

ББК 31.46

Т6

Рецензент В.П. Сметанников

Т6 Солонин В. И. Безопасность и надежность реакторных установок. Учебное пособие по курсу "Расчеты и проектирование ядерных энергетических установок".- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1996. - 80 с., ил.

В учебном пособии изложены основные понятия, цели и принципы обеспечения безопасности атомных станций, глубоко эшелонированной защиты, концепция безопасности, системный подход при анализе аварий. Рассмотрены основы надежности реакторных установок, начала вероятностного анализа аварий и оценки безопасности, а также методы повышения надежности систем, отказы по общей причине.

Для студентов специальности "Ядерные реакторы и энергетические установки".

Табл.5. Ил. 16. Библиогр. 8 назв.

ББК 31.46

МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1996.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АП - аварийная последовательность
- АС - атомная станция
- АСРК - автоматизированная система радиационного контроля
- АЭС - атомная электрическая станция
- АЗ - аварийная защита
- БР - быстрый реактор
- БЩУ - блочный щит управления
- БАБ - вероятностный анализ безопасности
- ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор
- ВКУ - внутрикорпусные устройства
- ГАН РФ - Госатомнадзор Российской Федерации
- ГЕ - гидроемкость
- ГЦН - главный циркуляционный насос
- ГЦТ - главный циркуляционный трубопровод
- ДГ - дизель-генератор
- ДГС - дизель-генераторная станция
- ДО - дерево отказов
- ДС - дерево событий
- ЗСБ - защитная система безопасности
- ИС - исходное событие
- КД - компенсатор давления
- КИП и А - контрольно-измерительные приборы и автоматика
- КС - конечное состояние
- ЛСБ - локализирующая система безопасности
- МАГАТЭ - Международное агентство по атомной энергии
- МКРЗ - Международная комиссия по радиологической защите
- МРЗ - максимальное расчетное землетрясение
- НТД - нормативно-технические документы
- НЭ - нормальная эксплуатация
- ОК - обратный клапан
- ОПБ-88 - Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОГШ-88) ПНАЭГ-1-011-89
- ОР - органы регулирования
- ОСБ - обеспечивающая система безопасности
- ОТ - отвод теплоты
- ПВ - питательная вода

ПГ - парогенератор
ПН - питательный насос
ПК КД - предохранительный клапан компенсатора давления
ПС - промежуточное событие
ПС СУЗ - поглощающие стержни СУЗ
РО - рабочий орган
РУ - реакторная установка
РЩУ - резервный щит управления
САОЗ - система аварийного охлаждения активной зоны
САОР - система аварийного охлаждения реактора
САРХ - система аварийного расхолаживания
СБ - система безопасности
СПОТ - система пассивного отвода тепла
СН - собственные нужды
СНЭ - системы нормальной эксплуатации
СУЗ - система управления и защиты
ТВС - тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ - тепловыделяющий элемент
УС - управляющая система
УСБ - управляющая система безопасности
ФБ - функция безопасности
ХОЯТ - хранилище отработанного ядерного топлива
ЯЭУ - ядерная энергетическая установка

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная энергетика рассматривается как реальный путь решения энергетических и экологических проблем XXI в. Основанием этого является опыт эксплуатации большинства крупных АЭС, построенных в 60-х годах, продемонстрировавший благоприятные экологические характеристики атомных станций. Ядерная энергетика Франции, обеспечивающая около 78 % электроэнергии страны, быстроразвивающаяся ядерная энергетика Японии являются убедительным тому подтверждением.

Обеспечение безопасности всегда составляло важнейшую часть работ по ядерной технике. Крупная авария на АЭС США в 1979 г. и катастрофа на 4-м блоке Чернобыльской АЭС в 1986 г. показали, что вопросы безопасности далеки от решения. Для снижения риска от применения ядерной энергетике до практически не ощутимого населением уровня оказалось необходимым принять меры по повышению безопасности работающих АЭС, пересмотреть принципы обеспечения безопасности разрабатываемых реакторных установок.

Вопросы безопасности и неразрывно связанные с ними вопросы надежности рассматриваются во всех специальных курсах кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки". На заключительном этапе первого (бакалаврского) уровня подготовки в объеме дисциплины "Расчеты и проектирование ЯЭУ" рассматриваются общие вопросы безопасности и необходимые для их количественного анализа вопросы надежности реакторных установок. В основу курса "Безопасность и надежность реакторных установок" положены рекомендации МАГАТЭ, нормативные документы, опыт работы по созданию реакторных установок повышенной безопасности.

1. АТОМНАЯ СТАНЦИЯ. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ. БЕЗОПАСНОСТЬ.

1.1. Структура атомной станции

Безопасность ядерной энергетике должна оцениваться с учетом полного топливного цикла, включающего добычу, физическую и химическую переработку урана в топливные элементы, работу атомных станций, хранение, переработку, захоронение отработанного топлива, транспортировку топлива.

Рассмотрим атомную станцию с позиции обеспечения ее безопасности.

Атомной станцией (АС) называют промышленное предприятие для производства энергии в заданных режимах и условиях применения, располагающееся в пределах определенной проектом территории. Для производства энергии на АС используются ядерный реактор (реакторы) и комплекс необходимых систем, устройств, оборудования, сооружений с необходимым персоналом.

Блоком АС называют часть АС, выполняющую задачи АС в определенном проекте объеме.

Энергоблок АЭС включает реакторное, турбинное, вспомогательное отделения, сооружение электротехнических устройств и управления. Энергоблок включает реакторную установку и турбоустановку (одну или несколько). Может быть использована двух-, трех- или одноконтурная тепловая схема АЭС.

Первый контур, содержащий охлаждающий активную зону реактора теплоноситель, является радиоактивным. Первый контур содержит несколько циркуляционных петель, включающих парогенератор (ПГ) или промежуточный теплообменник (в одноконтурных АЭС - барабан-сепаратор), главный циркуляционный насос (ГЦН), циркуляционный трубопровод.

Теплоносителем в одноконтурных АЭС является химически обессоленная вода, в двухконтурных - раствор борной кислоты, в трехконтурных - жидкометаллический натрий.

Реакторная установка (РУ) располагается в реакторном отделении. Объем реакторного отделения заключен в герметичную оболочку, отделяющую помещения РУ от окружающей среды. В герметичной оболочке реакторного отделения располагаются системы, обеспечивающие выработку теплоты. Эти системы включают:

систему реактора - корпус реактора, внутрикорпусные устройства, активную зону;

систему теплоносителя - трубопроводы, парогенераторы, ГЦН, систему поддержания давления в первом контуре;

паровую систему - паропроводы от ПГ до отсечной арматуры на границе герметичной оболочки;

вспомогательные системы - охлаждения оборудования, подпитки и продувки, азота высокого давления и другие;

систему питательной воды (ПВ) - от герметичной оболочки до ПГ;

систему расхолаживания реакторной установки через теплообменники расхолаживания;

систему охлаждающей воды реакторного отделения.

Для загрузки реактора свежим топливом, выгрузки, хранения и охлаждения отработавшего топлива в объеме реакторного отделения имеются соответствующие системы "работы с топливом".

В турбинном отделении располагается турбоустановка (турбоустановки) и системы второго контура, часть из которых находится вне здания турбинного отделения (трансформаторы, здание маслохозяйства, здание конденсатоочистки).

Во вспомогательном отделении располагаются системы водно-химического режима первого контура, спецочистки радиоактивных отходов.

В сооружении электротехнических устройств и управления располагаются системы блочного и резервного щитов управления (БЩУ, РЩУ), управляющие системы.

Все перечисленные системы являются системами нормальной эксплуатации (СНЭ), они необходимы для осуществления нормальной эксплуатации АС.

1.2. Экологический аспект атомных станций

Атомная станция, как и любое другое предприятие оказывает воздействие на окружающую среду и человека. При оценке воздействия любой промышленной деятельности на окружающую среду и здоровье людей необходимо учитывать как минимум следующие факторы:

ожидаемый ущерб здоровью персонала предприятий и населения, проживающего в их окрестности, определяемый по зарегистрированным фактам или предсказанным вычислениям;

характер загрязнения окружающей среды;

характер, количество и токсичность отходов, которые должны быть переработаны и изолированы от окружающей среды;

рациональное использование природных ресурсов, включая землю, воду и воздух атмосферы, а также таких дополнительных средств, как транспорт;

возможность аварий с серьезными последствиями.

Провести сравнение, тем более количественный анализ этих факторов так, чтобы получить определенный критерий для принятия решения, крайне непросто. Тем не менее, анализ перечисленных факторов проводится, и в первую очередь в атомной энергетике, на фоне сопоставления выгод, которые хочет получить общество, и риска, с которым оно готово мириться. При этом важными оказываются и местные условия, и национальная точка зрения.

Экологические аспекты функционирования АС и сопутствующих предприятий ядерного топливного цикла, с одной стороны, и других видов широкомасштабной промышленной деятельности (в традиционной энергетике, химической, металлургической промышленности), с другой, различаются несильно.

Однако, для ядерной энергии характерны специфические факторы, связанные с радиоактивностью и радиологическими последствиями ее воздействия на человека, окружающую среду как во время работы АС (когда общество получает выгоду), так и в последующие столетия, когда будет необходимо затрачивать ресурсы общества на хранение радиоактивных отходов.

Анализ специфических факторов вызывает необходимость рассмотреть вопросы:

вероятностей аварии с серьезными радиологическими последствиями для окружающей среды;

способов захоронения радиоактивных отходов, исключающих их воздействие на окружающую среду, источники водоснабжения;

влияния радиоактивных выбросов при нормальной эксплуатации на качество воздуха, воды, земли;

использования выделенных под АС площадок по окончании срока использования АС.

Анализ комплекса специфических факторов показывает, что, при исключении аварий с серьезными радиологическими последствиями, с точки зрения воздействия на природную среду, охраны качества воды и воздуха, защиты землепользования, ущерб, который может быть причинен обществу в связи с использованием ядерной энергии, является относительно низким по сравнению с другими источниками энергии (и возобновляемыми, и не возобновляемыми). Поэтому ядерная энергетика, ядернобезопасная, удовлетворяющая основные потребности человечества в энергии, может внести положительный вклад в качество жизни и снизить темпы ухудшения качества окружающей среды.

Из широкого круга вопросов экологического аспекта работы АС в данном курсе будет рассмотрено обеспечение безопасности АС.

Под безопасностью АС понимается свойство АС при нормальной эксплуатации (НЭ) и в случае аварий ограничивать радиационное воздействие на персонал, население, окружающую среду установленными пределами. Главное внимание будет уделено формированию основ системного подхода к проектированию, конструированию АС с позиций удовлетворения критериям безопасности. Критерии безопасности, в соответствии с которыми обосновывается безопасность АС, - это значения параметров и/или характеристик систем, элементов АС, а также последствий аварий, которые устанавливаются нормативно-техническими документами (НТД) и/или органами Госатомнадзора РФ (ГАН РФ) на основе рекомендаций МАГАТЭ.

1.3. Подход к проектированию

Современный подход к проектированию безопасных АС принципиально мало, в чем отличается от аналогичных подходов в других сложных, наукоемких областях технической деятельности. В первую очередь следует назвать ракетно-, самолетостроение (космонавтику, авиацию, если вести речь о безопасной ядерной энергетике). В основе подхода заложено достаточно условное разделение конструкции на ряд систем нормальной эксплуатации и систем безопасности (СБ), совокупное взаимодействие которых, несмотря на возможные отказы, связанные с дефектами проекта или изготовления, ошибками эксплуатации, маловероятными внешними воздействиями, снижает риск использования конструкции до приемлемой величины как для общества в целом, так и для каждого человека. Низкой настолько, что выгоды от использования конструкции многократно превышают негативные последствия от аварий. Наилучшей характеристикой безопасности конструкции является факт ее эксплуатации при значениях параметров технологического процесса, не вызывающих необходимости ввода в действие систем безопасности.

Разработка систем безопасности АС требует достаточно подробной и определенным образом построенной информации о функционировании АС в условиях нормальной эксплуатации и авариях, т.е. нарушениях эксплуатации АС, при которых происходит выход радиоактивных веществ и ионизирующих излучений за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные пределы.

Анализ аварий и ограничение их последствий проводится при разделении аварий на проектные, запроектные и использовании промежуточного между нормальной эксплуатацией и аварией состояния в аварийной ситуации.

2. СОСТОЯНИЕ АТОМНОЙ СТАНЦИИ.

2.1. Нормальная эксплуатация

К режимам нормальной эксплуатации АС относятся работа на мощности, пуск, останов, испытания, техническое обслуживание, ремонт, перегрузка топлива, инспектирование, а также другая связанная с этими режимами деятельность.

Нормальная эксплуатация обеспечивается проектным функционированием систем нормальной эксплуатации, которые управляются автоматически и с помощью персонала, действующего в соответствии с эксплуатационными инструкциями.

2.2. Аварийная ситуация

К аварийным ситуациям относятся режимы, в которых нарушены пределы и/или условия безопасной эксплуатации, которые, однако, не перешли в аварию. В аварийных ситуациях вышедшие за пределы нормальной эксплуатации параметры воздействием систем нормальной эксплуатации возвращаются в предписанные условиями безопасной эксплуатации пределы.

Примерами аварийных ситуаций являются режимы отключения одного или нескольких ГЦН из числа работающих, отключения турбины стопорными клапанами, отключения внешнего электропитания АС, отключения всех трактов питательной воды, ошибочное уменьшение концентрации бора в первом контуре, самопроизвольное извлечение поглощающих стержней системы управления и защиты

(ПС СУЗ), ложное срабатывание аварийной защиты (АЗ), неправильная загрузка тепловыделяющей сборки (ТВС) в активную зону и ее эксплуатация, ложное открытие клапана сброса пара в конденсатор турбины.

В аварийных ситуациях СНЭ обеспечивают автоматический ввод резерва, снижение мощности РУ, обеспечение (если необходимо) подкритичности активной зоны, отвод остаточных тепловыделений, расхолаживание РУ, а при потере связи с энергосистемой - запуск дизель-генераторов, которые обеспечивают электропитанием системы, обеспечивающие подкритичность и расхолаживание РУ.

2.3. Проектные аварии

К проектным авариям относятся режимы, в которых радиоактивные продукты и излучения распространяются за предусмотренные условиями нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные пределы безопасной эксплуатации. В проектных авариях должно быть гарантировано предотвращение развития повреждений топлива и выбросов радиоактивных продуктов в окружающую среду.

В условиях проектных аварий СНЭ продолжают выполнять свойственные им функции создания подкритичности активной зоны, отвода остаточных тепловыделений, расхолаживания РУ в той мере, в какой это остается возможным в свете вызвавших проектную аварию событий и отказов. Для гарантированного обеспечения подкритичности и расхолаживания РУ при условиях предотвращения повреждений топлива и выбросов радиоактивных продуктов в окружающую среду РУ оснащается системами безопасности.

СБ обеспечивают независимое от СНЭ создание подкритичности активной зоны, расхолаживания РУ и поддержание ее в безопасном состоянии в течение времени, необходимого для начала противоаварийных мероприятий, но не менее 24 часов.

Опыт эксплуатации РУ показывает, что к режимам проектных аварий относятся непреднамеренное открытие предохранительного клапана компенсатора давления (ПК КД) с последующей его не посадкой, течи при разрывах трубопроводов первого контура, трубок ПГ, заклинивание или разрыв вала одного ГЦН, выброс органа регулирования при разрыве чехла привода СУЗ, разрыв трубопровода ПВ ПГ, падение ТВС при перегрузке топлива, пожар, землетрясение, падение самолета на оболочку реакторного отделения и другие внешние воздействия.

Анализ перечисленных и других режимов должен показать, что в условиях проектных аварий вероятность повреждения топлива активной зоны и выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду достаточно мала (составляет 10^{-5} 1/год и 10^{-7} 1/год в соответствии с ОПБ – 88/97)

2.4. Запроектная авария

К запроектным авариям относят аварии, частота возникновения и реализации которых меньше принятой частоты повреждений при проектных авариях (в соответствии с ОПБ-88), но в ходе которых возможно тяжелое повреждение или расплавление топлива в активной зоне. Несмотря на то, что вероятность такого рода аварий крайне низка, в современных проектах предусматриваются технические меры, обеспечивающие удержание расплавленного топлива в объеме реакторного помещения. Разрабатываются меры управления протеканием запроектных аварий с использованием СНЭ и СБ, преследующие цель уменьшить радиационные последствия

процессов.

К запроектным авариям могут привести массовые отказы СБ и СНЭ, тяжелые повреждения оборудования: обрыв шахты ВКУ; отрыв днища или крышки корпуса реактора; одновременный разрыв всех паропроводов и отказ отсечной арматуры паропроводов; отказ механической и иной аварийной защиты; потеря всех источников энергоснабжения, отказ СУЗ и невмешательство операторов; некомпенсируемая течь облицовки бассейна выдержки отработанного топлива.

2.5. Международная шкала происшествий на атомных станциях

Изложенная классификация состояний атомной станции лежит в основе проектной конструкторской деятельности, организации строительно-монтажных работ, эксплуатации, подготовки специалистов для атомной промышленности. Однако она нерациональна с позиции информирования населения о событиях, происходящих на станции и, главное - оценке их опасности для населения, окружающей среды.

Группа экспертов МАГАТЭ разработала шкалу оценки событий на атомных станциях на основе опыта, полученного при использовании подобными шкалами во Франции и Японии, их разработки в ряде стран, включая СССР. Шкала вводит дифференцированное восприятие состояний атомной станции, объясняет в доступной форме их важность с позиций безопасности С ядерной или радиационной). Нижняя часть шкалы (до уровня 3) относится к состояниям, представляющим лишь потенциальную угрозу для населения. Верхняя часть шкалы (уровни 4-7) соответствует авариям, радиационное воздействие на население при этом превышает допустимое при нормальной эксплуатации. Международная шкала происшествий на АС представлена в приложении 1.

3. КОНЦЕПЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

3.1. Понятие концепции безопасности

Концепция безопасности представляет собой совокупность:

критериев, которым должно удовлетворять радиационное воздействие АС на персонал, население, окружающую среду в условиях нормальной эксплуатации, при проектных и запроектных авариях;

принципов, с помощью которых достигаются качества безопасности, установленные критериями;

проектных решений, направленных на реализацию критериев и принципов безопасности.

3.2. Радиационное воздействие

Критерии радиационного воздействия устанавливаются:

что при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях дополнительный вклад АС в эквивалентную дозу облучения населения должен быть в 10 - 100 раз ниже фоновых значений;

при проектных авариях на АС защита населения должна быть обеспечена за

пределами промплощадки (площадки АС) без введения организационных мер;

при ликвидации последствий аварий уровни планируемого облучения персонала должны соответствовать нормам радиационной безопасности;

при запроектных авариях за пределами зоны планирования защитных мероприятий, предельный радиус которого не более 25 км, не должны требоваться меры по защите населения. В этой зоне могут быть лишь установлены временные ограничения на потребление отдельных сельскохозяйственных продуктов местного производства. Радиус зоны планирования защитных мероприятий в современных проектах АС имеет тенденцию к уменьшению, так что зона планирования защитных мероприятий приближается к размерам зоны промплощадки (радиус порядка 1...1.5 км).

3.3. Принцип "защита в глубину"

Принципы, с помощью которых достигаются качества безопасности, установленные критериями, выработаны с учетом источников потенциальной опасности АС:

возможных радиационных аварий при эксплуатации топлива на АС.

возможных радиационных аварий при перевозке радиоактивных отходов, отработанного и свежего топлива АС,

распространения радиоактивности со сточными водами или воздухом системы вентиляции АС,

возможности хищения ядерных материалов.

Эти принципы - совокупность технических и организационных мер, выстроенных таким образом, что при исчерпании ресурса одних вступают в действие следующие технические и организационные меры, так что реализуется "защита в глубину". В принципе защиты в глубину можно выделить три ступени.

Первая основывается на тщательном проектировании, сооружении и осторожной эксплуатации АС. Использование стандартов качества, высокая степень гарантий от отказов и ошибок, испытание материалов и конструкций, разнообразие средств измерения и контроля, повышенная нечувствительность конструкции к нарушениям в совокупности приводят к снижению до весьма малого значения вероятностей возникновения аварии. Первая ступень "защиты в глубину" обеспечивает предупреждение аварий.

На второй ступени предполагается возможность отказов оборудования или ошибок персонала и предусматриваются защитные средства, организационные меры в целях возвращения АС к условиям безопасной эксплуатации или, если это необходимо, остановке АС, когда отказ или ошибочное действие произойдут. Эти защитные средства называют системами безопасности. Их примеры: система автоматической остановки реактора, система аварийного охлаждения активной зоны, система расхолаживания первого контура РУ.

На третьей ступени "защиты в глубину" создаются дополнительные технические и разрабатываются плановые организационные меры, направленные на ограничение распространения радиоактивных продуктов и защиту населения. Технической мерой является сооружение защитных оболочек, удерживающих в своем объеме радиоактивные продукты. Организационной мерой может стать эвакуация населения из опасной радиационной зоны.

3.4. Барьеры безопасности. Защита барьеров

Проектные решения, направленные на реализацию критериев и принципов безопасности, базируются на принципе защиты в глубину. Проектные решения имеют целью создание нескольких барьеров, способных эффективно удерживать радиоактивные вещества и ослаблять ионизирующие излучения. Проектные решения имеют целью сохранить эффективность барьеров безопасности в условиях нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий, тем самым обеспечив защиту персонала, населения, окружающей среды от радиологического воздействия. Проектные решения по созданию барьеров, их защите и сохранению их эффективности включают как технические, так и организационные меры.

Система барьеров АС включает следующее:

топливную матрицу, способную при определенных значениях температуры, пористости, глубины выгорания, в определенных условиях их изменения удерживать в своем объеме часть продуктов деления;

оболочку тепловыделяющего элемента или микротвэла, удерживающую продукты деления в своем герметичном объеме при определенных термомеханических нагрузках и условиях химико-металлургического взаимодействия с топливной матрицей;

прочноплотную поверхность первого контура, удерживающую теплоноситель, содержащий в своем составе компоненты, примеси, приобретающие свойство радиоактивности при прохождении через активную зону. При разгерметизации оболочки твэла, повреждении топливной матрицы прочноплотная поверхность первого контура ограничивает распространение продуктов деления объемом первого контура;

герметичное ограждение, систему помещений и оболочек, удерживающих в своем объеме среды с радиоактивными веществами, вышедшими за пределы своего проектного положения. Такими средами могут стать теплоноситель первого контура при разгерметизации поверхности первого контура, теплоноситель бассейна выдержки отработанного топлива при нарушении системы охлаждения бассейна, испарении теплоносителя бассейна.

Защита барьеров в целях сохранения их работоспособности обеспечивается поддержанием при нормальной эксплуатации значений существенных параметров и характеристик состояния систем, элементов АС, АС в целом в пределах, установленных в проекте (эти значения называют "эксплуатационными пределами"). Такими параметрами являются в первую очередь флюенс нейтронов, температура материалов барьеров, давление окружающих барьеры сред, скорость изменения этих параметров во времени. Для их контроля выполняются измерения мощности реактора, распределения энерговыделения по объему активной зоны датчиками внутриреакторного контроля, подогрева (паросодержания) теплоносителя в тепловыделяющих сборках, давления теплоносителя. Контролируются характеристики состояния металла трубопроводов, оборудования, в том числе на внутренних поверхностях корпуса реактора, коллекторов ПГ и т.д. с использованием образцов-свидетелей и системы определения остаточного ресурса.

После перегрузки реактора или ремонтных работ проводятся гидравлические испытания каждого уплотнения первого контура. Организованные и неорганизованные протечки теплоносителя первого контура при эксплуатации контролируются автоматизированной системой радиационного контроля (АСРК) по реперным нуклидам, изменению уровней в оборудовании, приемках сбора протечек.

Герметичное ограждение испытывается на прочность и герметичность избыточным давлением воздуха. Металлические ограждающие элементы контролируются датчиками коррозионного мониторинга, системой определения технического состояния герметичного ограждения.

Для ограничения давления в первом контуре, герметичном ограждении предусмотрены системы защиты от превышения давления (предохранительные устройства - клапаны, редукционно-охладительные установки, разрывные мембраны).

Поддержание регламентируемого проектом качества теплоносителя, параметров сред в герметичных помещениях важно для защиты барьеров. Задача защиты барьеров остается существенной и в условиях нарушения пределов безопасной эксплуатации АС. Тогда защита барьеров направлена на поддержание значений параметров и характеристик состояния систем (элементов) АС и АС в целом, установленных для аварийных ситуаций и аварий (называемых "проектными пределами").

В условиях аварийных ситуаций защита топливной матрицы и твэла включает следующее;

ограничение скорости увеличения (уменьшения) мощности реактора,

не превышение предельно допустимых значений параметров теплоносителя в первом контуре.

Защита границы контура теплоносителя и герметичного ограждения достигается благодаря не превышению предельно допустимых значений теплотехнических параметров сред первого, второго контура и герметичной оболочки.

Защита барьеров обеспечивается СНЭ, а при необходимости и с использованием части СБ (например, АЗ).

В условиях проектных аварий защита топливной матрицы и твэла предусматривает в первую очередь достижение и поддержание подкритического состояния активной зоны. Не менее важно обеспечение отвода теплоты остаточного тепловыделения от твэлов, а также отвода теплоты, аккумулированной в оборудовании, трубопроводах первого контура.

Защита контура теплоносителя и герметичного ограждения имеет целью не превышение максимально допустимых значений теплотехнических параметров в них. Важную особенность в характер изменения теплотехнических параметров и выбор их предельно допустимых значений вносят аварии с разгерметизацией первого контура (малые, средние и большие течи из первого контура). При малых течах возможно поддержание значений параметров теплоносителя на уровне, принятом для условий нормальной эксплуатации. При средних и больших течах давление в первом контуре аварийно снижается. Для обеспечения гарантированного охлаждения и расхолаживания активной зоны, всего первого контура при авариях с разгерметизацией первого контура целесообразно принудительное его разуплотнение с тем, чтобы использовать для тепло отвода запасы теплоносителя в гидроемкостях (ГЕ) атмосферного давления, бассейне выдержки отработанного топлива.

В условиях запроектных аварий защита топливной матрицы, оболочек твэлов, герметичной (разрушенной) поверхности первого контура аналогична защите при проектных авариях. Меры управления аварией предполагают использование в этих целях как СНЭ, так и СБ. При защите герметичного ограждения возникает ряд новых функций:

поддержание пожара- и взрывобезопасной концентрации водорода (горючих газов) в объеме оболочки;

предотвращение возникновения паровых взрывов и ограничение последствий паровых взрывов;

обеспечение охлаждения расплава активной зоны в корпусе реактора или в ловушке расплава в объеме герметичного ограждения.

3.5. Самозащищенность. Внутренне присущая безопасность

Защита барьеров безопасности требует затрат энергии, специально подводимой для этих целей, управляющих воздействий, вмешательства персонала.

В то же время очевидно, что задача защиты барьеров может быть решена специальным конструированием тех частей установки, процессы в которых влияют на работоспособность барьеров. Например, защита барьера от влияния увеличивающегося нейтронного потока может быть достигнута воздействием органов СУЗ, а может быть обеспечена и на основе свойства саморегулирования активной зоны - выбора соответствующего значения отрицательного температурного коэффициента реактивности. Другой пример - увеличения теплоотвода от барьера можно добиться увеличением числа оборотов ГЦН, но можно и увеличением движущего напора естественной циркуляции.

Использование саморегулирования активной зоны, естественной циркуляции для защиты барьеров является примером использования пассивных систем, структур, приемов для защиты барьеров. Пассивные структуры исключают опасность разрушения барьеров вследствие внутренне присущих им свойств. Они не нуждаются в подводе энергии, системе управления. Их действие основывается на естественных процессах и обратных связях, инициируемых этими процессами.

В качестве таких естественных процессов рассматривают следующие: тепловое расширение материалов;

передача теплоты теплопроводностью, излучением;

естественная конвекция и циркуляция теплоносителя, сред;

движущиеся рабочие среды;

системы с памятью формы;

аккумуляторы механической, тепловой энергии;

устройства с изменением агрегатного состояния, формы.

Свойства защиты, достигаемые за счет естественных процессов, не могут быть механически отделены от конструкции, что, однако, возможно при использовании активных систем управления. Поэтому использование естественных обратных связей и процессов обеспечивает высокую надежность защиты барьеров.

При использовании естественных процессов и обратных связей реакторная установка приобретает качество самозащищенности, внутренне присущие ей свойства безопасности,

Самозащищенная активная зона должна иметь:

малый оперативный запас реактивности;

малый отрицательный коэффициент реактивности;

конструктивные решения и материалы, исключаящие

- вторичные критические массы,
- локальные критические массы,

- экзотермические реакции между материалами;
- теплоотвод за счет естественной циркуляции в условиях нормальной эксплуатации;
- пассивные системы аварийного отвода теплоты;
- пассивные системы глушения реактора.

4. СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

4.1. Функции системы безопасности

Функция безопасности (ФБ) - специфическая конкретная цель и реализующие цель действия, направленные на предотвращение аварий или ограничение их последствий. Среди конкретных специфических целей обычно выделяют три: контроля и управления реактивностью, охлаждения активной зоны и локализации радиоактивных веществ и излучений. Эти цели и реализующие их действия называют фундаментальными функциями безопасности.

Предотвращение аварий является задачей СНЭ, с которой эти системы успешно справляются в условиях, когда отказы систем (элементов) АС не снижают эффективность СНЭ настолько, что значения параметров технологического процесса отклоняются за установленные проектом безопасные пределы (пределы безопасной эксплуатации АС). Если эффективность СНЭ становится недостаточной для поддержания значений параметров технологического процесса в пределах безопасной эксплуатации, вступают в действие системы (элементы) безопасности.

Системы (элементы) безопасности - системы (элементы), предназначенные для выполнения функций безопасности. Разработка СБ как комплекса технических и организационных мер, предназначенных для повышения безопасности АС, проводилась после принятия основных решений по проектно-конструкторскому облику СНЭ, оборудования РУ. Каждая из систем безопасности создавалась, исходя из опыта эксплуатации АС предшествующих поколений, для повышения качества безопасности АС в определенных условиях, с учетом . определенных последовательностей событий и отказов. По этой причине функции безопасности, выполняемые СБ, как правило конкретны (специфичны, узки). Функции безопасности, выполняемые СНЭ, более широки, комплексны, и главным образом потому, что в условиях нормальной эксплуатации протекает подавляющее большинство режимов АС. Режимы, в которых значения параметров и характеристик СНЭ находятся в эксплуатационных пределах, для СБ являются режимами ожидания. Режимы функционирования СБ - режимы проектных, запроектных аварий, иногда режимы аварийных ситуаций.

4.2. Классификация систем безопасности

Главной функцией безопасности систем безопасности АС является защита барьеров безопасности в целях предотвращения или ограничения их повреждений, локализации радиоактивных продуктов на АС. В зависимости от конкретных функций, выполняемых СБ по защите барьеров, различают защитные (ЗСБ), локализующие (ЛСБ), обеспечивающие (ОСБ), управляющие системы (УСБ).

Защитные, локализующие системы предназначены для предотвращения или ограничения соответственно:

повреждений трех первых барьеров безопасности, содержащих радиоактивные

вещества;

распространения выделяющихся при авариях радиоактивных сред и излучений за установленные проектом границы и выхода их в окружающую среду.

Обеспечивающие системы безопасности предназначены для снабжения СБ энергией, рабочей средой, создания условий для их функционирования.

Управляющие системы безопасности предназначены для приведения в действие СБ, осуществления контроля и управления СБ в процессе выполнения заданных функций.

Защитные, локализирующие, обеспечивающие СБ носят наименование технологических, т.е. реализованных в форме контуров со средами, агрегатов, источников энергии и т.п.

4.3. Защитные системы безопасности

В состав защитных систем входят:

система управления и защиты;

система аварийного охлаждения активной зоны, реактора (САОЗ, САОР);

система аварийного газоудаления;

защитные элементы границы давления первого контура.

Система управления и защиты выполняет функцию защиты первого и второго барьеров безопасности. Конкретные функции безопасности, выполняемые СУЗ, включают;

ограничение периода и величины нейтронного потока в пусковом, рабочем диапазоне в зависимости от заданного значения мощности, числа работающих ГЦН;

ограничение давления над активной зоной и температуры теплоносителя в любой горячей нитке петли, предотвращение снижения разности между температурой насыщения в первом контуре и максимальной температурой в горячих нитках петель;

предотвращение снижения уровня в КД или котловой воды в ПГ.

Система аварийного охлаждения предназначена для заполнения реактора теплоносителем при течах первого контура, отвода остаточных тепловыделений и аккумулированной теплоты. Система включает гидроемкости высокого давления, баки атмосферного давления, систему аварийной подпитки первого контура (насосную), системы пассивного отвода теплоты от парогенератора, теплоносителя реактора. Все составные части системы аварийного охлаждения выполняют функцию защиты топливной матрицы и оболочки ТВЭЛов подачей теплоносителя в активную зону, созданием аварийных контуров теплоотвода, выполнения других конкретных функций безопасности, зависящих от конкретного выбора параметров срабатывания различных частей системы.

Система аварийного газоудаления выполняет функцию удаления неконденсирующихся газов из первого контура и защищает ТВЭЛы, предотвращая срыв естественной циркуляции в первом контуре.

Защитные элементы границы давления первого контура предотвращают повышение давления в первом контуре более чем до 1,15 от рабочего, тем самым предотвращая разрушение третьего барьера безопасности, недопустимый рост значений параметров теплоносителя, нарушение условий охлаждения ТВЭЛов.

4.4. Локализирующие системы безопасности

В состав локализирующих систем входят:

герметичная облицовка или металлическая защитная оболочка;

система теплоотвода от среды и/или герметичной оболочки;

система изолирующих устройств, герметичных проходов, шлюзов;

система контроля присутствия в среде защитной оболочки горючих газов и система аварийного сжигания водорода.

Герметичная облицовка и/или защитная оболочка являются барьером для распространения радиоактивных продуктов в окружающую среду. Система теплоотвода обеспечивает не превышение значений теплотехнических параметров в среде защитной оболочки - функцию защиты барьера. Шлюзы (люки) предназначены для обеспечения доступа персонала, оборудования и материалов при ремонте (на остановленном реакторе), для доставки (выгрузки) топлива в (из) бассейн перегрузки. Изолирующие устройства включают арматуру, перекрывающую коммуникации, которые связывают оборудование и системы внутри и вне герметичного объема. Система контроля горючих газов и сжигания водорода выполняет функцию безопасности - предотвращает образование взрывоопасных концентраций или неорганизованное горение водорода в помещениях защитной оболочки.

4.5. Обеспечивающие системы безопасности

В состав обеспечивающих систем входят:

система аварийного электропитания первой группы - аварийные аккумуляторные батареи;

система аварийного электропитания второй группы - аварийные дизель-генераторы;

системы сжатого газа для привода пневмоарматуры;

системы вентиляции.

4.6. Управляющие системы безопасности

В состав управляющих систем безопасности входят:

система автоматической остановки реактора;

система приведения в действие технических средств безопасности.

Система автоматической остановки реактора включает датчики, устройства логической обработки и формирования управляющих сигналов, воздействующих в аварийных режимах на приводы органов регулирования (ПС СУЗ). Функции системы автоматической остановки реактора взаимосвязаны с функциями систем АЗ.

Система приведения в действие технических средств безопасности включает датчики, устройства логической обработки и формирования управляющих сигналов, которые приводят в действие активные элементы защитных, локализирующих, обеспечивающих СБ (вентили с электра- или пневмоприводом, изолирующие устройства, дизель-генераторы и т.п.),

5. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ АВАРИИ

5.1. Источники ядерной и радиационной опасности

Источниками ядерной и радиационной опасности являются: активная зона; первый контур;

система очистки первого контура; система вентиляции (фильтры); хранилище ядерного топлива.

Источники энергии, способные привести к разрушению барьеров:

ядерная энергия деления;

энергия остаточного энерговыделения;

энергия химических реакций компонентов:

- запасов дизельного топлива, масла,
- запасов горючих материалов,
- запасов водорода; аккумулированная энергия;
- в теплоносителе первого контура,
- во вращающихся механизмах,
- в емкостях с газом, водой; внешние воздействия:
- землетрясения,
- удары,
- химические воздействия;

механические нагрузки, циклические нагрузки, коррозионные процессы, биологические процессы, развивающиеся в условиях НЭ;

физическое воздействие (терроризм).

5.2. Виды исходных событий

Барьеры безопасности в условиях нормальной эксплуатации защищены от потенциальной опасности разрушения. Однако в силу конечного значения вероятности безотказной работы любой системы, элемента условия нормальной эксплуатации сопровождаются появлением отказов.

Исходное событие (ИС) - единичный отказ в системах АС, внешнее событие или ошибка персонала, которые нарушают нормальную эксплуатацию и могут привести к нарушению пределов и условий безопасной эксплуатации.

ИС принято объединять в группы по признаку влияния ИС на процессы в РУ. Пример такого объединения приведен в табл.1. Каждая группа ИС приводит к нарушению одной или нескольких фундаментальных функций безопасности. Реакция СНЭ и СБ должна быть адекватной - препятствовать разрушению барьеров безопасности, предотвратить аварию, а если это невозможно ослабить последствия аварий допустимыми с позиций критериев безопасности пределами.

Как правило, при конкретном ИС следует ожидать нарушения нескольких функций безопасности.

Какие ИС подлежат анализу? В первую очередь те, которые имеют высокую частоту проявления. Затем - имеющие более низкую частоту, но могущие привести к очень тяжелым радиологическим последствиям (запроектным авариям). Вообще говоря, должны быть проанализированы практически все ИС, кроме, пожалуй, приводящих к заведомо малозначительным, с позиций радиологической опасности, последствиям.

Характеристика интенсивности ИС представлена в табл.1

Таблица1.

Виды исходных событий

Группа исходных событий	Примеры исходных событий группы	Функция безопасности
1	2	3
Непреднамеренное изменение реактивности	Несанкционированное перемещение ОР. Выброс (падение) ОР. Отказы системы борного регулирования. Попадание замедлителя в БР. Изменение теплоотвода	Контроль и управление реактивностью, 1-я ФБ
Нарушение теплоотвода от реактора	Потеря внешней нагрузки. Обесточивание СН. Потеря ПВ. Снижение расхода в контурах. Ухудшение теплоотвода от ТВС	Охлаждение активной зоны, 2-я ФБ
Разгерметизация первого контура	Разгерметизация трубопроводов. Разгерметизация ИГ. Неисправность ПК ПГ. Разгерметизация промежуточного контура СН	1-ая и 2-ая ФБ
Нарушение при работе с топливом	Отказы транспортно-технологического оборудования. Падение ТВС в реактор. Падение контейнера с кассетой. Течь воды ХОЯТ	1-ая и 2-ая ФБ
Инициированные внешними событиями	Землетрясение. Падение самолета. Воздействие ударной волны. Цунами, смерч, наводнение	Локализация радиоактивных веществ, излучений, 3-я ФБ
Прочие события	Пожар в помещениях. Пожар на площадке АС. Взрыв фильтра активности.	1,2 и 3-я ФБ

Интенсивность исходных событий

Наименование исходного события	Интенсивность, 1/год
1	2
Реактивностные аварии при пуске реактора	10^{-4}
Ошибочное извлечение рабочих органов СУЗ на мощности.	10^{-4}
Потеря внешнего электропитания, в том числе на время более 30 мин	2×10^{-1} 4×10^{-2}
Разгерметизация первого контура: малая течь (до $d_y=50... 100$) средняя течь (до $d_y=150.. .300$) большая течь	10^{-3} 3×10^{-4} 10^{-4}
Разрушение корпуса реактора	$\leq 10^{-6}$
Падение самолета на АС	$\leq 10^{-6}$
МРЗ	$10^{-4}(\text{def})$
Пожар на АС, в том числе на БЩУ	10^{-1} $(2....5) \times 10^{-3}$

5.3. Разработка сценария переходного процесса

Сценарий - последовательность действий системы управления, систем нормальной эксплуатации, СБ. направленных на приведение АС в безопасное состояние:

состояние НЭ;

состояние остановленного (подкритичного, охлаждаемого) реактора, в котором он может находиться неограниченное время, без выхода активности за установленные на АС барьеры.

Какого состояния достигнет АС при данном ИС - предмет анализа. Априори определить состояние сложно. Необходимо моделировать процессы, работу органов управления, исполнительных механизмов и т.д. Соответствующие программные комплексы созданы.

В процессе анализа выбирают характеристики СНЭ и СБ.: объем воды в первом контуре, маховые массы насосов, быстродействие исполнительных механизмов, уставки срабатывания ПК и т.д.

При разработке сценария переходного процесса важно выполнение СНЭ и СБ тех функций, для которых они предназначены. По существу это вопрос о надежности СНЭ, СБ.

Нормы (ОПБ-88) постулируют необходимость соблюдения при этом "принципа единичного отказа", в соответствии с которым система должна выполнять функции при любом требующем ее работы ИС и при независимом от ИС отказе одного из активных элементов или пассивных элементов, имеющих механические движущие части.

Примеры активных элементов: насос, клапан с электроприводом. Пассивный

элемент, имеющий механические движущие части, - обратный клапан, не имеющий механических движущих частей - трубопровод.

"Принцип единичного отказа" - требование к структуре и показателям надежности СБ. Если может отказать насос, должен резервироваться насос. Если может отказать ОК, надо резервировать ОК. Если может отказать система, то необходимо резервировать систему,

6. МЕТОДОЛОГИЯ ДЕРЕВЬЕВ СОБЫТИЙ И ДЕРЕВЬЕВ ОТКАЗОВ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

Для определения множества конечных состояний ГКО с повреждением оборудования, элементов и систем, содержащих радиоактивные вещества, широко используется логический метод дерева событий (ДС) и дерева отказов (ДО).

ДС - логическая диаграмма, которая представляет множество КС, каждое из которых реализуется в форме определенной совокупности промежуточных событий (ПС), существенных для безопасности АС при рассматриваемом исходном событии (ИС). Совокупность ПС от ИС к КС образует путь развития аварии. Схематическое изображение ДС имеет вид таблицы состояний и логической диаграммы состояний в форме графа (рис.1).

Сплошными горизонтальными линиями изображается регламентное протекание ПС. Штриховыми вертикальными и горизонтальными отрезками - отказы при выполнении функций промежуточных событий. Общее число КС при N ПС равно 2^N .

Метод дерева отказов - логический метод выявления различных комбинаций отказов, приводящих к рассматриваемому отказу. Логика дерева отказов в известном смысле обратна логике дерева событий. Построение ДО начинается с выбора вершинного события - отказа, Затем выясняются причины события - отказа, которые соединяются с вершинным событием с использованием логических союзов ИЛИ и И. Например, вершинное событие ~ отказ есть следствие или отказов А и Б или отказа С. Затем выясняются причины отказов А, Б, С до тех пор, пока не будут достигнуты отказы элементов, характеристики надежности которых известны (рис.2).

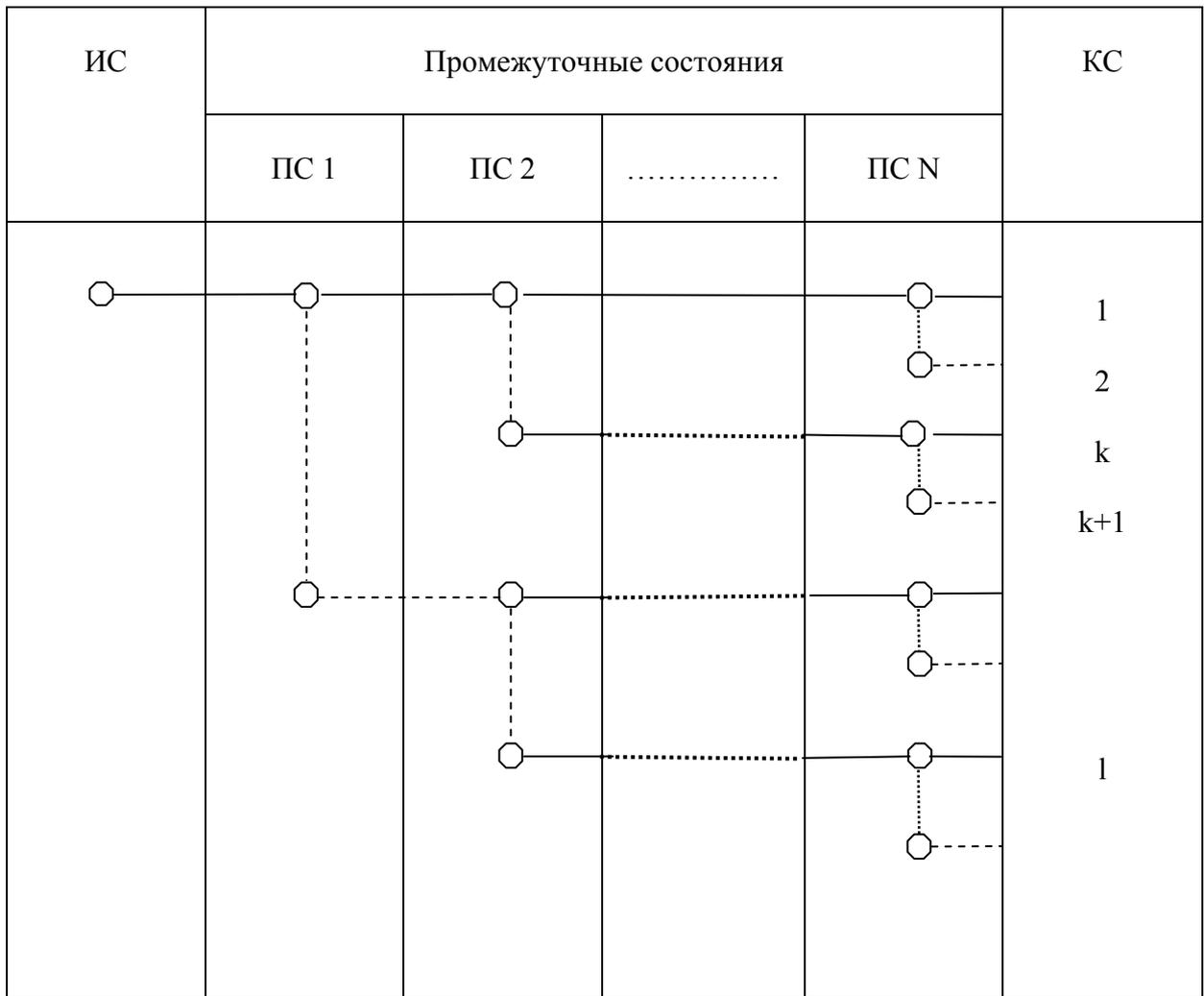


Рис. 1. Схематическое изображение ДС

Различают функциональные ДС и ДО, если рассматриваются промежуточные события - функции безопасности, и системные ДС, ДО, если промежуточными событиями являются элементы, оборудование, системы.

При анализе безопасности часто используются ДС и ДО совместно. Можно рассматривать "короткие" ДС, но "длинные" ДО. Можно, напротив, рассматривать "длинные" ДС, но "короткие" ДО. Предпочтителен первый подход, так как построение ДО проще формализуется и в настоящее время подкреплено серьезным программным обеспечением.

Логика ДС и ДО принципиально эквивалентна, Любое ДС можно представить в виде ДО.

Использование ДС предпочтительно, если логика вероятностного анализа применяется совместно с моделированием процессов, протекающих при аварии на АС.

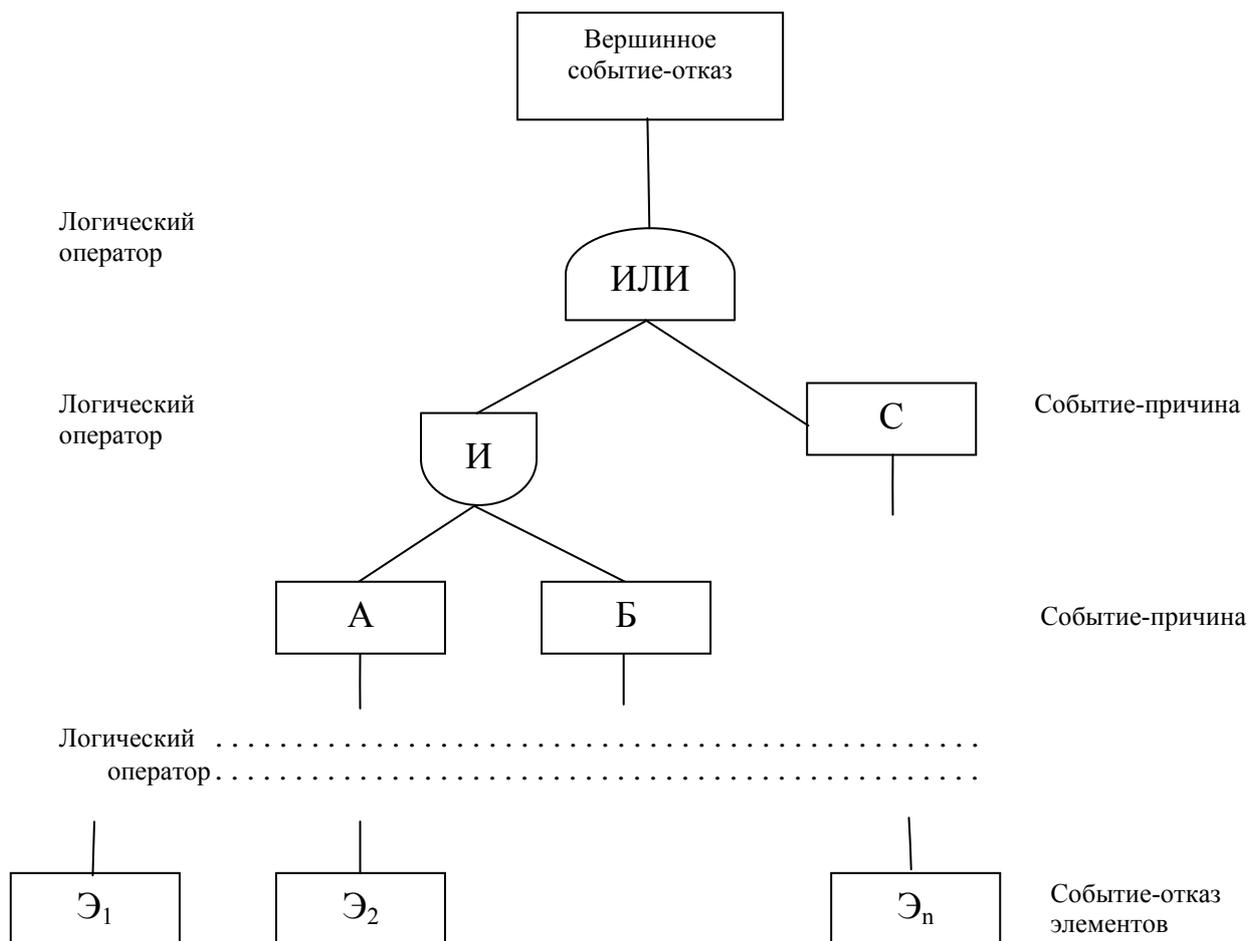


Рис.2. Схематическое изображение ДО

7. МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

7.1. Детерминистский анализ

Детерминистский анализ основан на программных комплексах, моделирующих процессы в РУ, герметичных помещениях, окружающей среде,

Программные комплексы, моделирующие физические процессы, включают; математическую модель;

перечень допущений и упрощений математической модели;

определение области применимости программного комплекса;

описание установок, процессов, подтверждающих качество программного комплекса.

Методики, используемые в проектных работах, должны быть аттестованы ГАН РФ. Аттестации предшествует верификация программного комплекса, являющаяся независимым сравнением результатов расчетов по методике с известными данными,

Для расчетов с использованием программного комплекса формируются исходные

данные:

геометрические, т.е. конструктивные характеристики объектов расчета С (объемы, массы, сечения, перепады высот, площади поверхностей теплообмена сосудов, трубопроводов, активной зоны);

физические, т. е. нейтронно-физические характеристики активной зоны;

технологические, т.е. характеристики систем нормальной эксплуатации и систем безопасности (аварийной защиты, систем поддержания давления в контурах, системы герметичной оболочки), а также уставки срабатывания, алгоритмы работы систем;

начальные условия (физические, теплогидравлические, уровни активности).

Анализ переходного процесса, проектной (запроектной) аварии начинается с выбора последовательности событий и рассмотрения работы систем в хронологической последовательности. Расчет от начального состояния проводится до некоторого нового стационарного состояния или до достижения устойчивой работы систем безопасности.

Основные расчетные параметры сравниваются с предельными, на основе этого делается вывод о безопасности режима, выходе активности за пределы барьера. В основе таких оценок лежат детальные экспериментальные данные о свойствах барьеров.

При нарушениях герметичности барьеров анализируется распространение активности в помещениях герметичной оболочки, в окружающей среде.

Особые методики используются при рассмотрении процессов плавления активной зоны и охлаждения корнума, разрушения корпуса, паровых взрывах, абляции бетона, выделении энергии в этих процессах.

В ходе вариантных расчетов выявляются переходные процессы, не приводящие к нарушению пределов и условий безопасной эксплуатации, устанавливаются необходимые характеристики систем безопасности, ограничивающие повреждения при проектных авариях, разрабатываются меры по управлению запроектными авариями.

7.2. Вероятностный анализ

Детерминистский анализ позволяет проследить развитие переходного процесса при любой последовательности событий, работе систем на основе адекватной модели физических процессов в РУ, на АС. Однако детерминистский анализ не содержит ответа на вопрос о частотах проявления переходных процессов, приводящих к конечным состояниям, характеризующимся нарушением пределов и условий безопасной эксплуатации - проектным и запроектным авариям. Эту сторону анализа безопасности АС выполняет вероятностный анализ безопасности (ВАБ). При ВАБ АС выявляются наиболее опасные последовательности событий, приводящие к авариям, предлагаются способы снижения частоты проявления таких опасных последовательностей соответствующим выбором проектных решений. ВАБ АС позволяет оценить, насколько проектируемая или находящаяся в эксплуатации АС соответствует требованиям нормативных документов и уровню безопасности.

Качество безопасности АС зависит от многих факторов. Поэтому принято разделять вероятностный анализ на четыре уровня, называемые соответственно вероятностным анализом безопасности нулевого уровня (ВАБ-0), первого уровня (ВАБ-1), второго уровня (ВАБ-2), третьего уровня (ВАБ-3).

ВАБ-0 включает анализ надежности систем и оборудования АС, важных для безопасности. Его выполняют при разработке проектов систем и оборудования. Анализ

надежности проводится с учетом внешних и внутренних воздействий, отказов, в том числе по общим причинам, ошибочных действий персонала. В ходе ВАБ-0 выбирают проектные и конструктивные решения, способы защиты от внешних и внутренних воздействий, регламенты технического обслуживания и ремонта. В результате ВАБ-0 получают количественные характеристики надежности важных для безопасности систем и оборудования АС.

ВАБ-1 включает оценку количества радиоактивных продуктов, выделяющихся в помещениях АС при повреждении оборудования, систем, содержащих ядерное топливо и радиоактивные вещества. На начальной стадии анализа целесообразно выполнить консервативную оценку, допустив тяжелое повреждение или плавление активной зоны. В дальнейшем в ходе технического проектирования получают максимально полную информацию о возможных состояниях и повреждениях активной зоны, других источников радиоактивности в процессе детальных детерминистских расчетов нейтронно-физических, теплогидравлических, механических, химических, металлургических процессов в РУ.

В процессе ВАБ-1:

определяют множество состояний АС, связанных с отказами оборудования, систем, ошибками персонала, внешними воздействиями;

определяют подмножество состояний АС, в которых нарушены пределы безопасности, и тяжесть их радиационных последствий;

для каждой группы состояний АС, имеющей близкие радиационные последствия, определяют аварийные последовательности (АП), вносящие максимальный вклад в вероятность появления этой группы состояний. Эти АП называют доминантными. Различные доминантные АП должны иметь близкую вероятность реализации. Если этого нет, следует найти техническое решение, исключающее резкое превышение вероятности отдельных доминантных АП над другими, добиваясь тем самым сбалансированности технических мер безопасности АС. При этом возможно перейти к использованию принципиально иного технического решения;

для основных доминантных АП разрабатывают детальный сценарий и проводят тщательное моделирование переходного процесса, конечных состояний. Результаты моделирования позволяют разработать технические средства, смягчающие последствия аварии, инструкции и системы поддержки операторов при авариях, методы управления запроектными авариями, в том числе планы защиты населения.

ВАБ-2 включает анализ распространения радиоактивных продуктов, расплава активной зоны за пределы РУ в системах их локализации с учетом возможных отказов и повреждений систем локализации. Исходные события, рассматриваемые при проведении ВАБ-2, получают в ходе ВАБ-1. Целью анализа ВАБ-2 является определение количества и состава радиоактивных веществ, выходящих за пределы системы локализации при отказах и выбрасываемых в окружающую среду, а также определение вероятности выбросов. В ходе ВАБ-2 разрабатывают технические средства и организационные меры, уменьшающие вероятность и количество радиоактивных выбросов в окружающую среду до значений, соответствующих требованиям нормативных документов.

ВАБ-3 включает анализ распространения выбрасываемых АС радиоактивных веществ в окружающей среде, определение радиоактивного заражения местности, оценку доз облучения населения. Исходными данными для ВАБ-3 являются результаты ВАБ-2. В ходе ВАБ-3 рассматривают всевозможные пути распространения радиоактивных продуктов в окружающей среде, учитывают характерные особенности местных природных условий.

По результатам ВАБ-3 разрабатывают планы защиты населения и определяют риск от АС для населения, окружающей среды.

При выполнении ВАБ используются следующие вероятностные показатели безопасности:

для ВАБ-0 - вероятность невыполнения заданной функции безопасности, вероятность отказа системы на требование;

для ВАБ-1 и ВАБ-2 - вероятность повреждения активной зоны с превышением выхода активности ($P < 10^{-5}$ 1/год), вероятность предельного выброса в окружающую среду ($P_2 < 10^{-7}$ 1/год);

для ВАБ-3 - вероятность определенной дозы на определенном расстоянии от АС, эквивалентная доза облучения $D(s)$ на расстоянии s от АС:

$$D(s) = \bar{D}(T) = \sum_{i=1}^N P(T, D_i) * D_i \quad (7.1)$$

где $\bar{D}(T)$ - средняя ожидаемая за время T доза облучения на расстоянии s от АС; $P(T, D_i)$ - вероятность дозы величиной D_i за время T на расстоянии s от АС; N - число состояний АС, приводящих к дозе D_i на расстоянии s от АС.

Индивидуальный риск летального исхода, т.е. математическое ожидание условной вероятности летального исхода при облучении человека дозой D_i ,

$$R(T) = \sum_{i=1}^N P_i(T, D_i) * r_i(D_i)$$

где:

P_i -вероятность получения человеком дозы D_i при его облучении за время T ;
 $r_i(D_i)$ - условная вероятность летального исхода при облучении человека дозой D_i ; N - число возможных состояний АС, приводящих к получению человеком различных значений дозы D_i .

7.3. Структура вероятностной модели безопасности

Последовательность разработки безопасности, используемых при этом методов анализа надежности количественного анализа процессов иллюстрирует схема на рис.3.

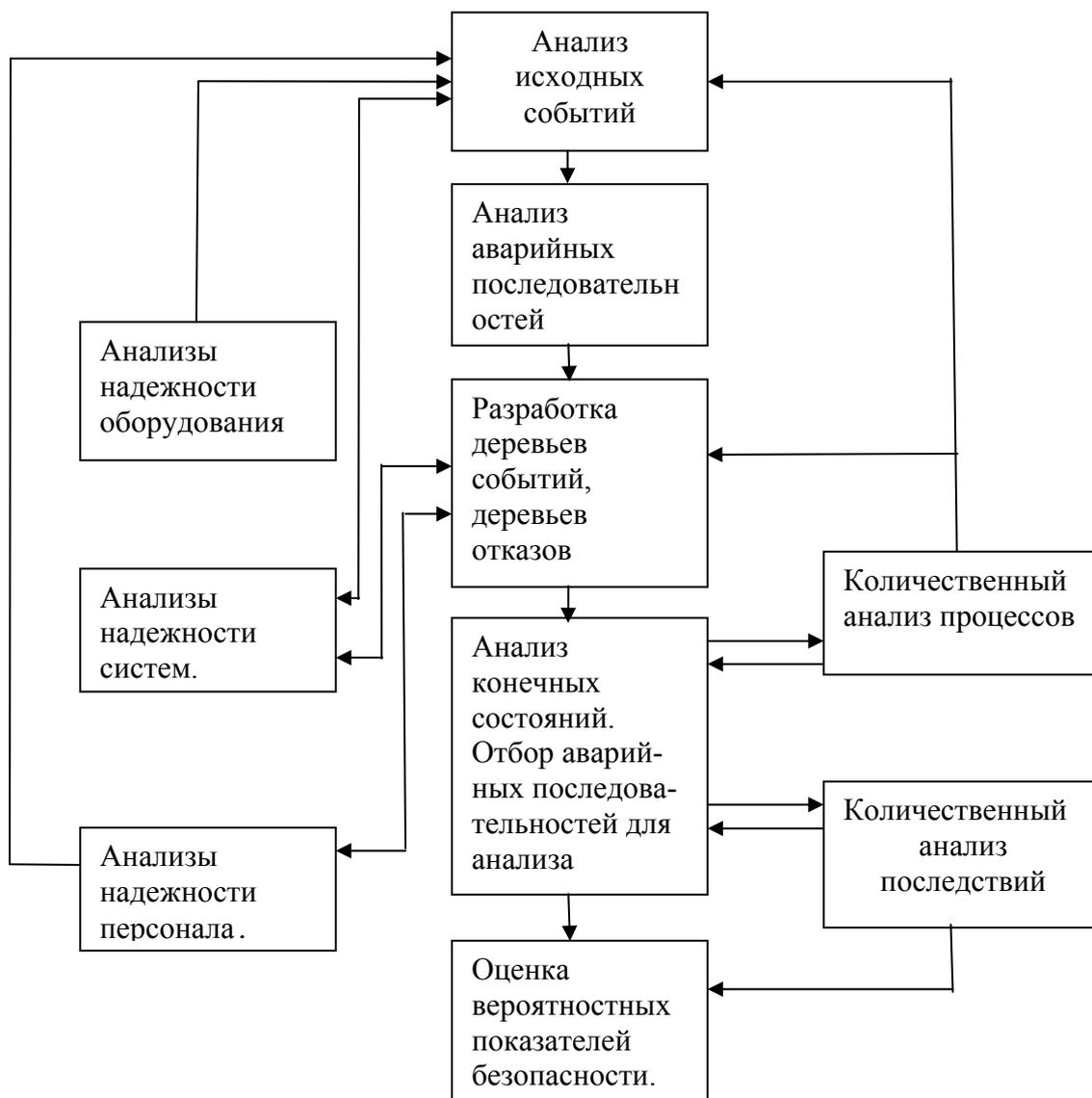


Рис.3.Вероятностная модель безопасности конструкции или системы

8. НАДЕЖНОСТЬ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК, ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ

8.1. Комплексность свойства надежности

Надежность - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов ,

Надежность - комплексное свойство, в котором могут быть выделены:

- безотказность;
- долговечность;

ремонтпригодность;

сохраняемость;

Безотказность - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или реактора, когда его параметры в рассматриваемый момент времени соответствуют основным проектным требованиям. Отказ - потеря работоспособности. Отказ может быть частичным или полным.

Долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Долговечность в отличие от безотказности учитывает возможность перерывов в работоспособном состоянии на техническое обслуживание и ремонт. Предельное состояние устанавливается из условий безопасной эксплуатации, экономических соображений, соображений морального износа. Реакторные установки, не имеющие совершенных систем безопасности, могут быть выведены из эксплуатации до истощения

Ремонтпригодность - свойство объекта, заключающееся в возникновении отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения конструкцией, квалификацией персонала, уровнем технической оснащенности процесса ремонта, организацией работ.

Сохраняемость - свойство объекта сохранять значения показателей безопасности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

8.2. Количественные показатели безотказности

Количественными характеристиками свойства безотказности являются:
вероятность отказа на интервале времени (0,t)

$$F(t) = P(\Theta < t) = \int_0^t f(t)dt \quad (8.1)$$

вероятность безотказной работы на интервале времени (0,t)

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (8.2)$$

интенсивность отказов $\lambda(t)$ в момент времени t

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{F'(t)}{1-F(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (8.3)$$

средняя наработка отказа

$$\bar{\Theta} = \int_0^{\infty} t * f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (8.4)$$

Физический смысл введенных величин ясен из рис.4, где показана типичная зависимость $F(t)$. Вид зависимости $R(t)=1-F(t)$ не требует пояснений. Плотность распределения вероятностей $f(t)=F'(t)$. Вид $f(t)$ также приведен на рис.4 (штриховая линия).

Значение $F(t)$ при $t=0$ равно интенсивности отказов $\lambda(0)$, так как

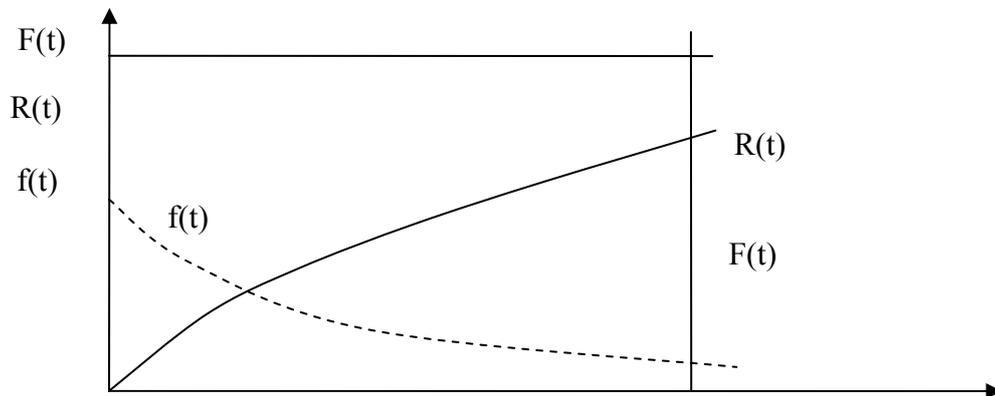
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(0)}{1}$$


Рис.4. Характеристики безотказности

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ численно равна вероятности того, что объект, проработав без отказа в течение времени t (вероятность этого события - $R(t)$), откажет в малую последующую единицу времени. Действительно,

$$f(t) = \lambda(t) * R(t) \quad (8.5)$$

где $f(t)$ - вероятность отказа за время $\Delta t = 1$; $R(t)$ - вероятность безотказной работы за время $(0, t)$.

Следовательно, $\lambda(t)$ - вероятность того, что объект, проработав без отказа время t , откажет в следующую малую единицу времени.

Для оборудования, систем, элементов зависимость интенсивности отказов $\lambda(t)$ от времени, как на рис.5.

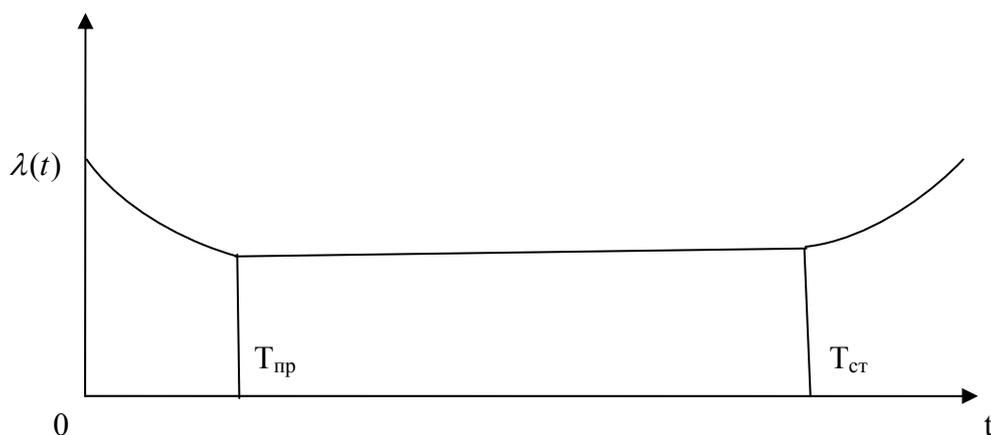


Рис. 5. Зависимость интенсивности отказов от времени:

$(0, T_{пр})$ - период приработки; $(T_{пр}, T_{ст})$ - период нормальной работы; $(T_{ст}, \infty)$ - период старения (интенсивность износа)

В течение периода приработки происходит "выжигание" отказов. В период старения обуславливающими отказ причинами являются физико-химические,

механические и другие процессы, приводящие к деградации свойств материалов.

В период нормальной работы интенсивность отказов сохраняется постоянной. Для этого периода хорошей моделью описания отказов является экспоненциальное распределение:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t), t \geq 0 \quad (8.6)$$

$$f(t) = \lambda * \exp(-\lambda t), t \geq 0 \quad (8.7)$$

где: λ - параметр экспоненциального распределения; $\lambda(t)$ - интенсивность отказов, по определению равна параметру экспоненциального закона:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \lambda \quad (8.8)$$

Для экспоненциального распределения вероятность без отказной работы

$$R(t) = \exp(-\lambda t), \quad (8.9)$$

$$a\bar{\Theta} = 1 / \lambda \quad (8.10)$$

Для случайных дискретных величин удобно использовать биномиальное распределение. Случайная величина X имеет биномиальное распределение с параметрами

$$(n, q); 0 < q < 1, n \geq 1$$

если

$$P_n(X = k) = \binom{n}{k} * q^k * (1 - q)^{n-k}$$

и соответственно

$$F(x) = \begin{cases} \sum_{k=1}^l \binom{n}{k} * q^k * (1 - q)^{n-k}, & 1 \leq x \leq l + 1 \\ 1, & x > n; 0, x \leq 0. \end{cases} \quad (8.11)$$

$$k = 0, \dots, n; \binom{n}{k} = \frac{n!}{(n - k)! * k!}$$

Физический смысл биномиального распределения таков: система имеет n независимых элементов, функционирующих на заданном интервале времени. Вероятность отказа отдельного элемента на интервале равна q . В этом случае число отказавших элементов ($X=k$) системы за рассматриваемый интервал времени будет

описываться биномиальным распределением $P_n(X=k)$.

8.3. Безотказность систем реакторной установки

Систему РУ представим как совокупность элементов, связанных в некоторую структуру и предназначенных для выполнения определенной функции. Если таких функций несколько, безотказность следует рассматривать для каждой функции. Анализ структуры системы РУ имеет целью определение условий ее работоспособности. Связь элементов в системе в смысле ее работоспособности устанавливается логическими операторами И, ИЛИ. Логический оператор И используется, если элементы системы соединены параллельно и любой из них (в случае работоспособности) обеспечивает работоспособность системы. Пример такой системы, состоящей из двух параллельно соединенных элемента, показан на рис. 6.

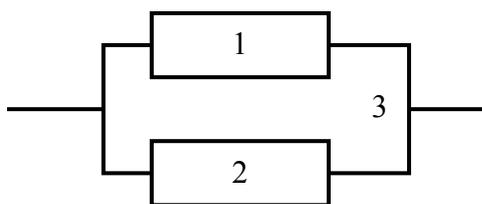


Рис.6. Логически параллельное соединение элементов 1 и 2 в системе 3

В системе может быть более двух параллельно соединенных элементов (например, четыре), причем два из них обеспечивают выполнение функций системы. Тогда под элементом (см. рис.6) следует понимать два любых единичных элемента.

Логический оператор ИЛИ используется, если элементы системы соединены последовательно (рис.7). Система 4 работоспособна, если работоспособны оба элемента.

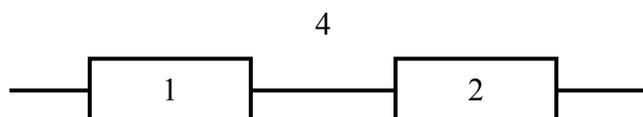


Рис.7. Логически последовательное соединение элементов 1 и 2 в системе 4

Системы параллельно и последовательно соединенных элементов могут образовывать более сложные иерархические системы.

Для исключения (уменьшения вероятностей) ложного срабатывания систем нормальной эксплуатации или систем безопасности используется логика, согласно которой действие системы начинается при наличии, например, двух сигналов из трех возможных. Система "два из трех" изображается в виде трех одинаковых элементов; отказ системы наступает при отказе двух любых элементов (рис.8).

Для повышения надежности систем используется:

повышение надежности элементов;

резервирование каналов систем (параллельное соединение, И);

независимость каналов, включая их физическое разделение (исключает отказ по общей причине, в том числе диверсии);

различие, разнотипность устройств, используемых в отдельных каналах (исключая отказ по общей причине).

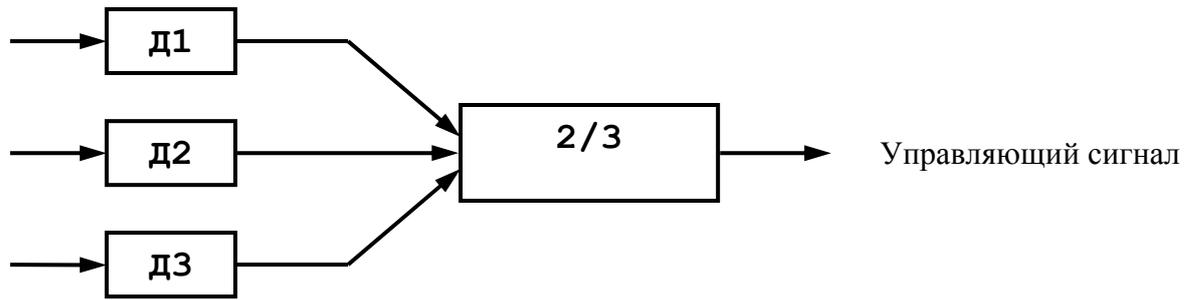


Рис.8. Формирование управляющего сигнала по логике "два из трех"

Будем считать, что показатели надежности отдельных элементов известны и что отказы элементов независимы, т.е. отказ одного любого элемента не меняет надежности остальных.

Рассмотрим систему из n последовательно соединенных элементов. Пусть $R_i(t)$ ($i=1,2,\dots,n$) - вероятность безотказной работы каждого из элементов. Вероятность безотказной работы системы из n элементов требует одновременной безотказности всех элементов, что приводит (события независимые) к выражению

$$R_C(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (8.13)$$

Если $R_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, то $\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i$.

Для последовательного соединения элементов вероятности безотказной работы умножаются, а интенсивности отказов складываются.

Поскольку $R_i(t) < 1$, безотказность системы из последовательно соединенных элементов меньше безотказности любого. Поэтому в первую очередь следует заботиться о повышении надежности наиболее неэффективного элемента.

Рассмотрим систему из n параллельно-соединенных элементов. Отказ системы наступает, если отказали все элементы системы. Это - независимые события, поэтому

$$F_C(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t), \quad (8.14)$$

где $F_i(t)$ - вероятность отказа элемента.

Отсюда

$$1 - R_C(t) = \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)),$$

$$R_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (8.15)$$

Для параллельного соединения вероятности отказа элементов перемножаются.

Из соотношений (8.14), (8.15) следует, что безотказность системы с параллельно соединенными элементами выше, чем безотказность одного элемента. С увеличением

числа элементов безотказность монотонно, но с ослабляющейся интенсивностью, растет.

Характеристики надежности, полученные в настоящем параграфе, приведены в табл.3.

8.4. Показатели надежности систем безопасности

Различают следующие показатели:

вероятность несрабатывания системы на требование - вероятность пребывания системы в неработоспособном состоянии (при наступлении сигнала на ее срабатывание);

вероятность оперативного несрабатывания - вероятность того, что система не включится в работу при поступлении сигнала на ее срабатывание или включится, но откажет на заданном интервале.

Вычислим вероятность оперативного несрабатывания для системы, которая в целях повышения ее надежности проверяется с периодичностью T . Будем считать, что отказы являются скрытыми (т.е. не диагностируются), а восстановление работоспособности - мгновенным. В момент $T+0(t)$ система работоспособна (восстановлена). Для любого интервала dt в окрестности точки t ($t, t+dt$), $t \in (0, T)$ или $t \in (T, 2T)$, полагаем одинаковой вероятностью поступления сигнала на срабатывание, которая равна dt/T . Такое предположение может казаться естественным, но может и оспариваться, однако это не имеет принципиального значения. Важно, что вероятность сигнала на срабатывание за время T известна как функция $t \in (0, T)$.

Вероятность пребывания системы в момент t в неработоспособном состоянии обозначим $V(t)$:

$$V(t) = F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \approx \lambda t (\pm (\lambda t)^2 / 2). \quad (8.16)$$

Рассмотрим вероятность несрабатывания системы на требование за период T . Для этого требуется одновременное наступление двух событий: в период dt поступает сигнал на срабатывание, в период t система становится неработоспособной. Следовательно, искомая вероятность есть произведение вероятностей событий. Чтобы учесть длительность периода T , следует выполнить интегрирование. Таким образом,

$$V(T) = \int_0^T \frac{dt}{T} \cdot V(t). \quad (8.17)$$

Принимая $V(t) = \lambda t$, получаем

$$V(T) = \int_0^T \frac{dt}{T} \cdot \lambda t = \frac{\lambda}{T} \cdot \frac{T^2}{2} = \frac{\lambda \cdot T}{2}. \quad (8.18)$$

Расчет вероятности оперативного несрабатывания требует учета как того, что за период T система может быть в неработоспособном состоянии (не сработать на требование), так и того, что после включения, в работоспособном состоянии она откажет. Вероятность работоспособного состояния системы в момент включения $(1 - V(T))$. Вероятность отказа системы за время интервала работы T_p примем равной $\lambda_p T_p$. Следовательно, вероятность системы включиться, но отказать за время T , равна $[1 - V(T)] \cdot \lambda_p T_p$ (события независимые).

Вероятность оперативного несрабатывания есть сумма $V(T)$ и последней

вероятности:

$$\begin{aligned}
 V_{O.H} &= V(T) + [1 - V(T)] \cdot \lambda_p T_p = \\
 &= \frac{\lambda T}{2} + \left(1 - \frac{\lambda T}{2}\right) \cdot \lambda_p T_p \approx \\
 &\approx \frac{\lambda T}{2} + \lambda_p T_p
 \end{aligned}
 \tag{8.19}$$

поскольку $\lambda T \ll 1$, $\lambda_p T_p \ll 1$.

Для уменьшения вероятности оперативного несрабатывания следует:

повышать безотказность элементов;

резервировать элементы и каналы систем;

обеспечивать восстановление элементов после их отказа. Эта рекомендация справедлива для защитных, локализирующих, обеспечивающих, управляющих систем, равно как и подсистем нормальной эксплуатации.

Показатели надежности некоторых элементов систем безопасности приведены в приложении 2.

Таблица 3

Характеристики надежности элемента с экспоненциальным распределением наработки до отказа и простейших систем.

Объект	Характеристика надежности	Обозначение	Формула для вычисления
1	2	3	4
Элемент	Вероятность отказа на интервале (0, t)	F(t)	$1 - \exp(-\lambda t)$
	Вероятность безотказной работы на интервале (0, t)	R(t)	$\exp(-\lambda t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$	λ
	Средняя наработка до отказа	$\bar{\theta}$	$1/\lambda$
Система с последовательным соединением элементов	Вероятность отказа на интервале (0, t)	$F_c(t)$	$\approx \sum_i F_i(t)$
	Вероятность безотказной работы на интервале (0, t)	$R_c(t)$	$\prod_i R_i(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda_c(t)$	$\sum_i \lambda_i(t)$
Система с параллельным соединением невосстанавливаемых элементов	Вероятность отказа на интервале (0, t)	$F_c(t)$	$\prod_i F_i(t)$
	Вероятность безотказной работы на интервале (0, t)	$R_c(t)$	$1 - \prod_i F_i(t)$

9. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

9.1. Повышение безотказности элементов

Для повышения надежности системы следует повышать безотказность входящих в нее элементов. Если в системе присутствует несколько элементов, то повышение их безотказности должно быть согласовано таким образом, чтобы результирующий эффект был наибольшим и достигался с наименьшими затратами.

Влияние безотказности элементов на надежность системы рассмотрим на примере анализа вероятности оперативного несрабатывания дизель-генераторной станции (ДГС). ДГС станция включает три дизель-генератора (ДГ), работающих параллельно на потребителей аварийного энергоснабжения. Каждому ДГ свойственны отказы двух видов: отказ на запуск и отказ при работе. Отказы независимы. Отказ на запуск характеризуется частотой q , отказы при работе - интенсивностью отказов λ на интервале T_p . Для работы потребителей достаточно одного ДГ.

Для анализа надежности ДГС построим функционально-логическую схему станции (рис.9) и дерево отказов, соответствующее этой схеме (рис.9).

С учетом видов отказов ДГ вероятность оперативного несрабатывания каждого из них

$$V_{o.ni} \cong (q + \lambda T_p)_i \quad (9.1)$$

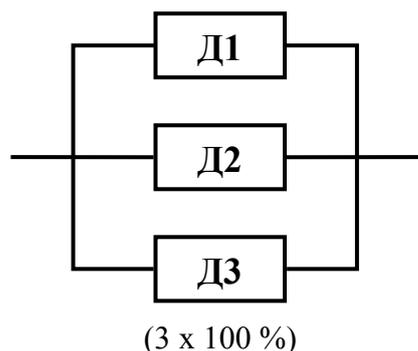
Вероятность оперативного несрабатывания ДГ станции

$$\begin{aligned} V_{o.n.c} &= \prod_{i=1}^3 (q + \lambda T_p)_i = (q + \lambda T_p)^3 = \\ &= q^3 + 3q^2 \lambda T_p + 3q(\lambda T_p)^2 + (\lambda T_p)^3 = \\ &= \sum_{i=0}^3 \binom{3}{i} q^i (\lambda T_p)^{3-i} \end{aligned} \quad (9.2)$$

Физический смысл последней формы записи в (9.2) очевиден: отказ ДГС может произойти при отказе или трех ДГ на запуске, или двух ДГ на запуске и одного ДГ в работе (таких сочетаний - три), или одного ДГ на запуске и двух ДГ в работе (таких сочетаний тоже три), либо при отказе всех трех ДГ в работе.

Рассмотрим вопрос об оптимальном выборе значений q и λT_p для уменьшения значения $V_{o.n.c}$. Зависимость $V_{o.n.c}$ от величины q и $\lambda T_p/q$ демонстрирует рис.10.

Анализ рис.10 позволяет сделать вывод, что значения q и λT_p должны быть одного порядка и, насколько возможно, малыми.



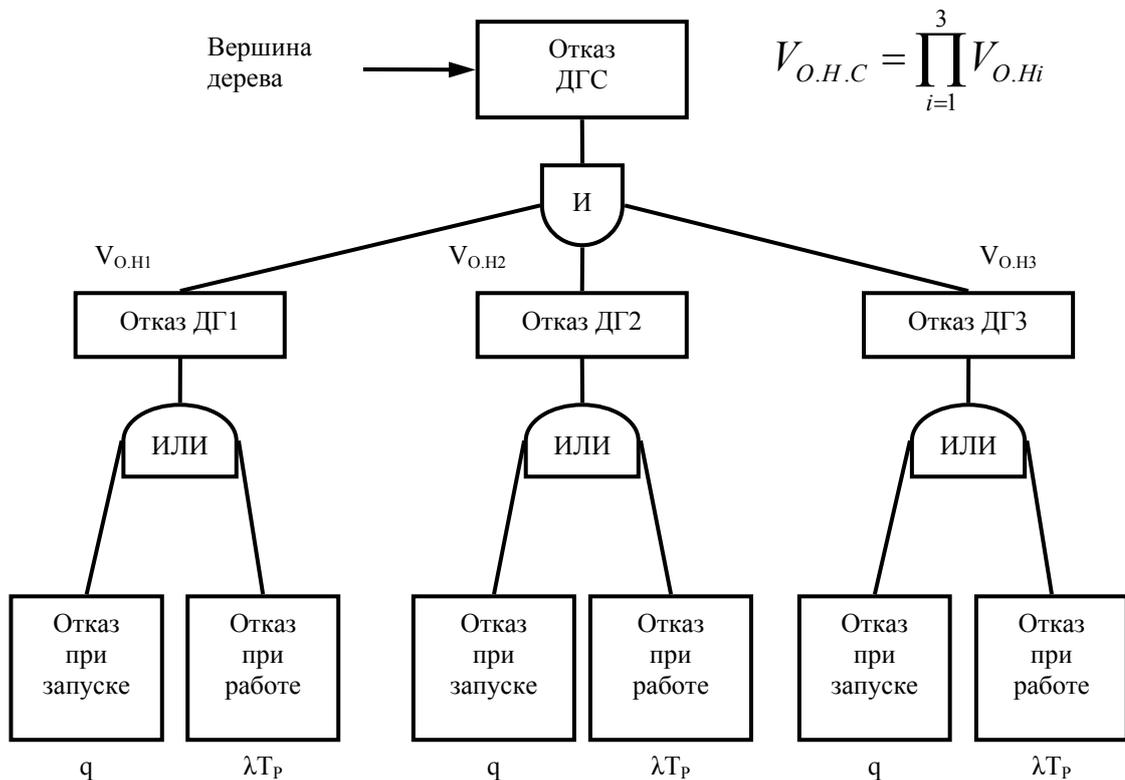


Рис.9. Функционально-логическая схема ДГ станции (δ) и дерево отказов ДГ станции (δ)

9.2. Структурное резервирование. Резерв n - m.

Для повышения надежности системы можно использовать резервные элементы (каналы) в структуре системы. Элементы или каналы должны быть независимыми. Под кратностью резервирования понимают отношение числа элементов (каналов), необходимых для выполнения функции, к общему числу элементов (каналов). Типичные примеры резервируемых систем: 2x100 %, 3x100 %, 3x50 %, 4x50 %, где первая цифра означает число элементов (каналов), а вторая -долю каждого из них в выполнении функций системы. Кратности резервирования в приведенных примерах 1/2, 1/3, 2/3, 2/4, т.е. в резерве находятся соответственно 1, 2, 1, 2 элемента (канала).

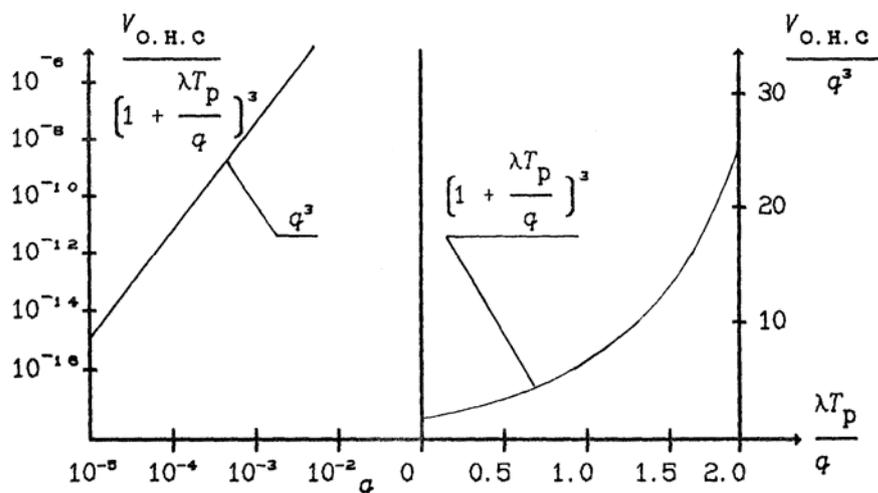


Рис.10. Влияние параметров $q(\)$ и $\lambda(\)$ на вероятность оперативного несрабатывания ДГС

Рассмотрим систему, которая включает n независимых каналов, а для выполнения предписанных функций необходимо m каналов ($m < n$, $n-m$ -резервное число каналов). Модель надежности системы: на интервале $(0, T)$ между проверками интенсивность скрытых отказов равна λ_c , интенсивность ложных срабатываний λ_n . Эти отказы независимы. В момент T проверка работоспособности и восстановление работоспособности протекают мгновенно. Требование на срабатывание системы может поступить с равной вероятностью в любой момент $t \in (0, T)$.

При запуске канала системы в работу интенсивность отказов равна λ_p на интервале работы T . Ремонт и восстановлений при работе не проводится.

Получим выражение для оперативного несрабатывания системы "m из n" и вероятности ложного срабатывания системы.

Система отказывает, если число отказавших каналов больше числа резервных, т.е. равно $n - m + 1, n - m + 2, \dots, n - m + m = n$. Каждый из отказавших каналов может отказать или вследствие отказа при запуске, или вследствие отказа при работе.

Вероятность отказа k каналов из n описывается биномиальным распределением:

$$\begin{aligned}
 P_n(X = k) &= \binom{n}{k} \cdot q^k \cdot (1-q)^{n-k} \\
 P_n(X = n - m + 1) &= \binom{n}{n - m + 1} \cdot q^{n-m+1} \cdot (1-q)^{m-1} \\
 \text{или} \quad & \vdots \\
 P_n(X = n) &= \binom{n}{n} \cdot q^n \cdot (1-q)^0
 \end{aligned} \tag{9.3}$$

Поскольку логическая связь отказов $n-m+1, n-m+2, \dots, n$ каналов определяется союзом ИЛИ (последовательное соединение отказов), то вероятность их совместного наступления, т.е. вероятность оперативного несрабатывания, приблизительно равна (в силу их малости) сумме отказов:

$$\begin{aligned}
 V_{o.n.c} &= \sum_{i=n-m+1}^n P_n(X = i) = \\
 &= \sum_{i=n-m+1}^n \binom{n}{i} \cdot q^i \cdot (1-q)^{n-i}
 \end{aligned} \tag{9.4}$$

Рассмотрим отказ при запуске. В этом случае вероятность требования на запуск равна dt/T , а вероятность отказа в момент t

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda_c t) \approx \lambda_c t \equiv q \tag{9.5}$$

Следовательно,

$$V_{отк.з}(t) = \sum_{i=n-m+1}^n \binom{n}{i} \cdot (\lambda_c t)^i \cdot (1 - \lambda_c t)^{n-i} \tag{9.6}$$

Поскольку $\lambda_c t \ll 1$, в последнем выражении можно сохранить лишь главный член:

$$V_{\text{ОТК.З}}(t) \square \binom{n}{n-m+1} \cdot (\lambda_c t)^{n-m+1} \quad (9.7)$$

Вероятность несрабатывания на требование при запуске за период (0, T) будет, следовательно,

$$\begin{aligned} V_{\text{ОТК.З}}(T) &= \int_0^T \frac{dt}{T} \cdot V_{\text{ОТК.З}}(t) = \\ &= \int_0^T \binom{n}{n-m+1} \frac{\lambda_c^{n-m+1} \cdot t^{n-m+1}}{T} dt = \binom{n}{n-m+1} \cdot \frac{(\lambda_c T)^{n-m+1}}{n-m+2} \end{aligned} \quad (9.8)$$

Рассмотрим теперь совместно отказы при запуске и при работе ($\lambda_p T_p$). Для отказа системы должно отказать $n-m+1$ каналов. Отказ большего числа каналов ($n-m+2, \dots, n$) дает малый вклад в вероятность отказа и поэтому не учитывается. Отказ $n-m+1$ канала может произойти, если все каналы отказали при запуске или при запуске отказал $n-m$ канал, а еще один - в работе, и т.д. Вероятность отказа при запуске i каналов из n

$$V_{\text{ОТК.З}}(T) = \binom{n}{i} \cdot \frac{(\lambda_c T)^i}{i+1}, \quad (9.9)$$

$$0 \leq i \leq n-m+1.$$

Вероятность отказа при работе ($n-m+1-i$) каналов из оставшихся $n-i$:

$$V_{\text{ОТК.Р}}(T_p) = \binom{n-i}{n-m+1-i} \cdot (\lambda_p T_p)^{n-m+1-i} \quad (9.10)$$

Последнее выражение записано с учетом следующих предпосылок:

отказы запустившихся в работу $n-i$ каналов есть дискретная случайная величина, описываемая биномиальным распределением;

отказ системы из-за отказов работающих каналов наступает, если общее число отказавших каналов становится равным $n-m+1$; если не запустилось i каналов, то при работе "должно" отказать $n-m+1-i$ каналов.

Оперативное несрабатывание системы имеет место, если при запуске отказывает i каналов, а при работе отказывают и остальные $n-m+1-i$ каналов. Таким образом, события отказов соединены логически параллельно и вероятность оперативного несрабатывания равна произведению вероятностей:

$$\begin{aligned} V_{\text{О.Н.С}} &= V_{\text{ОТК.З}}(T) \cdot V_{\text{ОТК}}(T_p) = \\ &= \sum_{i=0}^{n-m+1} \binom{n}{i} \frac{(\lambda_c T)^i}{i+1} \cdot \binom{n-i}{n-m+1-i} \cdot (\lambda_p T_p)^{n-m+1-i} \end{aligned} \quad (9.11)$$

Знаком суммы в последнем выражении учитывается возможный диапазон изменения i и логически последовательное (ИЛИ) соединение вероятностей с различными значениями i .

Нетрудно видеть, что вероятность ложного срабатывания m элементов из n

$$P_{\text{л}}(X = m) \cong \binom{n}{m} \cdot (\lambda_{\text{л}} T)^m \quad (9.12)$$

9.3. Структурное резервирование. Резерв - один канал

Рассмотрим системы с $n=3$ и 4 с $m=2$ и 3 . Эти системы отвечают принципу единичного отказа и выполняют свои функции при отказе канала.

Рассмотрим системы, предназначенные для подвода теплоносителя в первый контур при течи теплоносителя. Пусть $n=4$, $m=3$. Рассмотрим разрыв ГЦТ и трубопровода подвода теплоносителя. Детерминистский анализ показывает, что в случае разрыва ГЦТ, в реактор должен быть подан теплоноситель из трех каналов. Если разрывается трубопровод подвода теплоносителя одного из каналов, то в реактор достаточно подать теплоноситель из двух каналов (малая течь).

Определим вероятность несрабатывания на требование:

$$V_{\text{отк.3}}(T) = \binom{n}{n-m+1} \cdot \frac{(\lambda_c T)^{n-m+1}}{n-m+2}$$

если $n=4$, $m=3$, то

$$V_{\text{отк.3}}(T) = \binom{4}{2} \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3} = 6 \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3}; \quad (9.13)$$

если $n=3$, $m=2$, то

$$V_{\text{отк.3}}(T) = \binom{3}{2} \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3} = 3 \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3}; \quad (9.14)$$

Важно отметить, что при уменьшении n и $n-m=1$ вероятность отказа уменьшается. Это важный результат. В общем случае:

если n , $m=n-1$, то

$$V_{\text{отк.3}}(T) = \binom{n}{2} \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3} = \frac{n!}{(n-2)!2!} \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3} = \frac{n(n-1)}{2} \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3}; \quad (9.15)$$

если $n=2$, $m=1$, то

$$V_{\text{отк.2}} = \frac{(\lambda T)^2}{3} \quad (9.16)$$

и, следовательно,

$$\frac{V_{\text{отк.3}}}{V_{\text{отк.2}}} \cong \frac{V_n}{V_2} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (9.17)$$

Вид последней зависимости представлен на рис.11. Из нее следует, что

увеличивать число каналов, если $n-m=1$ (в резерве - один канал) нецелесообразно. Вариант $n=2, m=1$ неприемлем, так как при разрыве тракта подвода не выполняется принцип единичного отказа. Допустимо иметь $n=3, m=2$. Однако, если принято решение подводить воду в активную зону сверху и снизу, то $n=4$.

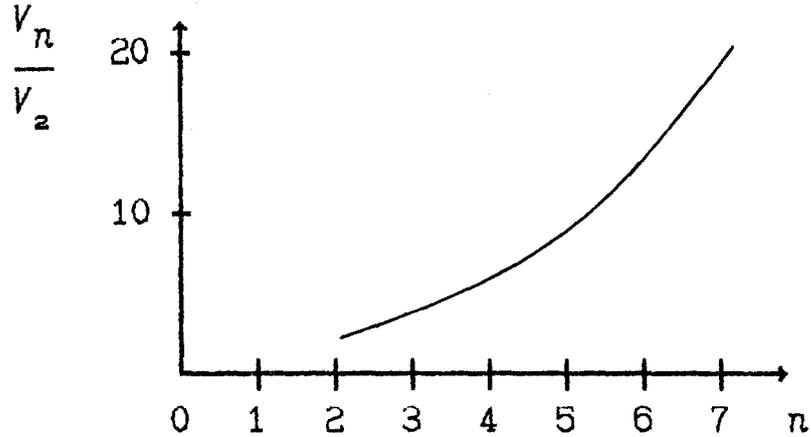


Рис.11. Отношение вероятности несрабатывания на требование системы с n каналами к системе с двумя каналами

Если вероятность несрабатывания системы с $n-m=1$, если вероятность разрыва ГЦТ $ж_{ГЦТ}$ и вероятность разрыва подводящего трубопровода $ж_{ТР}$, то вероятность несрабатывания системы с $n-m=1$

$$V_{O.H.II} = ж_{ГЦТ} \cdot \frac{n(n-1)}{2} \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3} + ж_{ТР} \cdot \frac{n(n-1)(n-2)}{2} \cdot \frac{(\lambda T)^2}{3} \quad (9.18)$$

9.4. Резервирование управляющих систем

Для УСБ существенное значение имеют:

функциональный отказ, т.е. отказ на требование, при котором УСБ должна выполнить некоторую ФБ;

ложное срабатывание, формирование сигнала на выполнение ФБ при отсутствии требования на действие УСБ.

Будем рассматривать модель УСБ, в которой отказы подчиняются экспоненциальному распределению с параметрами λ_{ϕ} и $\lambda_{л}$ соответственно. Каналы УСБ проверяются через промежуток времени T , работоспособность каналов при этом мгновенно восстанавливается. Сигнал на требование в любой момент $t \in (0, T)$ имеет одинаковую вероятность. При этих предпосылках вероятность отказа на требование

$$V = \frac{\lambda_{\phi} T}{2} \quad (9.19)$$

а вероятность ложного срабатывания

$$P_{л} = \lambda_{л} T \quad (9.20)$$

Для снижения вероятности функционального отказа естественно применить параллельное соединение каналов. Однако при этом вероятность ложного срабатывания даже возрастает: ложное срабатывание любого из параллельно соединенных каналов вызывает ложное срабатывание системы (последовательное

соединение).

Для уменьшения вероятности ложного срабатывания приемлемо последовательное соединение каналов, в этом случае для ложного срабатывания должно произойти ложное срабатывание двух каналов одновременно (т.е. соединение является параллельным в логике ложных сигналов).

Отмеченная противоречивость привела к резервированию УСБ с использованием структурно-логических схем типа "m из n", когда для формирования как функционального, так и ложного сигнала должно наступить совпадение m. сигналов каналов УСБ из их общего числа n.

Простейшим примером структурно-логической схемы такого вида является система "два из трех", которая удовлетворяет принципу единичного отказа по отношению к ложному срабатыванию. Система "один из двух" таким качеством не обладает.

Вероятность функционального отказа для системы "m из n"

$$V = \binom{n}{n-m+1} \cdot \frac{(\lambda_{\phi}T)^{n-m+1}}{n-m+2} \quad (9.21)$$

а вероятность ложного срабатывания для той же системы

$$P_{л} = \binom{n}{m} \cdot (\lambda_{л}T)^m \quad (9.22)$$

Значения V и P_л для систем "два из трех", "один из двух" и канала УСБ приведены в табл.4.

Таблица 4

Сравнение вероятностей отказов УСБ

Вероятности отказов	Система		
	"Два из трех"	"Один из двух"	Канал УСБ
Функционального V	$(\lambda_{\phi}T)^2$	$\frac{(\lambda_{\phi}T)^2}{3}$	$\frac{\lambda_{\phi}T}{2}$
Ложного срабатывания P _л	$3(\lambda_{л}T)^2$	$2(\lambda_{л}T)$	$\lambda_{л}T$

Из таблицы видно, что для системы "два из трех" увеличивается вероятность функционального отказа по сравнению с системой "один из двух" (уменьшается доля резервных каналов с 1/2 до 1/3). Но для системы "два из трех" снижается вероятность ложного срабатывания в $(3/2)(\lambda_{л}T)$ раз по сравнению с вероятностью ложного срабатывания для системы "один из двух". Типичные значения $\lambda_{\phi} = \lambda_{л} \sim 10^{-8}$ 1/ч, T=720 ч (30 суток) дают значение $\lambda_{л}T \sim 10^{-2}$, т.е. вероятность ложного срабатывания для системы "два из трех" уменьшается на два порядка.

9.5. О влиянии масштаба резервирования

Для повышения надежности системы может быть использован подход, заключающийся в резервировании каналов, т.е. частей системы, включаемых логически параллельно и служащих для выполнения идентичных функций. Единицей (масштабом) резервирования в этом случае является канал.

Однако, используя элементы, входящие в состав каналов системы, можно резервировать каждый элемент и соединять резервируемые элементы последовательно. Такое соединение элементов в системе называется коллекторным, поскольку функции идентичных элементов выполняются, если функционирует объединяющий их элемент - "коллектор".

Структурно-логические схемы канального и коллекторного вариантов системы с использованием одинакового количества элементов приведены на рис. 12, а и б.

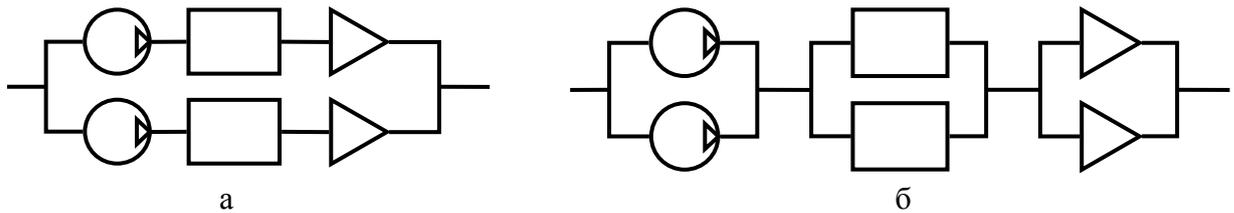


Рис.12. Канальное (а) и коллекторное (б) резервирование систем

Если отказы элементов имеют вероятность q_{ij} , где i - индекс функционального элемента, j - его кратность в системе, то вероятность отказа канальной системы (см. рис. 12,а)

$$V_{КАН} \cong \prod_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n q_{ij} \right), \quad (9.23)$$

где n - число элементов в канале; k - число каналов в системе.

При той же вероятности отказов элементов вероятность отказа коллекторной системы (см.рис. 12,б)

$$V_{КОЛ} \cong \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^k q_{ij} \right), \quad (9.24)$$

где n - число функциональных элементов; k - кратность использования элементов.

Нетрудно видеть, что $V_{КАН} > V_{КОЛ}$:

$$\begin{aligned} \prod_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n q_{ij} \right) &= \prod_{j=1}^k (q_{1j} + q_{2j} + \dots + q_{nj}) = \\ &= (q_{11} + \dots + q_{n1}) \cdot \dots \cdot (q_{1k} + \dots + q_{nk}); \end{aligned} \quad (9.25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^k q_{ij} \right) &= \sum_{i=1}^n (q_{i1} \cdot q_{i2} \cdot \dots \cdot q_{ik}) = \\ &= (q_{11} \cdot q_{12} \cdot \dots \cdot q_{1k}) + (q_{21} \cdot q_{22} \cdot \dots \cdot q_{2k}) + \dots + (q_{n1} \cdot q_{n2} \cdot \dots \cdot q_{nk}). \end{aligned} \quad (9.26)$$

Следовательно,

$$\prod_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n q_{ij} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^k q_{ij} \right) + \sum_{\substack{l=p, \dots, l=j \\ l, p, \dots, j=1}}^n (q_{l1} \cdot q_{p2} \cdot \dots \cdot q_{jk}) \quad (9.27)$$

откуда и следует искомое неравенство, так как в силу $q_{ij} > 0$, последний член > 0 .

Если $n=3$, $k=2$, $q_{ij}=q$, то

$$V_{КАН} = \prod_1^2 \left(\sum_1^3 q \right) = (3q)^2 = 9q^2 \quad (9.28)$$

$$V_{КОЛ} = \sum_1^3 \left(\prod_1^2 q \right) = 3q^2 \quad (9.29)$$

$$V_{КАН} = 3V_{КОЛ} \quad (9.30)$$

Однако таким результат будет, только если не учитывать возможные отказы коллекторов (считая их малыми).

9.6. Роль свойства самозащищенности реакторной установки

Свойство самозащищенности РУ за счет благоприятных обратных связей и динамических свойств дает персоналу резерв времени для управления процессами, что существенно уменьшает значение вероятности отказа.

Продемонстрируем это на примере системы, имеющей электроуправляемую арматуру, систему управления работой арматуры (УС) и допускающей ручное открытие арматуры персоналом. Свойства самозащищенности определяют резерв времени (около часа), в течение которого оператор (в случае неисправности системы управления) может воздействовать на арматуру, обеспечивая тем самым выполнение ФБ системы.

Схема рассматриваемой системы приведена на рис.13. Арматура не восстанавливается до проверки, проводимой через время T . Интенсивность отказов арматуры λ . Вероятность отказа управляющей системы - q . Оператор действует безошибочно.

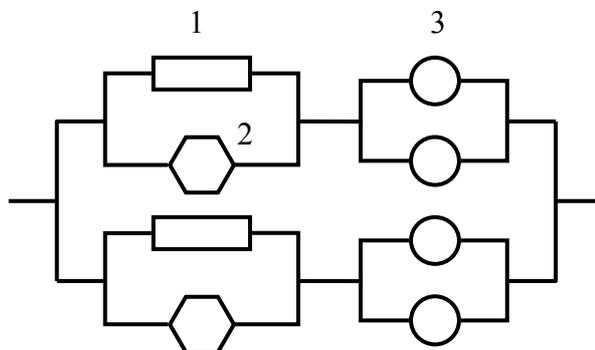


Рис.13. Структурно-логическая схема системы

1 - управляющая система, 2 - работа персонала, 3 - арматура.

Вероятность отказа системы без учета роли оператора определяем по логике ДО (рис.14).

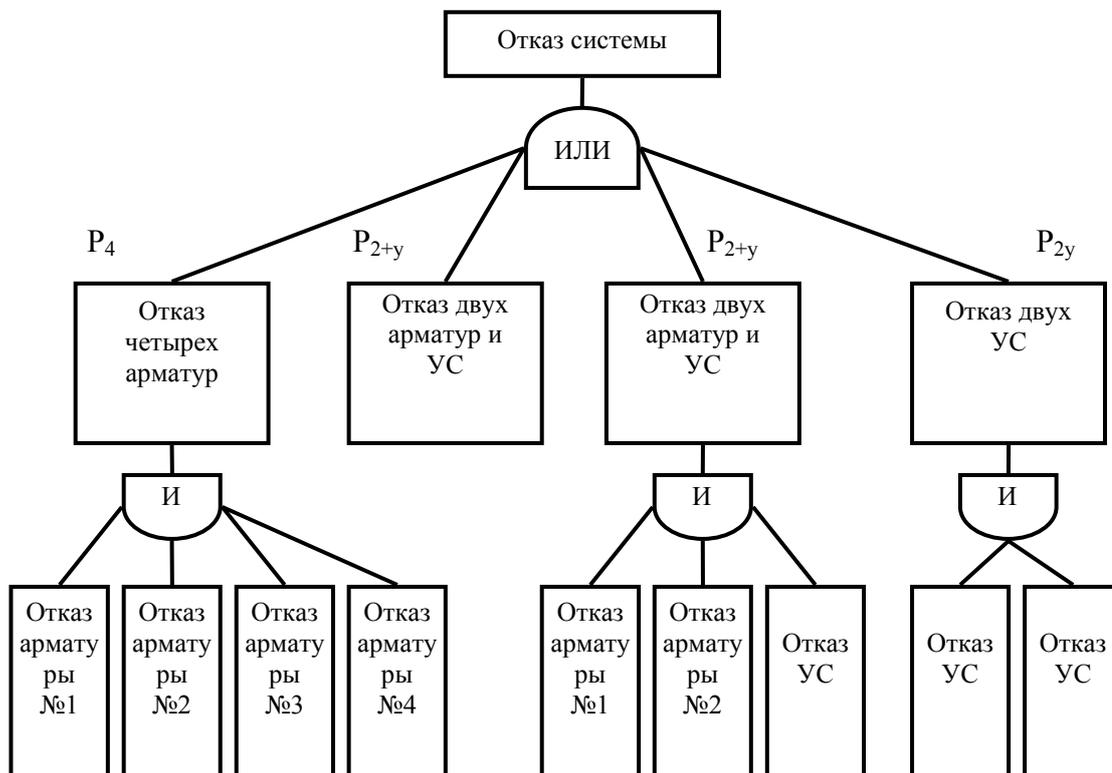


Рис.14. Дерево отказов

Вероятность отказа четырех арматур, двух арматур и управляющей системы, а также двух управляющих систем составляет:

$$P_4(t) = (\lambda t)^4 \rightarrow P_4(T) = \int_0^T \frac{dt}{T} (\lambda t)^4 = \frac{(\lambda T)^4}{5}, \quad (9.31)$$

$$P_{2+y}(t) = (\lambda t)^2 \cdot q \rightarrow P_{2+y}(t) = \int_0^T \frac{dt}{T} (\lambda t)^2 \cdot q = \frac{(\lambda T)^2}{3} \cdot q$$

$$P_{2y} = q^2$$

Следовательно, вероятность отказа

$$V = \frac{(\lambda T)^4}{5} + 2 \frac{(\lambda T)^2}{3} \cdot q + q^2 \quad (9.32)$$

Учет роли оператора эквивалентен отсутствию отказа управляющей системы: $q = 0$. Поэтому

$$V_{оп} = \frac{(\lambda T)^4}{5} \quad (9.33)$$

Для типичных значений $\lambda = 10^{-8}$ 1/ч, $T = 8 \cdot 10^3$ ч, $q = 10^{-2}$

$$V = \frac{(8 \cdot 10^{-2})^4}{5} + \frac{2}{3}(8 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 10^{-2} + 10^{-4} \cong 15 \cdot 10^{-5}.$$

$$V_{оп} = \frac{(8 \cdot 10^{-2})^4}{5} = 819 \cdot 10^{-8} \approx 0.8 \cdot 10^{-5}.$$

Значения вероятностей различаются более чем на порядок.

10. ОТКАЗЫ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ

10.1. Классификация отказов по общей причине

Отказы по общей причине - отказы нескольких элементов в одной или разных системах, возникающие в результате одного исходного события, отказа одного устройства или ошибки в процессе создания, эксплуатации системы.

Отказы по общей причине есть следствие общности:

места расположения, условий работы;

вспомогательных систем (управляющих, обеспечивающих);

способов технического обслуживания, проверок, ремонтов;

конструктивных и технологических решений, используемых материалов.

Указанные общности могут быть основой классификации отказов по общей причине, приведенной в табл.5.

Приведенная классификация свидетельствует, в частности, что отказы по общей причине могут быть связаны с любым этапом жизненного цикла системы (установки). Износ системы является примером отказа по общей причине, поэтому предусматривается своевременная замена важного для безопасности оборудования до наступления периода старения.

Системное исследование путей развития аварии с использованием "дерева событий" проводится с учетом отказов по общей причине, как обусловленных исходным событием; так и возникающих в процессе развития аварии.

10.2. Отказы по общей причине вследствие исходного события

Землетрясение может быть причиной многочисленных отказов оборудования и систем. Поэтому все сооружения, оборудование и системы проектируются стойкими к максимальному расчетному землетрясению, балльность которого зависит от места расположения АС.

Падение самолета, воздействие ударной волны на АС аналогично землетрясению, но характеризуется значительным разрушением части установки, возможностью начала пожара. Защитная оболочка или железобетонная шахта, другие сооружения и конструкции АС, разнесение каналов систем безопасности в пространстве служат цели снижения вероятности значительного разрушения, потери управления установкой.

Пожар является одним из наиболее опасных источников отказов по общей причине (интенсивность пожаров около 10^{-1} 1/год). Наиболее вероятны пожары в

системе газоудаления, масляных системах, системе электрических кабелей, на дизель-генераторах, трансформаторах, угольных фильтрах. Источниками пожаров являются взрыв газа, короткое замыкание в системе кабелей, попадание масла на горячие участки оборудования, неосторожность в обращении с открытым огнем при ремонтах.

Для защиты от пожаров предусматриваются три уровня защиты:

предотвращение возникновения;

быстрое обнаружение и ликвидация;

пожаробезопасное исполнение систем и оборудования.

Отказы по общим причинам могут быть связаны также:

со взрывом водорода;

с образованием летящих предметов, струй воды и пара при разгерметизации оборудования и трубопроводов;

затоплением, запариванием помещений, обусловленными разгерметизацией сосудов, трубопроводов.

Для исключения взрывоопасных концентраций водорода применяются дожигатели водорода, вентиляция помещений. Динамическое воздействие предметов и струй учитывается при размещении важных для безопасности систем и оборудования. Отвод воды и пара в системы локализации является мерой, снижающей опасность затопления и запаривания важных для функционирования СБ помещений.

Анализ ДС предусматривает выявление всех зависимых от исходного события отказов.

10.3. Зависимые отказы в процессе аварии

Сценарий аварии предполагает исследование воздействия аварии на барьеры безопасности. Особое внимание следует уделить возможности воздействия аварии на несколько барьеров безопасности.

Например, разгерметизация системы первого контура является нарушением этого барьера безопасности. В то же время такая авария может привести к перегреву и разгерметизации оболочек твэлов, даже плавлению топлива, а также создает опасность разрушения локализирующих систем АС, т.е. создает опасность для двух других барьеров. Чтобы исключить зависимые отказы, требуется создание соответствующих СБ, организующих надлежащую защиту барьеров безопасности.

Другим примером зависимых отказов является отказ активной системы аварийного охлаждения реактора и активной системы снижения давления в защитной оболочке при отказе системы надежного электроснабжения.

Множественные зависимые отказы могут быть следствием ошибок персонала. Наиболее опасные ошибки:

блокировка аварийного сигнала при срабатывании СБ;

неподключение СБ после технического обслуживания или ремонта;

преждевременное отключение СБ.

Устранение отказов по общей причине требует введения специальных мер. Важнейшими из них являются следующие:

физическое разделение каналов системы с размещением их в отдельных

помещениях;

разработка оборудования, трубопроводов с необходимыми запасами прочности;

канальное исполнение как защитных, так и необходимых для их функционирования обеспечивающих и управляющих систем (каналы не будут иметь общих элементов);

применение каналов различного принципа действия, включаемых по сигналу устройств различной физической природы, организация их проверки, ремонта, обслуживание с привлечением различных, в том числе приглашаемых извне, исполнителей. Проверка каналов должна производиться без ввода дополнительных связей в систему.

10.4. Количественные характеристики отказов по общей причине

Способ количественного учета отказов по общей причине основан на предположении, что система, содержащая однотипные элементы, может выходить из строя вследствие независимых, двойных, тройных отказов. Интенсивность двойных и тройных отказов выражается в долях от интенсивности независимого отказа. Если λ - интенсивность независимого отказа, то интенсивность двойных отказов $\delta_2\lambda$, а тройных $\delta_3\lambda$, Суммарная интенсивность отказов

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda + \delta_2\lambda + \delta_3\lambda = \lambda \cdot (1 + \delta_2 + \delta_3) \quad (10.1)$$

Согласно имеющимся опытным данным δ_2 и δ_3 не превышают 0,1 и 0,01. Эти предельные значения используются, если нет более точных данных, для оценки роли отказов по общей причине. Приведем примеры такого учета отказов.

Выполним оценку вероятности отказа системы из трех ДГ, если для выполнения функций достаточно одного ДГ. Предполагается, что вероятность незапуска любого одного ДГ $q = 3 \cdot 10^{-2}$, а на один независимый отказ приходится 10^{-1} двойных и 10^{-2} тройных отказов.

Отказ системы произойдет в следующих случаях:

откажут (независимо) три ДГ (q^3);

откажут два ДГ и одновременно отказ одного ДГ будет двойным (вероятность двойного отказа $q\delta_2$, вероятность отказа трех ДГ - $q^2\delta_2 \cdot 3$, так как число сочетаний из "трех по два" равно 3);

откажет один ДГ, и этот отказ будет тройным ($q\delta_3 \cdot 3$).

Рассмотренные события связаны логикой ИЛИ, т.е. логически последовательны. Поэтому вероятность отказа системы из трех ДГ равна сумме рассмотренных вероятностей:

$$\begin{aligned} V_{O.H.C} &= q^3 + 3 \cdot q^2 \cdot \delta_2 + 3 \cdot q \cdot \delta_3 = (3 \cdot 10^{-2})^3 + 3 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0.1 + \\ &+ 3 \cdot (3 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^{-2} = 27 \cdot 10^{-6} + 27 \cdot 10^{-5} + 90 \cdot 10^{-5} = \\ &= 120 \cdot 10^{-5} = 12 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (10.2)$$

Из полученных значений, составляющих вероятности отказа системы, видна определяющая роль тройных и двойных отказов, если вероятность независимых отказов достаточно мала.

Рассмотрим вероятности оперативного несрабатывания системы, построенной по

канальному и коллекторному принципам, полагая, что у всех разнотипных элементов каналов (коллекторов) вероятности отказов одинаковы и равны q , в канальной системе $\delta_2=0$, а в коллекторной $\delta_2=10^{-1}$. Схемы системы приведены на рис.12.

Отказ канальной системы произойдет, если откажут оба канала:

$$V_{КАН} = (3 \cdot q)^2 + 3 \cdot q \cdot \delta_2' \quad (10.3)$$

Первое слагаемое характеризует вероятность независимых отказов, второе - двойных.

Отказ коллекторной системы - отказ любого из "коллекторов":

$$V_{КОЛ} = 3 \cdot q^2 + 3 \cdot q \cdot \delta_2 \quad (10.4)$$

Если $q = 10^{-2}$, то

$$V_{КАН} = 9 \cdot 10^{-4},$$

$$V_{КОЛ} = 3 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} = 3 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-3} = 33 \cdot 10^{-4}$$

Таблица 5

Классификация отказов по общей причине

Причина отказов	Воздействующий фактор
1	2
Общность места расположения и условий работы	Условия окружающей среды: температура, давление, влажность, вибрации, отложения, коррозия, эрозия, радиация, статическое электричество. Внешние и внутренние воздействия: землетрясение, падение самолета, ударная волна, гидравлический удар, затопление, воздействие струи пара, воды, летящих предметов, взрыв водорода, пожар.
Зависимость от общей системы (элемента)	Отказ общей системы (элемента)
Общность способов наладки технического обслуживания, проверок работоспособности, ремонтов, дистанционного управления системами	Недостатки эксплуатационных инструкций и некачественное выполнение обслуживания, ремонта Ошибки эксплуатационного персонала: неправильные действия или пропуск действия; связанные с недостатком информации
Общность конструкции	Недостаточность знаний о процессах в установке, приводящая к снижению эффективности системы Ошибка в конструкции, связанная с несогласованностью узлов, выполненных в различных организациях; использованием материалов недостаточного качества Ошибка в технической документации Недостатки процесса изготовления: пропуск дефекта изготовления; недостаточный объем проверок и испытаний; воздействие окружающей среды

Таким образом, при учете двойных отказов вероятность оперативного несрабатывания коллекторной системы более чем в три раза выше, чем у канальной при отсутствии в последней зависимых отказов однотипных элементов.

Рассмотрим канальную систему "один из двух". Определим вероятность отказа на требование, если каналы независимы (интенсивность отказа канала λ , а время работы T) и если интенсивность двойных отказов равна $\delta_2 \cdot \lambda$.

Для независимых отказов вероятность отказа системы "один из двух" равна $(\lambda \cdot T)^2 / 3$.

Для системы с интенсивностью отказов $\delta_2 \lambda$ вероятность отказа равна $\delta_2 \cdot (\lambda \cdot T / 2)$.

Вероятность отказа на требование

$$V = \frac{(\lambda \cdot T)^2}{3} + \delta_2 \cdot \frac{\lambda \cdot T}{2} \quad (10.5)$$

Пусть $\lambda = 10^{-5}$ 1/ч, $T = 0,72 \cdot 10^3$ ч, $\delta_2 = 10^{-1}$. Тогда

$$\begin{aligned} V &= \frac{(10^{-5} \cdot 0,72 \cdot 10^3)^2}{3} + 10^{-1} \cdot \frac{10^{-5} \cdot 0,72 \cdot 10^3}{2} = \\ &= \frac{0,52 \cdot 10^{-6}}{3} + 0,36 \cdot 10^{-4} = 0,17 \cdot 10^{-6} + 0,36 \cdot 10^{-4} = 0,36 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Видно, что исключение зависимых отказов повышает надежность системы на порядок.

11. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ.

11.1. Восстановление работоспособности в режиме ожидания.

Постоянно контролируемые элементы с выявляемыми отказами

Рассмотрим элемент, все отказы которого выявляемы. Будем считать, что система диагностики отказов "абсолютно надежна". Интенсивность отказов равна λ . Среднее время восстановления элемента после обнаруженного отказа равно T_B (включая подготовку к ремонту и проведение ремонта) и распределено по экспоненциальному закону с параметром интенсивности восстановления $\mu = 1/T_B$.

Изменение состояния элемента в рассматриваемых условиях описывается системой уравнений однородного марковского процесса:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{РАБ}(t)}{dt} &= -\lambda \cdot P_{РАБ}(t) + \mu \cdot P_{ОТК}(t), \\ \frac{dP_{ОТК}(t)}{dt} &= -\lambda \cdot P_{РАБ}(t) - \mu \cdot P_{ОТК}(t), \end{aligned} \quad (11.1)$$

где $P_{РАБ}(t)$ - вероятность нахождения элемента в работоспособном состоянии; $P_{ОТК}(t)$ - вероятность нахождения элемента в состоянии отказа.

Граф переходов элемента между работоспособным и неработоспособным

состояниями иллюстрирует рис.15.

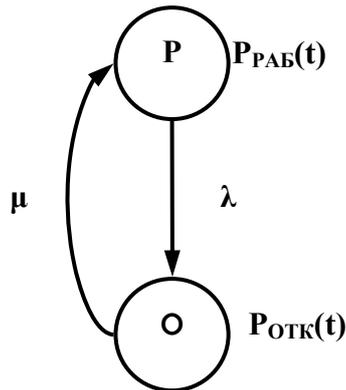


Рис. 15. Переходы для постоянно контролируемого элемента; P - работоспособное состояние, O - отказ

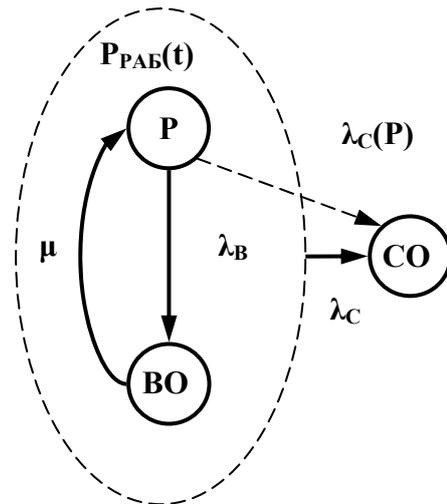


Рис.16. Переходы для элемента, подверженного выявляемым (BO) и скрытым (CO) отказам

С учетом очевидного равенства

$$P_{РАБ}(t) + P_{ОТК}(t) = 1 \quad (11.2)$$

система уравнений однородного марковского процесса может быть сведена к одному уравнению:

$$\frac{dP_{ОТК}(t)}{dt} = -(\lambda + \mu)P_{ОТК}(t) + \lambda \quad (11.3)$$

При начальном условии $P_{ОТК}(t=0) = 0$ решение последнего уравнения (получаемого, например, методом вариации произвольной постоянной) имеет вид

$$P_{ОТК}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot [1 - \exp[-(\lambda + \mu)t]] \quad (11.4)$$

При $t \rightarrow \infty$ вероятность отказа $P_{ОТК}(t) \rightarrow \lambda/(\lambda + \mu)$. Отношение $\lambda/(\lambda + \mu)$ называется коэффициентом неготовности постоянно контролируемого элемента (K_{II}).

Для типичных значений $\lambda \sim 10^{-5}$ 1/ч и $T_B \sim 1$ ч

$$K_{II} = \frac{10^{-5}}{10^{-5} + 1} = 10^{-5}$$

11.2. Восстановление работоспособности в режиме ожидания. Элемент с выявляемыми и скрытыми отказами

Рассмотрим элемент, который имеет выявляемые отказы с интенсивностью λ_B . Интенсивность восстановления выявляемых отказов равна μ (рис. 16). Кроме того, элемент имеет скрытые отказы с интенсивностью λ . Консервативно допустим, что скрытым отказам подвержены как работоспособные элементы, так и элементы, находящиеся в состоянии выявляемого отказа. Это приводит к некоторому завышению искомой вероятности отказа элемента, поскольку реально существенны лишь скрытые отказы элементов, находящихся в работоспособном состоянии $\lambda_C(P)$.

Допустим, что скрытые отказы устраняются в процессе проверок, проводимых через промежуток времени T_{Π} . Время устранения скрытых отказов мало, они устраняются "мгновенно".

В произвольный момент времени t , вследствие скрытых отказов, элемент окажется в неработоспособном состоянии с вероятностью $\lambda_C t$. Вероятность в тот же момент избежать скрытого отказа равна $(1 - \lambda_C t)$. Для этих элементов существенны выявляемые отказы и вероятность этих элементов находиться в состоянии отказа в соответствии с (11.4) равна

$$\frac{\lambda_B}{\lambda_B + \mu} \cdot [1 - \exp[-(\lambda_B + \mu)t]].$$

Вероятность пребывания элемента в состоянии отказа в момент времени t вследствие скрытых и выявляемых отказов равна, следовательно,

$$V(t) = \lambda_C t + (1 - \lambda_C t) \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_B + \mu} \cdot [1 - \exp[-(\lambda_B + \mu)t]] \quad (11.5)$$

Вероятность отказа элемента за промежуток времени проверки

$$V = \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_0^{T_{\Pi}} V(t) dt \quad (11.6)$$

Результатом интегрирования при условиях $\lambda_C t \ll 1$ и $T_B \ll T_{\Pi}$ является выражение

$$V \approx \frac{\lambda_C T_{\Pi}}{2} + \frac{\lambda_B}{\lambda_B + \mu} \quad (11.7)$$

из которого следует, что рассматриваемый элемент можно моделировать в виде суммы двух последовательно соединенных элементов, один из которых имеет скрытые (первое слагаемое), а второй - выявляемые (второе слагаемое) отказы.

11.3. Периодический контроль работоспособности

Для выявления скрытых отказов предусматриваются периодические (через время T_{Π}) проверки работоспособности элементов и их восстановление, проводимое за время τ . При этом на время t элемент (канал) выводится из работы и вероятность отказа канала становится равной единице. Вероятность отказа канала на интервале времени $(0, T_{\Pi})$; $(T_{\Pi} + \tau, 2 T_{\Pi} + \tau)$; ... увеличивается от 0 до λT_{Π} . Среднее значение вероятности отказа на этих интервалах равно $\lambda T_{\Pi} / 2$.

В соответствии с изложенным, коэффициент неготовности системы складывается из суммы не готовностей при работе и при ремонте и восстановлении:

$$K = \frac{\lambda T_{\Pi}}{2} \cdot \frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi} + \tau} + 1 \cdot \frac{\tau}{T_{\Pi} + \tau} \quad (11.8)$$

Очевидно, что при $T_{\Pi} = 0$ $K = 1$, а при $T_{\Pi} / \tau \gg 1$ $K \rightarrow \lambda T_{\Pi} / 2$. Нетрудно получить, что существует оптимальное отношение T_{Π} / τ , при котором коэффициент неготовности принимает минимальные значения. Это оптимальное отношение ($\tau \ll 1/\lambda$)

$$\left(\frac{T_{II}}{\tau}\right)_{\text{ОПТ}} \cong \sqrt{\frac{2}{\lambda\tau}} \quad (11.9)$$

а минимальное значение коэффициента неготовности

$$K_{\text{МИН}} \cong \sqrt{2\lambda\tau} \quad (11.10)$$

Для типичных значений $\lambda = 10^{-5}$ 1/ч и $\tau = 1$ ч

$$(T_{II})_{\text{ОПТ}} = 450 \text{ ч}, K_{\text{МИН}} = 4.5 \cdot 10^{-3}.$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Международная шкала происшествий на АС

Уровень	Критерии и атрибуты безопасности		
	Критерий 1 Выброс за пределы АС	Критерий 2 Выброс внутри АС	Критерий 3 Ухудшение защиты
1	2	3	4
7 Крупная авария	Крупный выброс: в количествах, радиологически эквивалентных более чем десяти тысячам тетра-беккерелей йода-131		
6 Серьезная авария	Значительный выброс: в количествах, радиологически эквивалентных порядка нескольких тысяч тетрабеккерелей йода-131		
5 Авария с риском выброса за пределы АС	Ограниченный выброс: в количествах, радиологически эквивалентных порядка от нескольких сотен до тысячи тетрабеккерелей йода-131	Серьезное повреждение активной зоны	
4 Авария без риска значительного выброса за пределы АС	Небольшой выброс: наиболее облученный человек за пределами АС получил дозу порядка нескольких миллизивертов	Значительное повреждение активной зоны. Смертельное облучение работника	

1	2	3	4
3 Серьезный инцидент	Очень малый выброс: наиболее облученный человек получил дозу порядка десятых долей милли-зиверта	Серьезное загрязнение, серьезный ущерб здоровью работника	Не осталось практически ни одного защитного уровня
2 Инцидент	Без воздействия на безопасность	Значительное загрязнение Облучение рабочего выше допустимой годовой нормы	Инциденты со значительным ущербом для резервов безопасности
1 Аномалия			Аномалия, выходящая за рамки разрешенного режима работы
0 Меньше допустимого значения			0 ⁺ Событие, могущее повлиять на безопасность реактора
			0 ⁻ Событие, могущее иметь отношение к безопасности реактора
Отсутствие отклонений	Нет влияния на безопасность		

Показатели надежности некоторых элементов систем безопасности

Наименование системы и элемента	Характер и последствия отказа	Интенсивность отказов, 1/ч	Вероятность отказа на требование
1	2	3	4
1. Защитные и локализирующие системы			
1.1. Рабочий орган АЗ	Не вводится в активную зону		10^{-4}
	Падение РО СУЗ	$3,2 \cdot 10^{-7}$	—
1.2. Насос	Не запускается	10^{-8}	10^{-3}
	Останов при работе	$3 \cdot 10^{-8}$	—
1.3. Клапан с пневмоприводом	Не срабатывает	$(1...3) \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
1.4. Задвижка с электроприводом	Не срабатывает	10^{-5}	10^{-3}
1.5. Обратный клапан	Заклинивание в закрытом положении	$0,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}
	Заклинивание в открытом положении	$5 \cdot 10^{-6}$	—
	Обратная протечка	$0,55 \cdot 10^{-6}$	—
	Течь	$0,52 \cdot 10^{-7}$	—
1.6. Предохранительный клапан	Не открывается	$0,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}
	Непосадка	—	10^{-2}
	Преждевременное открытие	10^{-5}	—
1.7. Электромагнитный клапан	Не срабатывает	—	10^{-3}
1.8. Теплообменник	Течь	10^{-5}	—
1.9. Бак	Разгерметизация	10^{-8}	—
2. Обеспечивающие системы			
2.1. Дизель-генератор	Не запускается	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$
	Останов при работе	$3 \cdot 10^{-3}$	—
2.2. Аккумуляторная батарея	Отсутствует напряжение на клеммах	$3 \cdot 10^{-6}$	—
	Не обеспечивает необходимой мощности	—	$2,6 \cdot 10^{-3}$

1	2	3	4
2.3. Кабель	Обрыв	$3 \cdot 10^{-8}$	—
	Короткое замыкание на землю	$3,7 \cdot 10^{-7}$	—
	Короткое замыкание на источник питания	10^{-8}	—
2.4. Трансформатор	Обрыв обмотки	10^{-6}	—
2.5. Предохранитель	Короткое замыкание	10^{-6}	—
	Преждевременный разрыв	10^{-6}	—
2.6. Переключатель 10 кВт	Не срабатывает	—	10^{-5}
	Не отключается	10^{-6}	—
3. Управляющие системы	Не включается	$2,3 \cdot 10^{-6}$	—
	Смещение настройки	$3 \cdot 10^{-5}$	—
3.1. Измерительные приборы	Не срабатывает	10^{-6}	—
3.2. Манометр	Неправильные показания	$4,5 \cdot 10^{-5}$	—
	Отсутствие показаний	$3 \cdot 10^{-7}$	—
3.3. Датчик температуры	Неправильные показания	$1,8 \cdot 10^{-5}$	—
3.4. Гамма-дозиметр	Неправильные показания	$4,5 \cdot 10^{-6}$	—
	Нарушение	$10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-6}$	—
3.5. Полупроводниковые приборы	Короткое замыкание	$10^{-7} \dots 10^{-6}$	—
	Замыкание	$(2 \dots 5) \cdot 10^{-6}$	—
3.6. Реле	Размыкание контактов	10^{-7}	—
	Не срабатывает	—	10^{-3}
	Преждевременный переброс	10^{-6}	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные принципы безопасности АЭС: Отчет международной консультативной группы по ядерной безопасности. Серия изданий по безопасности JNSAG-3. Госатомнадзор СССР. Информационный бюллетень 2(7), 1988, Москва. 92 с.
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88), ПНАЭГ - 1 - 011 - 89/ Госатомнадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1990. 48 с. (Правила и нормы в атомной энергетике).
3. Бахметьев А.М. , Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 136 с.
4. Самойлов О.Б. , Усынин Г.Б. , Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 280с.
5. Конструирование ядерных реакторов: Учеб. пособие для вузов / И.Я.Емельянов, В. И. Михан, В.И.Солонин и др.; Под общ. ред. акад. Н.А.Доллежала. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
6. Безопасность ядерной энергетики: Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности. Серия изданий по безопасности. JNSAG-5. Госатомнадзор России. Информационный бюллетень 1, 1993, Москва. 107 с.
7. Швыряев Ю. В. , Барсуков А.Ф., Дервянкин А.А. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. М.: ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1992. 266 с.
8. Букринский А.М., Федулов В.Ф. Международная шкала оценки опасности событий на АЭС// Атомная энергия. Т.70. 1991. Вып. 1, январь. С.3-8

О Г Л А В Л Е Н И Е

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1. АТОМНАЯ СТАНЦИЯ. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ. БЕЗОПАСНОСТЬ	4
1.1. Структура атомной станции	4
1.2. Экологический аспект атомных станций	5
1.3. Подход к проектированию	7
2. СОСТОЯНИЕ АТОМНОЙ СТАНЦИИ	7
2.1. Нормальная эксплуатация	7
2.2. Аварийная ситуация	7
2.3. Проектные аварии	8
2.4. Запроектная авария	8
2.5. Международная шкала происшествий на атомных станциях	9
3. КОНЦЕПЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ СТАНЦИИ	9
3.1. Понятие концепции безопасности	9
3.2. Радиационное воздействие	9
3.3. Принцип "защита в глубину"	10
3.4. Барьеры безопасности. Защита барьеров	11
3.5. Самозащищенность. Внутренне присущая безопасность	13
4. СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ	14
4.1. Функции системы безопасности	14
4.2. Классификация систем безопасности	14
4.3. Защитные системы безопасности	15
4.4. Локализирующие системы безопасности	16
4.5. Обеспечивающие системы безопасности	16
4.6. Управляющие системы безопасности	16
5. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ АВАРИИ	17
5.1. Источники ядерной и радиационной опасности	17
5.2. Виды исходных событий	17
5.3. Разработка сценария переходного процесса	19
6. МЕТОДОЛОГИЯ ДЕРЕВЬЕВ СОБЫТИЙ И ДЕРЕВЬЕВ ОТКАЗОВ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ СТАНЦИИ	20
7. МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ СТАНЦИИ	22
7.1. Детерминистский анализ	22
7.2. Вероятностный анализ	23
7.3. Структура вероятностной модели безопасности	25
8. НАДЕЖНОСТЬ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК, ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ	26
8.1. Комплексность свойства надежности	26
8.2. Количественные показатели безотказности	27
8.3. Безотказность систем реакторной установки	30
8.4. Показатели надежности систем безопасности	32
9. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ	34
9.1. Повышение безотказности элементов	34
9.2. Структурное резервирование. Резерв n - m	35
9.3. Структурное резервирование. Резерв - один канал	38
9.4. Резервирование управляющих систем	39
9.5. О влиянии масштаба резервирования	41
9.6. Роль свойства самозащищенности реакторной установки	42

10. ОТКАЗЫ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ.....	44
10.1. Классификация отказов по общей причине.....	44
10.2. Отказы по общей причине вследствие исходного события.....	44
10.3. Зависимые отказы в процессе аварии	45
10.4. Количественные характеристики отказов по общей причине.....	46
11. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ.	48
11.1. Восстановление работоспособности в режиме ожидания.	48
Постоянно контролируемые элементы с выявляемыми отказами	48
11.2. Восстановление работоспособности в режиме ожидания. Элемент с выявляемыми и скрытыми отказами	49
11.3. Периодический контроль работоспособности	50
ПРИЛОЖЕНИЯ	52
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	56

Редакция заказной литературы

Владимир Иванович Солонин

Безопасность и надежность реакторных установок

Заведующая редакцией Н.Г.Ковалевская

Редактор Е.К.Кошелева

Корректор О.В.Калашникова

Подписано в печать
Печ. л. 4, .Усл.печ. л.4,
Тираж 100 экз. Изд. №117.

Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.
.Уч.-изд. л.4,
Заказ №
Издательство МГТУ, типография МГТУ.
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.