всего	в группе оборудования, групп, час	всего	из них кандидатов в отказы по общей причине				
							двойных	тройных	четверных	пятерных	
1	Насос	17	50	2-6	$1,07 \times 10^6$	$3,36 \times 10^5$	37	5	1	0	0
2	Дизель-генератор	2	6	3	$1,54 \times 10^5$	$5,2 \times 10^4$	11	2	0	-	-
3	Вентилятор	2	6	3	$1,51 \times 10^5$	$5,0 \times 10^4$	13	1	0	-	-
4	Запорная арматура с электропроводом	70	289	2-12	$7,1 \times 10^6$	$1,7 \times 10^6$	72	3	1	1	1
5	Регулирующая арматура с электроприводом	10	44	2-12	$1,0 \times 10^6$	$2,2 \times 10^5$	55	2	0	0	0

Примечания: 1. Потенциальных отказов по общей причине кратностью 6 и более зарегистрировано не было.
2. По остальным типам оборудования не зарегистрировано ни одного потенциального отказа по общей причине.

ния, датчики и вторичные приборы средств автоматики.

Как видно из табл.3.1, на Кольской АЭС события-кандидаты зарегистрированы по пяти типам оборудования. Однако, только по насосам и запорной арматуре с электроприводом собрана довольно представительная информация.

Ретроспективный анализ на Запорожской АЭС был проведен на различную глубину на 2-5 блоках. Общее время наблюдения составило свыше 10 реакторо-лет. За время наблюдения было зарегистрировано 155 отказов оборудования систем безопасности. В результате качественного анализа было выявлено 14 событий-кандидатов, потенциально являющихся отказами по общей причине. Результаты анализа представлены в таблице 3.2.

Объекты сбора информации на Запорожской АЭС были ограничены насосами защитных систем безопасности и дизель-генераторами. Они составили 20 групп элементов, имеющих одинаковую конструкцию в пределах рассматриваемого энергоблока. Каждая из групп включала 3 элемента. Для уменьшения статистической неопределенности информация по насосам была объединена.

На основании анализа собранного статистического материала можно сделать следующие выводы:

1. Отказы по общей причине несомненно происходят на отечественных АЭС.

2. Информационная система по нарушениям в работе АС собирает относительно малое число отказов по общей причине: например, за указанный период наблюдения на Кольской АЭС ею зарегистрировано только одно такое событие (двойной отказ дизель-генераторов).

3. Наибольшая субъективность связана с обработкой отказов оборудования различных каналов, выявляемых одновременно.

4. Вызывает сомнение достоверность информации, собранной таким

Статистическая информация об отказах по общей причине
на 2-5 блоках Запорожской АЭС в 1986-90 годах.

Таблица 3.2.

INN	Наименование оборудования	Число групп оборудования, подверженного отказам по общей причине	Число единиц оборудования		Наработка в режиме ожидания	Число отказов оборудования		
			всего	в группе		всего	из них кандидатов в отказы по общей причине	
							двойных	тройных
1	Насос	16	48	3	1,0x10 ⁶	3,34x10 ⁵	9	2
2	Дизель-генератор	4	12	3	2,66x10 ⁵	8,8x10 ⁴	3	0

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.

3.4. Оценка параметров моделей отказов по общим причинам по статистическим данным.

Оценка параметров моделей была проведена в основном в соответствии с процедурой, рекомендуемой Руководством США /52/. Исключения касались не рассмотренной в /52/ специфики анализируемых АЭС, выявленных отказов и используемых параметрических моделей.

Для получения количественных оценок обычно решались следующие задачи:

I) формирование массива отказов по общей причине из событий-кандидатов с определением числа исходов (вектора воздействия) события в системе, в которой оно произошло. В частности, в процессе выполнения этого этапа при обработке информации на Кольской АЭС было выявлено три типа событий:

- достоверно идентифицированный отказ по общей причине достоверно определенной кратности, который проецировался на исходную систему Кольской АЭС без изменений;

- достоверно идентифицированный отказ по общей причине неизвестной точно кратности, при проецировании которого на рассматриваемую (исходную) систему Кольской АЭС, сумма числа исходов по отказам всех кратностей могла быть больше единицы (в случае предположения о совпадении нескольких отказов по общей причине в одном событии);

- остальные события-кандидаты (не идентифицированные достоверно отказы по общей причине и упомянутое выше повреждение), которые

проецировались на исходную систему с весовыми коэффициентами, отражающими степень уверенности эксперта в существовании события отказа по общей причине. Сумма исходов для такого события меньше единицы. При этом варьировалось число исходов для получения консервативных и реалистических оценок;

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

Эта задача выполняется для ВАБ проектируемых АС или при использовании статистической информации, собранной на нескольких АС. Целью задачи является определение возможности повторения аналогичных событий на АС, для которой выполняется ВАБ. Это осуществляется путем сравнения степени подобия проектов исходной и анализируемой АС, условий их эксплуатации, мер защиты против отказов по общей причине. В частности, при реализации дополнительных мер защиты на анализируемой АС возможно исключение из рассмотрения некоторых видов отказов по общей причине. Если наблюдается обратная ситуация, то имеющиеся исходные данные по отказам следует рассматривать как слишком оптимистические.

Такая задача была решена при создании базы данных для ВАБ АЭС "Хурагуа" (Куба) /35/ с ВВЭР-440 на основании исходной информации по Кольской АЭС.

В результате сравнения проектов этих АЭС было выяснено, что на АЭС "Хурагуа" реализованы дополнительные меры против отказов по общим причинам для ряда систем безопасности. Поэтому информация по Кольской АЭС рассматривалась как несколько консервативная. В то же время конструктивные отличия дизель-генераторов потребовали привлечения дополнительной статистической информации по другим АЭС с ВВЭР;

3) проецирование (перенос) событий отказов по общей причине на

рассматриваемые системы.

При одинаковой размерности групп элементов, по которым собрана исходная статистическая информация, и групп элементов в анализируемой системе события проецируются без изменения. В противном случае их необходимо приводить к размерности анализируемых групп. Такая необходимость может возникнуть в двух случаях:

-при переносе информации с одной АС на другую, отличающуюся кратностью резервирования элементов систем безопасности;

-при объединении информации по группам различной размерности с целью уменьшения статистической неопределенности (как с информацией по Кольской АЭС).

Процедура переноса событий для групп с числом элементов не более 4-х подробно изложена в Руководстве США /52/. 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:

$$P_1^{(n)} = \sum_{k=1}^{1+m-n} \frac{C_{m-n}^{k-1} * C_n^1}{C_m^k} * P_k^{(m)} \quad \begin{matrix} l \in (0, n) \\ m > n \end{matrix} \quad (3.4.1)$$

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

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

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

Формулы, по которым производился перенос событий отказов по общей причине, приведены в таблице 3.3. В качестве примера в таблице 3.4 приведены результаты проецирования всех отказов по общей причине в трехэлементную группу;

4) статистическая оценка параметров моделей отказов по общей

ФОРМУЛЫ ПЕРЕНОСА СОБЫТИЯ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ В ГРУППЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЕНЬШЕЕ РАЗМЕРНОСТИ.

Размер системы (число элементов в группе общей причины), на которую проецируется событие	Размер системы (число элементов в группе общей причины), на которую проецируется событие				
	5	4	3	2	
Размер системы (число элементов в группе общей причины), в которой зарегистрировано событие отказа	6	$P = \frac{(5)(6)}{0} + \frac{(6)}{0} + \frac{1(6)}{61}$	$P = \frac{(6)(6)}{0} + \frac{1(6)}{0} + \frac{1(6)}{31} + \frac{1(6)}{152}$	$P = \frac{(6)(6)}{0} + \frac{1(6)}{0} + \frac{1(6)}{21} + \frac{1(6)}{52} + \frac{1(6)}{203}$	$P = \frac{(6)(6)}{0} + \frac{2(6)}{0} + \frac{2(6)}{31} + \frac{2(6)}{52} + \frac{1(6)}{53} + \frac{1(6)}{154}$
	5	$P = \frac{(5)(6)}{1} + \frac{5(6)}{61} + \frac{1(6)}{32}$	$P = \frac{(4)(6)}{1} + \frac{2(6)}{31} + \frac{8(6)}{152} + \frac{1(6)}{53}$	$P = \frac{(3)(6)}{1} + \frac{3(6)}{21} + \frac{9(6)}{52} + \frac{1(6)}{203}$	$P = \frac{(2)(6)}{1} + \frac{1(6)}{31} + \frac{8(6)}{152} + \frac{3(6)}{53} + \frac{8(6)}{154} + \frac{1(6)}{35}$
	4	$P = \frac{(5)(6)}{2} + \frac{2(6)}{32} + \frac{1(6)}{23}$	$P = \frac{(4)(6)}{2} + \frac{2(6)}{52} + \frac{3(6)}{53} + \frac{2(6)}{54}$	$P = \frac{(3)(6)}{2} + \frac{1(6)}{52} + \frac{9(6)}{203} + \frac{3(6)}{54}$	$P = \frac{(2)(6)}{2} + \frac{1(6)}{152} + \frac{1(6)}{53} + \frac{2(6)}{54} + \frac{2(6)}{35} + \frac{(6)}{6}$
	3	$P = \frac{(5)(6)}{3} + \frac{1(6)}{23} + \frac{2(6)}{34}$	$P = \frac{(4)(6)}{3} + \frac{1(6)}{53} + \frac{8(6)}{154} + \frac{2(6)}{35}$	$P = \frac{(3)(6)}{3} + \frac{1(6)}{203} + \frac{1(6)}{54} + \frac{1(6)}{256}$	$P = \frac{(2)(6)}{2} + \frac{1(6)}{152} + \frac{1(6)}{53} + \frac{2(6)}{54} + \frac{2(6)}{35} + \frac{(6)}{6}$
	2	$P = \frac{(5)(6)}{4} + \frac{1(6)}{34} + \frac{5(6)}{65}$	$P = \frac{(4)(6)}{4} + \frac{1(6)}{154} + \frac{1(6)}{35} + \frac{(6)}{6}$		$P = \frac{(1)(6)}{1} + \frac{1(6)}{61} + \frac{2(6)}{32} + \frac{1(6)}{23}$
	1	$P = \frac{(5)(6)}{5} + \frac{1(6)}{65} + \frac{(6)}{6}$			$P = \frac{(1)(6)}{1} + \frac{1(6)}{61} + \frac{2(6)}{32} + \frac{1(6)}{23}$
5		$P = \frac{(4)(5)}{0} + \frac{1(5)}{51}$	$P = \frac{(3)(5)}{0} + \frac{2(5)}{51} + \frac{1(5)}{102}$	$P = \frac{(2)(5)}{0} + \frac{3(5)}{51} + \frac{3(5)}{102} + \frac{1(5)}{103}$	$P = \frac{(1)(5)}{0} + \frac{4(5)}{51} + \frac{3(5)}{52}$
		$P = \frac{(4)(5)}{1} + \frac{4(5)}{52} + \frac{2(5)}{152}$	$P = \frac{(3)(5)}{1} + \frac{3(5)}{52} + \frac{3(5)}{103}$	$P = \frac{(2)(5)}{1} + \frac{2(5)}{52} + \frac{3(5)}{53} + \frac{2(5)}{54}$	$P = \frac{2(5)}{1} + \frac{1(5)}{54}$
		$P = \frac{(4)(5)}{2} + \frac{3(5)}{53} + \frac{3(5)}{253}$	$P = \frac{(3)(5)}{2} + \frac{3(5)}{102} + \frac{3(5)}{54}$	$P = \frac{(2)(5)}{2} + \frac{1(5)}{102} + \frac{3(5)}{54} + \frac{(5)}{5}$	$P = \frac{(1)(5)}{1} + \frac{1(5)}{52} + \frac{2(5)}{52}$
		$P = \frac{(4)(5)}{3} + \frac{2(5)}{54} + \frac{4(5)}{354}$	$P = \frac{(3)(5)}{3} + \frac{1(5)}{103} + \frac{2(5)}{54} + \frac{(5)}{5}$		$P = \frac{3(5)}{1} + \frac{4(5)}{54} + \frac{(5)}{5}$
		$P = \frac{(4)(5)}{4} + \frac{1(5)}{54} + \frac{(5)}{5}$			
4			$P = \frac{(3)(4)}{0} + \frac{1(4)}{41}$	$P = \frac{(2)(4)}{0} + \frac{1(4)}{21} + \frac{1(4)}{62}$	$P = \frac{(1)(4)}{0} + \frac{3(4)}{41} + \frac{1(4)}{22}$
			$P = \frac{(3)(4)}{1} + \frac{3(4)}{42} + \frac{1(4)}{22}$	$P = \frac{(2)(4)}{1} + \frac{1(4)}{21} + \frac{2(4)}{32} + \frac{1(4)}{23}$	$P = \frac{1(4)}{1} + \frac{4(4)}{3}$
			$P = \frac{(3)(4)}{2} + \frac{1(4)}{22} + \frac{3(4)}{43}$	$P = \frac{(2)(4)}{2} + \frac{1(4)}{62} + \frac{1(4)}{23} + \frac{(4)}{4}$	$P = \frac{(1)(4)}{1} + \frac{1(4)}{41} + \frac{1(4)}{22}$
			$P = \frac{(3)(4)}{3} + \frac{1(4)}{43} + \frac{(4)}{4}$		$P = \frac{3(4)}{1} + \frac{(4)}{4}$
3				$P = \frac{(2)(3)}{0} + \frac{1(3)}{31}$	$P = \frac{(1)(3)}{0} + \frac{2(3)}{31} + \frac{1(3)}{32}$
				$P = \frac{(2)(3)}{1} + \frac{2(3)}{32} + \frac{(3)}{3}$	$P = \frac{(3)(3)}{1} + \frac{1(3)}{31} + \frac{2(3)}{32} + \frac{(3)}{3}$
				$P = \frac{(2)(3)}{2} + \frac{1(3)}{32} + \frac{(3)}{3}$	
2					$P = \frac{(1)(2)}{0} + \frac{1(2)}{21}$
					$P = \frac{(1)(2)}{1} + \frac{1(2)}{21} + \frac{(2)}{2}$

Суммарное число исходов отказов по общей причине различной кратности в трехэлементной группе.

Таблица 3.4

NN	Наименование оборудования	АЭС	Суммарное число исходов					
			двойных отказов		тройных отказов			
			Консервативная оценка	Реалистическая оценка	Консервативная оценка	Реалистическая оценка	Консервативная оценка	Реалистическая оценка
1	Насос	КолАЭС ЗАЭС	3,8 7,5	1,1 3,9	0,6 6,0	0,35 0,2		
2	Дизель-генератор	КолАЭС ЗАЭС	3 1,5	3,4 1,3	1 0,2	0,1 0		
3	Вентилятор	КолАЭС	1	0	0,2	0		
4	Запорная арматура с эл/привод.	КолАЭС	2,1	2,05	1,7	1,25		
5	Регулирующая арматура	КолАЭС	0,14	0,14	0	0		

причине по статистическим данными.

Статистические оценки параметров были получены для модели базового параметра и биномиальной модели. Как показано в разделе 2, первая модель используется для моделирования отказов элементов, имеющих общность конструкции, а вторая - имеющих общность расположения или эксплуатационных процедур.

Модель базового параметра используется для определения и задания вероятностей отказов на требование по общим причинам $q_1, q_2 \dots q_m$. Средняя точечная оценка указанных параметров по эксплуатационным данным производится по формуле:

$$q_j = \frac{d_j}{C_m^j * n_T} \quad (3.4.2)$$

где d_j - число событий, включающих отказ по общей причине одновременно ровно j элементов;

n_T - число аварийных требований на группу из m элементов;

C_m^j - число сочетаний из j по m ;

m - число элементов в группе, подверженной воздействию общей причины

Основная трудность заключается в определении числа требований, после которых создаются аварийные режимы работы оборудования.

Статистическая оценка параметров биномиальной модели была проведена для классов общих причин, вызывающих скрытые отказы оборудования. Средние точечные оценки параметров модели ω, μ и ρ на основании использования эксплуатационной информации по отказам элементов определялись по формулам /19/:

$$\omega = \frac{d_1}{T} \quad (3.4.3)$$

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^m d_j}{T * [1 - (1 - \rho)^m]} \quad (3.4.4)$$

$$\sum_{j=1}^m j * d_j = \frac{\rho}{1 - (1 - \rho)^m} * m * \sum_{j=1}^m d_j \quad (3.4.5)$$

где d - число летальных причин отказов за наработку T ;

d_j - число случаев одновременных отказов j элементов за наработку T , не вызванных при $j=m$ воздействием летальных причин;

T - наработка (период наблюдений), час;

m - число элементов в группе, подверженной воздействию общей причины;

ω - интенсивность летальных воздействий, I/час;

μ - интенсивность нелетальных воздействий, I/час;

ρ - условная вероятность отказа при нелетальном воздействии.

Значительную трудность при оценке параметров модели вызывает выявление и оценка числа потенциальных отказов по общей причине из всей совокупности единичных отказов, т.е. при $j=1$.

Для сравнения с доступными зарубежными данными обработанная информация по Кольской АЭС была обобщена по всем видам общих причин и пересчитана применительно к модели греческих букв для трехканальной системы. Результаты сравнения приведены в таблице 3.5. Отечественные консервативные и реалистические оценки получены путем различной классификации событий-кандидатов. Основное отличие отечественных и зарубежных оценок касается параметра γ , т.е. тройных отказов. Это связано как с большим объемом мер защиты против отказов по общим причинам на Кольской АЭС, так и с консервативными предположениями о перерастании зарегистрированных событий на зарубежных АЭС в отказы большей кратности;

Средние значения параметров модели греческих букв для трехэлементной группы по зарубежному /60/ и отечественному оборудованию (Кольская АЭС)

Таблица 3.5.

NN	Наименование оборудования	Вид оценки	Параметры модели	
			β	γ
1	Насос	Зарубежная	0,47	0,53
		Отечественная консервативная	0,25	0,19
		Отечественная реалистическая	0,088	0,32
2	Запорная арматура с электроприводом	Зарубежная	0,12	0,75
		Отечественная консервативная	0,13	0,55
		Отечественная реалистическая	0,11	0,48

5) оценка неопределенностей значений параметров.

Как показывает зарубежная практика /52/ 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 /52/. 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 3.6 приведены результаты исследования неопределенности значений параметров;

6) 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 необходимо дополнять статистические оценки параметров экспертными для ряда моделей.

Например, для моделирования отказов по общей причине вследствие ошибочных действий персонала во время периодических обходов в работе /22/ использована биномиальная модель. Частота воздействий определяется частотой таких ежедневных обходов, т.е. равна 0,125 1/час.

Нелетальные воздействия во время обходов связаны с неправильным выполнением каких-либо операций, а летальные - с неправильным принятием решения о необходимости выполнения ошибочных операций.