МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н.В. Омельченко

О С Н О В Ы
НАДЁЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ: КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Учебное пособие
по дисциплине
«Надёжность и безопасность эксплуатации
электрооборудования электрических станций»
для студентов заочной формы обучения
направления подготовки
13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.311.019.3(075.8)
ББК 31.277.1
О-572

Р е ц е н з е н т ы:
А.А. Скидан – канд. техн. наук, доцент, заведующий
кафедрой «Системы контроля и управления атомных станций»
А.В. Углов – канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетические системы атомных станций»

Омельченко Н.В.

О-572 Основы надёжности, живучести и безопасности структурно-сложных энергосистем: конспект лекций: учебное пособие по дисциплине «Надёжность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций» для студентов заочной формы обучения направления подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника / Н.В. Омельченко ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2021. – 69 с.: ил. – Текст: электронный.

В учебном пособии изложен конспект из 10 лекций со встроенными заданиями, предназначенный для студентов заочной формы обучения, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. Предполагается, что слушатель курса уже владеет материалом курса «Надёжность систем электроснабжения» для направления подготовки 13.02.03. Однако не исключается возможность независимого изучения предлагаемого курса при условии, что слушатель достаточно хорошо ориентируется в базовых дисциплинах, на которых основан курс, таких как «Теоретические основы электротехники» и «Высшая математика». В данном пособии имеется ряд заданий, выполнение которых способствует лучшему усвоению курса.

УДК 621.311.019.3(075.8)
ББК 31.277.1

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры «Электроэнергетические системы атомных станций» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 6 от 01 марта 2021 г.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС – атомная электростанция

ВБРС – вероятность безотказной работы системы

ВФ – вероятностная функция

ДНФ – дизъюнктивная нормальная форма

ДО – дерево отказов

ИУ – инициирующие условия

ИС – инициирующие события

КНФ – конъюнктивная нормальная форма

КПОФ – кратчайший путь опасного функционирования

КПУФ – кратчайший путь успешного функционирования

ЛВМ – логико-вероятностный метод

ЛВТ – логико-вероятностная теория

МСО – минимальное сечение отказа

МСПО – минимальное сечение предотвращения опасности

ОДНФ – ортогональная дизъюнктивная нормальная форма

ОСС – опасное состояние системы

СОС – сценарий опасного состояния

ССС – структурно-сложные системы

СЭС – сложная электроэнергетическая система

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

ФАЛ – функция алгебры логики

ФЕЖ – функциональная единица живучести

ФОС – функция опасного состояния

ФРС – функция работоспособности системы

ЭФС – эффективность функционирования системы

ЭС – электростанция

ЭЧ – электрическая часть

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие является прямым продолжением пособия [13], первый раздел которого посвящён основам теории и расчета надёжности электроэнергетических систем. В нём рассматриваются основные положения теории надёжности, а также анализ методов расчёта надёжности сложных энергосистем с учётом и без учёта восстановления элементов систем.

Методы расчета надежности можно разделить на две группы в зависимости от принципа учета отказов:

1) методы, учитывающие лишь моменты появления отказов;

2) методы, учитывающие процесс возникновения отказов.

Первая группа методов в настоящее время наиболее разработана и доведена до инженерных методов расчета надежности.

Одно из центральных мест в этой группе занимает вопрос использования аппарата математической логики для описания процессов функционирования сложных систем. Использование алгебры логики позволяет четко описывать процессы функционирования сложных систем с последующими расчетами надежности. Данный метод называют логико-вероятностным методом расчета надежности систем.

При расчете надежности логико-вероятностным методом структура системы описывается средствами математической логики, а количественная оценка ее надежности производится с помощью теории вероятностей. Трудность постановки задачи при оценке системы таким методом состоит в том, что приходится иметь дело с большим числом самых разнообразных устройств, входящих в систему.

Самой удобной и экономичной формой представления условий работоспособности системы является аналитическая форма.

Представление условий работоспособности системы в виде логической функции работоспособности системы (ФРС) не является самоцелью, а только завершает первый этап исследования надежности. На втором этапе, на основании ФРС и вероятностных характеристик элементов системы оценивают вероятностную функцию – вероятность безотказной работы системы, которая является одним из основных показателей надёжности. В общем случае переход от ФРС произвольного вида к соответствующей вероятностной функции является достаточно сложным, основные затруднения возникают из-за повторной формы записи ФРС.

Переход от логической функции к вероятностной значительно упрощается, если исходная ФРС преобразуется в ортогональную или бесповторную форму, что обеспечивает применение к ней основных теорем теории вероятностей.

В [3], [4] подробно рассмотрены методы преобразования логической функции в вероятностную для возможности количественной оценки надёжности.

Для полной оценки эффективности функционирования энергосистемы используют три критерия: надёжность, живучесть и безопасность [5]. E f f e k t u s в переводе с латинского означает исполнение, действие. Отсюда следует, что понятие эффективности может быть отнесено к объекту только в связи с его действием (функционированием, применением, использованием). Таким образом, понятие эффективность энергосистем непременно должно быть связано с выполнением системой конкретных задач, и ограничениями, накладываемыми на её работу. При разработке энергосистемы эти условия закладываются в технических условиях, при применении - соответствующей постановкой выполняемой ими задачи.

Краткий анализ предлагаемых различными авторами определений понятия эффективности (возможность ее количественной оценки и предлагаемые различные критерии эффективности, возможность обеспечения исходной информацией и отношение к использованию автоматических методов расчёта) позволяет все многообразие предложенных определений разделить на две группы. Первая группа определений эффективности технической системы исходит из теории исследования операций и называется эффективностью как способностью системы выполнять поставленную задачу. Вторая группа определений базируется на технико-экономическом анализе систем и связывает выходной результат с затратами на его достижение [5].

В соответствии с принятой терминологией и в целях ее однозначного понимания необходимо понимать под эффективностью системы ее способность к достижению поставленной цели при минимальных затратах, а под эффективностью функционирования системы (ЭФС) - способность системы к достижению поставленной цели, то есть в последнем случае затраты на систему не учитываются.

Количественными характеристиками ЭФС или критериями являются некоторые количественные показатели меры способности системы выполнять свое назначение. Конкретные показатели выбираются в зависимости от назначения системы.

В тех случаях, когда для электроэнергетической системы может быть сформулирован критерий отказа и критерий опасного состояния, показатель ЭФС сводится к известным показателям надежности и безопасности: вероятности безотказной работы и вероятности опасного состояния, а также промежуточного между ними показателя живучести в виде обобщенного коэффициента живучести.

ЛЕКЦИЯ № 1

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: История развития теории надежности и безопасности и их объекты исследования

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. История развития теорий надежности и безопасности. Взаимосвязь друг с другом.
2. Надежность, безопасность и эффективность – ключевые направления эксплуатации и дальнейшего развития атомной энергетики.

1. История развития теорий надежности и безопасности. Взаимосвязь друг с другом

Научное познание сложных современных технических систем в теоретическом и практическом плане в настоящее время так и не решено удовлетворительно. Газовые, нефтяные, угольные электростанции, гидроэлектростанции, атомные электростанции – все это крупные промышленные системы. Вероятность аварий на них меньше, чем у простых систем, но их последствия более масштабны и ликвидируются тяжелее. Часто работа таких крупных систем зависит от нескольких операторов, от их квалификации и мастерства. В условиях дальнейшего развития научно-технического прогресса вопросы надежности и безопасности техники, вопросы дисциплины, порядка и организованности приобретают первостепенное и самостоятельное значение.

Повышая надежность элементов, вводя структурную и временную избыточность, применяя взаимозаменяемость и восстановление, и иные меры повышения надежности систем, мы гарантируем так называемую *отказоустойчивость* системы, т.е. способность правильно функционировать при нескольких отказах ее элементов (двух, трех, иногда четырех) [3].

Однако, именно для сложных систем характерна возможность весьма сложных (многократных) комбинаций событий, вероятность каждой из которых мала, а в сумме таких событий набирается достаточно для перехода в *опасное состояние*. Усилия, направленные на повышение отказоустойчивости системы, необходимы, но они не обеспечивают её безопасности. Существующие системы контроля и защиты, ориентированные на простой перебор возможных опасных ситуаций, не могут гарантировать защиты системы от произвольных комбинаций отказов, нарушений правил эксплуатации и иных неблагоприятных воздействий.

Одной из важных характеристик, учитываемых при проектировании, разработке и эксплуатации систем, является надежность. В течение длительного времени понятие надежности носило интуитивный, субъективный и качественный характер. Необходимость в количественной оценке надежности впервые стала ощущаться в годы второй мировой войны. Интенсивное развитие военной, а затем и космической техники, привело к созданию современной теории надежности, широко использующей количественные показатели.

История возникновения, становления и развития теории надежности насчитывает уже около 70 лет, созданы разнообразные научные школы, написано огромное количество книг и учебников. Как самостоятельное научное направление теория надежности зародилась в США через несколько лет после окончания второй мировой войны, когда американцы начали военные действия в Корее, далеко от стационарных баз, где можно было отремонтировать или заменить отказавшую военную технику. Для решения проблемы надежности в институте Радиоинженеров США (IRE) была создана секция надежности и контроля качества, которая стала выпускать ежеквартальные журналы и, начиная с 1954 г., созывать ежегодные симпозиумы по надежности. В это же время вопросам надежности технических объектов стало уделяться должное внимание и в СССР. Уже в 1954 г. вышел первый сборник переводов зарубежных материалов, затрагивающих вопросы надежности. Выдающиеся теоретические результаты работы советских и зарубежных ученых и их высочайшая практическая ценность позволили доказать ряду тогдашних главных конструкторов ошибочность мнения о том, что «*считают надежность те, кто ее не умеет делать*».

Развитие отечественной теории надежности связано с именами выдающихся ученых. Среди них советский математик Сергей Натанович Бернштейн – разработчик первой аксиоматики логики высказываний для аксиоматизации теории вероятностей, Д.А.Поспелов, С.В.Макаров, адмирал Игорь Алексеевич Рябинин – создатели логико-вероятностного направления теории надежности, возникшего в связи с необходимостью построения адекватных моделей надежности многоэлементных высокорезервированных корабельных систем; Геннадий Николаевич Черкесов, автор оригинальных работ по анализу надежности систем с временным резервированием и многие другие.

Надежность неразрывно связана с понятием «качество», является важнейшим свойством качества как совокупности свойств, обусловливающих его пригодность выполнять определенные функции в соответствии с назначением. К числу основных параметров изделия относят: быстродействие, нагрузочная характеристика, устойчивость и т.д. Вместе с другими показателями (масса, габариты, удобство в обслуживании) они составляют комплекс показателей качества изделия. Показатели качества из-

меняются с течением времени. Их изменения превышают допустимые значения, приводящие к возникновению отказового состояния. Показатели надежности не противопоставлены другим показателям качества. Без учета надежности все другие показатели качества теряют свой смысл. Надежность становится полноценным показателем качества лишь в сочетании с другими характеристиками изделия. Долгое время надежность не измерялась количественно, что затрудняло ее объективную оценку. Использовались понятия «высокая надежность», «низкая надежность» и др. качественные определения. Установление количественных показателей, способов измерения и расчета положило начало научным методам в исследовании надежности.

Увеличивающаяся сложность технических объектов, возрастающая ответственность функций, которые они выполняют, повышенные требования к качеству изделий и условиям их работы, возросшая роль автоматизации – основные факторы, определяющие главные направления в развитии науки о надежности.

Первые шаги теории надежности были направлены на определение причин ненадежности. Далее следовал долгий и трудный период перехода от анализа свершившегося факта к разработке методов предварительного исследования надежности. Возникла необходимость неразрывно связать исследования вопросов надежности со сферой проектирования для того, чтобы иметь возможность заложить надежность в проект и даже в саму идею проекта. В решении этого вопроса возможны различные направления.

В 60-е годы начался переход ко второму этапу, когда появились экспериментальные методы подтверждения надежности, и завершилось создание основ теории надежности, основанное на базе теории вероятностей и математической статистики. В результате большой организационной работы в СССР был издан в 1967 году государственный стандарт ГОСТ 13377-67, в котором устанавливались термины и определения в области надежности для изделий разных отраслей промышленности.

На современном, третьем этапе развития теории надежности развивается количественный подход в отличие от качественной оценки надежности систем, существовавшей ранее.

Несмотря на солидный возраст теории надежности, и в ней остались «белые пятна», больше всего связанные с проблемой получения объективных исходных данных о безотказности элементов, ввиду недостаточного объема статистической информации из-за малого времени эксплуатации или малого объема выборки. Однако, успехи в области безопасности намного скромнее и менее известны.

Крупнейшие техногенные аварии и катастрофы в мире выявили необходимость и серьезность глубокого изучения и научных разработок теории

безопасности. Невозможность практического охвата сложности современных электротехнических систем, количество элементов которых насчитывает порядок 10^6, ограничивает область наших интересов только вопросами структурной сложности. **Актуальность** этой проблемы подтверждается хотя бы тем, что трудно привести не сотни книг, а всего одну-две, где бы научно решались задачи надежности и безопасности структурно-сложных систем [3].

Относясь к инженерным дисциплинам, теории надежности и безопасности тесно связаны с современной прикладной математикой, т.к. только с помощью математики возможны корректная постановка задачи, а также четкая формулировка условий и допущений, в которых она решается.

Ядром научных исследований и расчетов структурных надежности и безопасности оказались логико-вероятностные методы (ЛВМ). Практически все творцы современного понимания вероятностной логики, как Джордж Буль, не имели специального математического образования, но были высококлассными инженерами.

Достоинством ЛВМ для инженеров является их исключительная точность, однозначность и возможность анализа влияния любого элемента или группы элементов на надежность и безопасность всей системы. Существует и трудность, главным образом связанная с необходимостью ознакомления с методами вероятностной логики, которая не входит в учебные программы по математике ни одного из вузов страны.

2. Надежность, безопасность и эффективность – ключевые направления эксплуатации и дальнейшего развития атомной энергетики

Электроэнергетика является базовой областью, которая обеспечивает нужды страны в электрической энергии и может вырабатывать значительный объем электроэнергии для экспорта. Перспективы применения ядерной энергии как источника энергообеспечения в будущем зависят от нескольких ключевых факторов. Прежде всего - это признание общественностью роли ядерной энергетики как одного из надежных источников энергообеспечения устойчивого развития человечества. Другими ключевыми факторами являются технологическая зрелость, экономическая конкурентоспособность, экологическая приемлемость.

Проблема надежности и безопасности постоянно сопутствовала техническому прогрессу и всегда находила более разумное решение на уровне технических возможностей и знаний, которыми характеризовался тот или иной период.

Наряду с бытовым пониманием слов «надежность» и «безопасность» как прочность и отсутствие угрозы какого-либо несчастья, для количест-

венной их оценки требуется более научное определение понятий надежности и безопасности. Это важно для увязки аналогичных понятий теории надежности и более молодой теории безопасности.

Безопасность всегда была и будет наивысшим приоритетом в развитии атомной энергетики. Многочисленные статистические оценки безопасности систем электрической части однозначно свидетельствуют о важности человеческого фактора, как в предупреждении, так и в причинах возникновения аварий. Так же следует учитывать, что система сбора и обработки данных о дефектах и отказах оборудования на АЭС может дать статистическую информацию о надежности элементов с частотой отказов $1...10^{-2}$ в год (от трёх-четырех до десятков и больше отказов в год). Проблематично, чтобы в обозримом будущем можно было бы иметь достоверную информацию о сравнительно редких отказах с частотой $10^{-2}...10^{-4}$ в год (несколько отказов в 10 - 100 лет) из-за несвоевременных действиях и корректировках, которые предпринимаются по результатам отказов и нарушений. Тем более бессмысленно ожидать, что статистика даст информацию о надежности оборудования с частотой отказов $10^{-4}...10^{-5}$ в год (до нескольких отказов в 1000 лет). А именно в этом диапазоне находятся события, оказывающие наибольшее влияние на проект АЭС из-за требований по безопасности [7].

Следовательно, единственной альтернативой остается аналитический подход, т.е. получение количественных показателей надежности теоретическим путем, на основании фактических данных об обнаруживаемых дефектах при изготовлении и контроле во время эксплуатации. При этом важно иметь данные как функцию технологии изготовления и контроля при производстве и эксплуатации. Такая информация позволит в дальнейшем подходить к экономической оптимизации средств безопасности, что в наши дни становится актуальным, особенно при продлении срока эксплуатации.

В последнее время проблема продления срока эксплуатации АЭС привлекла к себе пристальное внимание специалистов. В России (Канаде, Корее, Украине) расчетный срок эксплуатации АЭС составляет 30 лет, ведутся работы по подготовке к продлению эксплуатации сверх этого срока. Во Франции, Великобритании и Японии нет ограничений сроков эксплуатации блоков АЭС, но через каждые 10 лет владельцы станций должны подтверждать безопасность дальнейшей эксплуатации каждого блока. В США по закону об атомной энергии 1954 г. для каждого энергоблока установлен лицензионный срок службы, равный 40 календарным годам, начало которого исчисляется с момента получения разрешения на строительство, а с 1982 г. – с момента получения разрешения на эксплуатацию. По истечению этого срока предусматривается возможность подтверждения лицен-

зии еще на 20 лет, т.е. до 60 лет с момента получения первого разрешения на эксплуатацию.

Применение технологии управления сроком службы АЭС предоставляет реальную возможность ядерной энергетике не только сохранить, но и расширить свое участие на рынке производства электроэнергии. Становится возможным устанавливать проектный срок службы в 60 и более лет. Атомщики Японии заявляли о возможности достижения срока службы ядерного энергоблока в 120 лет.

Надежность, безопасность и эффективность – базовые понятия современной атомной энергетики. Под *эффективностью* системы будем понимать совокупность свойств (качество), определяющих степень приспособленности системы к выполнению поставленных задач [7]. Эффективность всякой технической системы определяется в основном эффективностью выполнения системой определенных задач (с учетом внешней обстановки и способа применения) и эффективностью использования вкладываемых в нее средств (материальных, людских, финансовых и т.д.)

Главное – найти оптимальный баланс между эффективностью, надежностью и безопасностью. Абсолютно надежная и безопасная, но неэффективная отрасль никому не нужна. Дорогие проекты с небольшой выработкой нет смысла создавать, их вполне способна заменить газовая энергетика. Большая выработка с риском – тоже никого не устраивает. Задача состоит в том, чтобы эти понятия сделать неразрывными, дополняющими друг друга. Важно научиться успешно сочетать стремление к эффективной эксплуатации с обеспечением безопасности путем содействия технологическому развитию и прогрессу, разработки усовершенствованных методов контроля и диагностики, прогнозирования остаточного ресурса, повышения эффективности управления и т.д.

В 2019 году производство электроэнергии на атомных электростанциях ЕЭС России увеличилось на 2,2 % относительно объема производства в прошлом году. С увеличением объема производства электроэнергии на атомных электростанциях наблюдалось увеличение расхода электроэнергии на собственные, производственные и хозяйственные нужды электростанций. В значительной мере это проявилось с вводом в 2019 г. нового генерирующего оборудования – энергоблока № 7 на Нововоронежской АЭС.

В 2019 г. выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России, включая производство электроэнергии на электростанциях промышленных предприятий, составила 1080,6 млрд кВт·ч (увеличение к объему производства электроэнергии в 2018 г. составило 0,9 %), в том числе распределение годового объема производства электроэнергии по типам электростанций составило (табл. 1):

- ТЭС – 679,9 млрд кВт·ч (снижение производства на 0,3 %);
- ГЭС – 190,3 млрд кВт·ч (увеличение производства на 3,6 %);
- АЭС – 208,8 млрд кВт·ч (увеличение производства на 2,2 %);
- ВЭС – 0,3 млрд кВт·ч (увеличение производства на 47,3 %);
- СЭС – 1,3 млрд кВт·ч (увеличение производства на 69,4 %).

Мировая выработка электроэнергии неуклонно возрастает. Ниже приведены спрогнозированные данные баланса производства электроэнергии в мире, собранные в табл. 1.

Таблица 1

Прогноз баланса производства электроэнергии в мире в 2000 - 2030 г.

Первичные энергоресурсы	2000 г.	2010 г.	2020 г.	2030 г.	Среднегодовые темпы прироста, %
Общее производство, кВт·ч	15391	20037	25578	31524	2,4
В т.ч. уголь	5989	7143	9075	11590	2,2
Нефть	1241	1348	1371	1326	0,2
Газ	2676	4947	7696	9923	4,5
Водородные топливные элементы	0	0	15	349	-
Атомная энергия	2586	2889	2758	2697	0,1
Гидроэнергия	2650	3188	3800	4259	1,6
Прочие возобновляемые источники энергии	249	521	863	1381	5,9
Потребление всего млн т н.э.	235	304	388	476	2,4

ЛЕКЦИЯ № 2

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Структурно-сложные системы как объект исследований

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Варианты существующих энергосистем и выбор класса структурно-сложных систем для дальнейшего исследования.
2. Некоторые примеры структурно-сложных систем.

1. Варианты существующих энергосистем и выбор класса структурно-сложных систем для дальнейшего исследования

Насущные потребности современной науки и техники выдвигают задачу разработки системного подхода к исследованию любых явлений и процессов окружающего нас мира. Вполне естественно, что к проблеме надежности и безопасности сложных энергокомплексов необходим системный подход.

Под термином «система» будем понимать совокупность действующих элементов, взаимосвязанных между собой и рассматриваемых как единое структурное целое. Эти связи и отличают систему от простого набора частей. Существуют различные классы систем, рассматриваемые по тем или иным признакам: естественные и искусственные, открытые и закрытые, простые и сложные, технические, информационные, вычислительные и другие системы. Нас будут интересовать только *структурно-сложные системы* (ССС) в электроэнергетике [3]. Латинский термин «structura» означает взаиморасположение и связь составных частей чего-либо.

Представление о сложности системы связывает это свойство:

- с объемом оборудования;
- разветвленностью функциональных и логических связей между элементами, частями системы и степенью их взаимодействия;
- многорежимностью системы;
- возможностью восстанавливаемых и невосстанавливаемых отказов у одних и тех же элементов в зависимости от характера самого отказа;
- последействием, выражающемся в необходимости отключения ряда исправных элементов при ремонт отказавших;
-квалификацией персонала, стоимостью изготовления всей системы, трудностью оценки эффективности, надежности и безопасности и т.д.

Иными словами, понятие сложность учитывает как сложность структуры системы, так и сложность функций, реализуемых системой. Боль-

шинство элементов сложных энергосистем сами по себе являются достаточно сложными техническими системами, такие как турбо- и дизель-генераторы, различные преобразователи, автоматические синхронизаторы, аппараты коммутации и т.д. Поэтому сложная электроэнергетическая система – это система систем.

Под «структурно-сложными системами» будем понимать системы, которые при математическом описании не сводятся к последовательным «И», параллельным «ИЛИ» или древовидным структурам, для исследования которых существуют количественные методы. Структурно-сложные системы описываются сценариями сетевого типа с циклами и неустранимой повторяемостью элементов при их формализации. При решении задач надежности и безопасности ССС используются одни и те же логико-вероятностные модели [3].

Большинство реальных систем относится к классу структурно-сложных. Единственным практически реальным и доступным путем для проектирования и исследования ССС является моделирование. Вполне естественно, что все научные результаты, полученные для ССС, будут пригодны для систем с простой структурой.

Энергосистемы с мостиками (перемычками) являются ССС. Для такого рода систем Б.С. Диллон, А.П. Коваленко и др. использовали эквивалентное преобразование соединения треугольником в соединение звездой и наоборот. В результате такого преобразования сложная мостиковая структура заменяется системой с последовательным и параллельным соединением элементов. Такой метод преобразований вносит небольшую погрешность, но в практических расчетах ею можно пренебречь.

Логико-вероятностные методы для исследования структурных надежности и безопасности практически исключают погрешность в расчётах, четко решая поставленные задачи.

2. Некоторые примеры структурно-сложных систем

Сложная электроэнергетическая система (СЭС) представляет собой совокупность электрических машин, распределительных и регулирующих устройств, кабелей и потребителей, предназначенная для бесперебойного распределения электроэнергии в нужном количестве заданного качества потребителям различного направления. Наличие глубоких внутренних связей, не позволяющих расчленить систему на независимые составляющие, приводит к тому, что при определении её характеристик нельзя изменять влияющие факторы «по одному». Такая система обладает новыми качествами, несвойственными отдельным её элементам.

Логические связи, описывающие условия работоспособности СЭС, характеризуют её как систему с мостиковой структурой, при которой одни

и те же элементы обеспечивают различные варианты работы системы. Характерной особенностью СЭС, как правило, является ремонт элементов при снятом напряжении сети. Поэтому фактический отказ того или иного элемента приводит к вынужденному отказу ряда исправных элементов системы на период восстановления отказавшего. При этом иногда из действия выключаются элементы, обеспечивающие резервное питание, что, естественно, снижает общую надежность системы.

Приведем пример небольшой по количеству элементов и связей между элементами, но всё же структурно-сложной системы, изображённой на рис. 1.

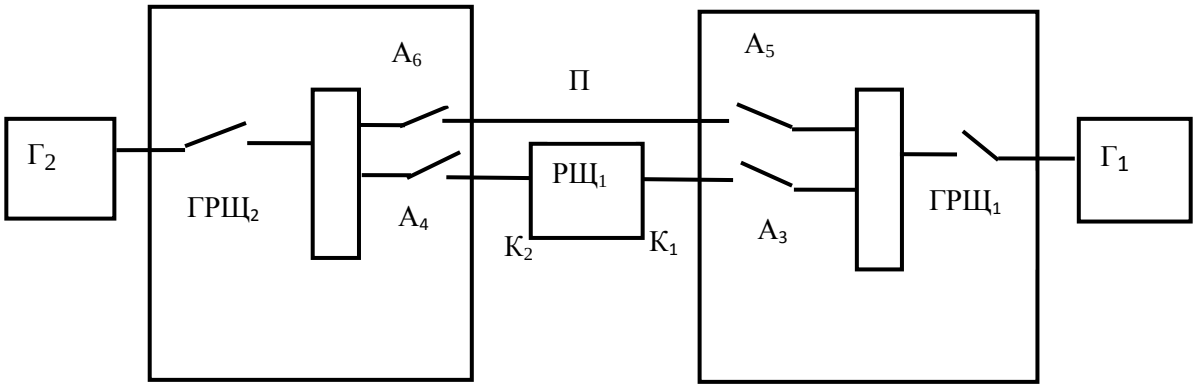

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема

Технические средства:

$Г_1$ и $Г_2$ - генераторы;
ГРЩ $_1$ и ГРЩ $_2$ - главные распределительные щиты;
К $_1$ и К $_2$ - кабельные линии;
П - кабельная перемычка;
РЩ $_1$ - распределительный щит.

Критерий отказа системы: *отсутствие питания на $РЩ_1$ одновременно от обоих генераторов.*

На рис. 2 изображена структурная схема надёжности.

Структурная схема надежности: логическое и графическое представление объекта, отображающее, каким образом безотказность его блоков и их сочетаний влияют на безотказность объекта (ГОСТ 27.002-2015).

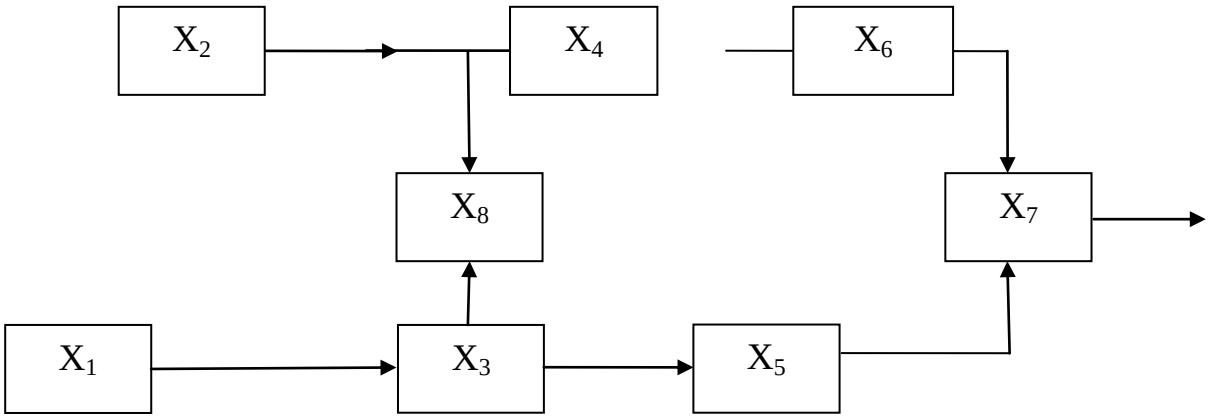

Рис. 2. Структурная схема надежности

Принятые условные обозначения:

X_1, X_2 – $Г_1$, $Г_2$ - генераторы;
X_3, X_4 – $ГРЩ_1$, $ГРЩ_2$ - главные распределительные щиты;
X_5, X_6 – $К_1$, $К_2$ - кабельные линии;
X_8 – П - кабельная перемычка;
X_7 – $РЩ_1$ - распределительный щит.

Чтобы подчеркнуть структурную сложность энергосистемы, рассмотрим вполне реальную систему с кольцевой структурой (рис. 3).

В данной системе 15 структурных элементов:

- X1, X2, X3 - три генератора одинаковой мощности;
- X4, X6, X9 - три главных распределительных щита;
- X5, X7 , X8 - три связи между ГРЩ;
- X10…X15 - шесть вторичных распределительных щитов.

Задача состоит в том, чтобы обеспечить бесперебойное одновременное питание трех групп ответственных потребителей, каждая из которых может быть включена на один из двух ВРЩ.

Критерий отказа системы – отсутствие питания хотя бы на одной из трёх групп ответственных потребителей.

Кольцо, образованное элементами X4 – X9 составляет основную трудность аналитического решения задач надежности такой энергосистемы.

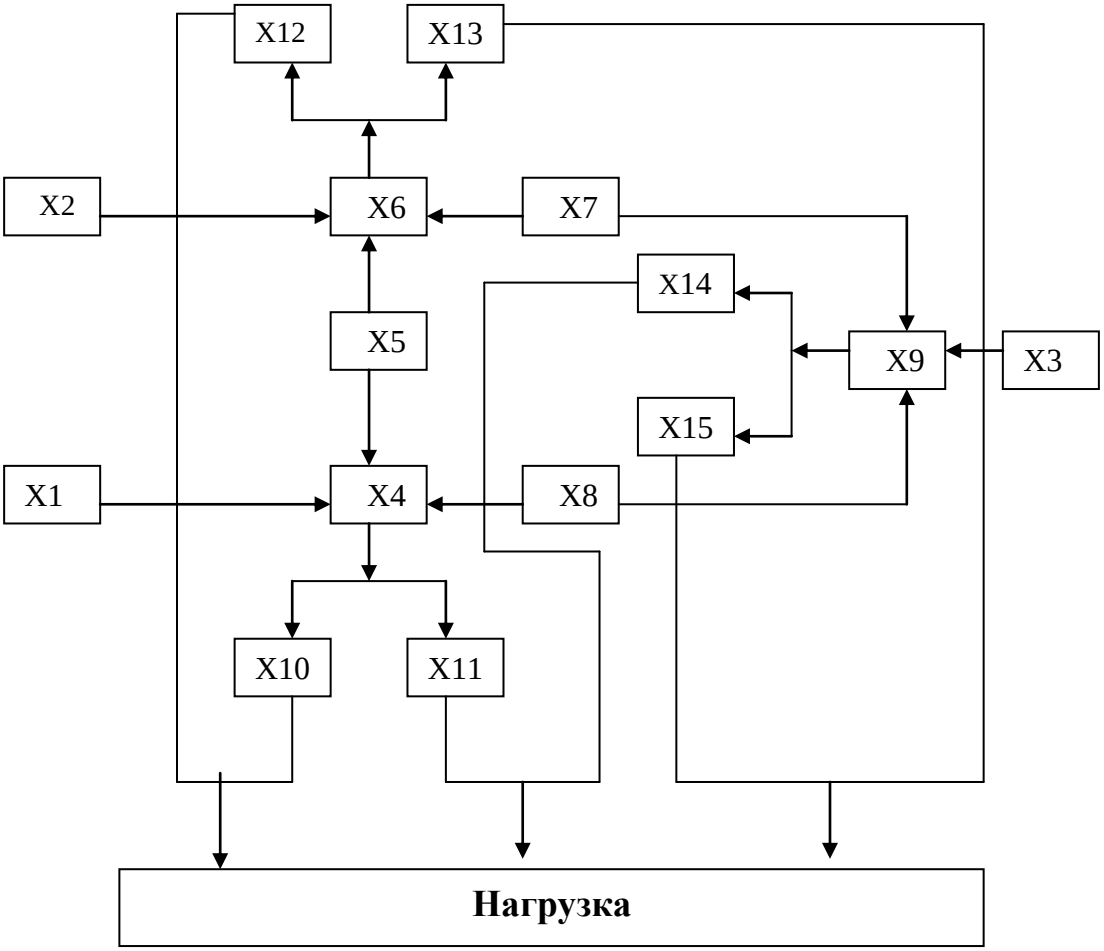

Рис. 3. Структурная схема ЭС с тремя генераторами

В качестве еще одной ССС, состоящей всего из девяти элементов, но представляющей большие трудности при исследовании её надежности, приведем структуру двух «звёзд», включённых на «треугольник» (рис. 4).

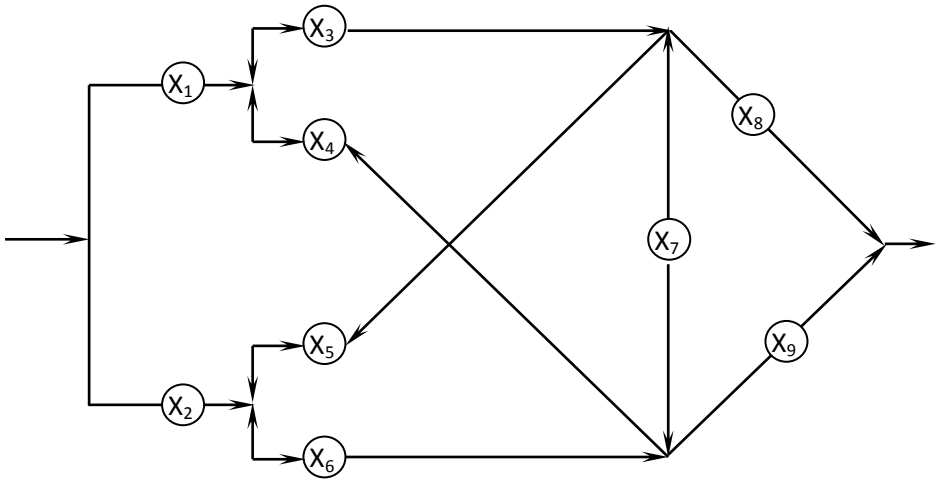

Рис. 4. Структура двух «звёзд», включённых на «треугольник»

Задание 1.

Произвести расчет структурной надежности энергосистем, резервированных по схемам «1 из4», «2 из 4», «3 из 4».

Для этого необходимо:

- *сформулировать критерий отказа для каждого случая;*
- *показатели надежности элементов систем одинаковы (равнонадёжны)* $P_1=P_2=P_3= P_{ЭЛ} = 0{,}9$;
- *для расчетов надежности использовать любой известный метод преобразования логической функции в вероятностную[3],[4], [13];*
- *по результатам расчётов количественной оценки надёжности сделать выводы.*

Например:

Определить среднюю наработку на отказ невосстанавливаемой резервированной системы по схеме «2 из 3», если средняя наработка на отказ каждого ее элемента $T_0 = 500$ часов.

Критерий отказа системы – отказ 2-х элементов.

Решение:

Составим ФРС и произведем преобразование логической функции в вероятностную функцию (полином) методом наращивания КПУФ:

$$Y(\overrightarrow{X_3}) = \begin{vmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X_3 \\ X_2 & X_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{vmatrix}$$

$$P^{(0)} = 0$$

$$P^{(1)} = P^{(0)} + R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - P|0|) = R^2$$

$$P^{(2)} = P^{(1)} + R_1 \cdot R_3 \cdot (1 - P|1 \quad X_2|) = P^{(1)} + R^2(1-R)$$
$$= R^2 + R^2(1-R) = 2R^2 - R^3$$

$$P^{(3)} = P_{\text{СИСТ.}}(t_{\text{б.р.}}) = P^{(2)} + R_2 \cdot R_3 \cdot \left(1 - P\begin{vmatrix} X_1 & 1 \\ X_1 & 1 \end{vmatrix}\right) = P^{(2)} + R^2(1-R)$$
$$= 2R^2 - R^3 + R^2(1-R) = 3R^2 - 2R^3$$

ЛЕКЦИЯ № 3

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Основные понятия и определения теории надежности в соответствии с ГОСТ 27.002-2015. Базовые понятия теории безопасности

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Основные понятия теории надёжности.
2. Состояния объектов в теории надёжности.
3. Отказы, дефекты, повреждения.
4. Показатели надежности.
5. Резервирование. Основные понятия.
6. Фундаментальные понятия теории безопасности.

1. Основные понятия теории надёжности

Надёжность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении, поддерживается и расходуется в процессе эксплуатации [9].

Для количественной оценки надежности и безопасности требуется конкретизация этих понятий. Остановимся более подробно на понятиях современной теории надежности и безопасности.

ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. ГОСТ регламентирует приведённые ниже понятия.

Элемент: Объект, для которого в рамках данного рассмотрения не выделяются составные части.

Система: Объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определенном контексте как единое целое и отделенных от окружающей среды.

Надежность: Свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Слова "во времени" означают естественный ход времени, в течение которого имеет место применение, техническое обслуживание, хранение и транспортирование объекта, а не какой-либо конкретный интервал времени.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтопригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств.

Занимаясь анализом эффективности функционирования структурно-сложных систем, надежность будем рассматривать в узком смысле, как синоним безотказности.

Требуемые функции и критерии их выполнения устанавливают в документации на объект.

Безотказность: свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Ремонтопригодность: свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путем технического обслуживания и ремонта.

Долговечность: свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния.

Сохраняемость: свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования.

Готовность: свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

2. Состояния объектов в теории надёжности

Работоспособное состояние: состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции.

Неработоспособное состояние: состояние объекта, в котором он не способен выполнять хотя бы одну требуемую функцию по причинам, зависящим от него или из-за профилактического технического обслуживания.

Предельное состояние: состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Критерий предельного состояния: признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные в документации на него.

Опасное состояние: состояние объекта, в котором возникает недопустимый риск причинения вреда людям, или окружающей среде, или существенных материальных потерь, или других неприемлемых последствий.

Опасное состояние может возникнуть как в результате отказа, так и в процессе работы объекта.

Предотказное состояние: состояние объекта, характеризуемое повышенным риском его отказа.

3. Отказы, дефекты, повреждения

Изменения, происходящие в любом объекте в течение времени и приводящие к возможной потере его работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями на объект. Имеются *три основных источника воздействия на объект:*

- *действие энергии внешней среды,* включая человека, исполняющего функции оператора, использующего функции эксплуатационника или ремонтника;

- *внутренние источники энергии,* связанные с рабочими процессами, протекающими в объекте;

- *потенциальная энергия, накопленная в материалах конструкции объекта* в процессе изготовления и эксплуатации.

Основными формами энергии, влияющими на работоспособность объектов, являются: механическая, тепловая, химическая, ядерная, электромагнитная. Эти формы энергии, действуя на объекты, вызывают в них процессы, ухудшающие начальные параметры объектов, т.е. могут привести к отказу. Схематически это выглядит так:

Энергия, действующая на объект→процесс изменения свойств или состояния материалов→повреждение материала конструкции объекта→изменение выходных параметров объекта→отказ.

В результате действия той или другой энергии может не сразу произойти повреждение материала объекта. Часто существует период «накопления воздействий», прежде чем начинается период внешнего проявления процесса, т.е. повреждения объекта. Например, для начала развития усталостной трещины необходимо определенное число циклов переменных напряжений. При этом под *повреждением* материала будем понимать *отклонение его контролируемых свойств от начальных*. Если эти отклонения превосходят допустимый уровень, то может произойти отказ объекта.

Всякий объект можно описать различными способами. При формировании понятия *отказ* объекта (системы, элемента) необходимо составить (сформулировать) совокупность конкретных требований, которым он должен удовлетворять. Если он удовлетворяет всем выдвинутым требованиям, то можно считать, что объект (система, элемент) находится в работоспособном состоянии. Требования к объекту устанавливаются субъективно, зависят от полноты знания объекта, опыта и

других факторов, т.к. связны с деятельностью каких-то лиц. При этом возможны и ошибки в назначении определенных требований и пропуски некоторых из них, наконец, эти требования могут изменяться по воле и желанию заказчиков и разработчиков, то есть они динамичны. Но, несмотря, на всю относительность полноты требований к объекту и субъективный характер их установления, в любой момент времени должна быть выделена и зафиксирована вполне определенная совокупность этих требований, по отношению к которой объективно можно судить об исправности или неисправности данного объекта. В этом состоит диалектика субъективного и объективного в оценке отказа объекта: *субъективно устанавливаются требования к объекту и объективно - его состояние по отношению к этим требования*. Всё это необходимо учитывать при формировании понятия «отказ ЭЧ ЭС».

Отказ: событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (событие, после возникновения которого система утрачивает способность выполнять заданное назначение). Классификация отказов подробно рассмотрена в [4].

Дефект: каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией.

Повреждение: событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Критерий отказа: признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в документации (заранее оговоренные признаки нарушения работоспособного состояния, при котором принимается решение о факте наступления отказа).

Запасная часть: отдельный узел, устройство или элемент, предназначенные для замены изношенных, неисправных или отказавших составных частей объекта с целью поддержания или восстановления его работоспособного состояния.

Комплект ЗИП: набор запасных частей, инструментов, принадлежностей и расходных материалов, необходимых для функционирования, технического обслуживания и ремонта объекта.

4. Показатели надежности

Показатели надёжности – количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта.

Нас интересуют единичные и комплексные показатели надёжности.

В качестве единичных показателей рассмотрим показатели безотказности, ремонтопригодности и восстанавливаемости.

Показатели безотказности:

вероятность безотказной работы: вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет;

средняя наработка до отказа: математическое ожидание наработки объекта до отказа;

гамма-процентная наработка до отказа: наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью, выраженной в процентах;

средняя наработка между отказами: математическое ожидание наработки объекта между отказами;

гамма-процентная наработка между отказами: наработка между отказами, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью, выраженной в процентах;

интенсивность отказов: условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник;

параметр потока отказов: предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к длительности этого интервала, стремящейся к нулю.

Показатели ремонтопригодности и восстанавливаемости:

вероятность восстановления: вероятность того, что время (до) восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение;

среднее время восстановления: математическое ожидание времени восстановления;

среднее время до восстановления: математическое ожидание времени до восстановления;

гамма-процентное время восстановления: время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью, выраженной в процентах;

гамма-процентное время до восстановления: длительность времени до восстановления, которая не будет превышена с вероятностью, выраженной в процентах;

интенсивность восстановления: условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Комплексные показатели надежности:

коэффициент готовности: вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени;

коэффициент оперативной готовности: вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени;

коэффициент технического использования: отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

5. Резервирование. Основные понятия

Резервирование: способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и/или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций;

резерв: совокупность дополнительных средств и/или возможностей, используемых для резервирования;

основной элемент: элемент объекта, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва;

резервный элемент: элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего;

кратность резерва: отношение числа резервных элементов к числу основных элементов, выраженное несокращенной дробью;

нагруженный резерв: резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента;

облегченный резерв: резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент до начала выполнения ими функций основного элемента;

ненагруженный резерв: резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента;

постоянное резервирование: резервирование, при котором используется нагруженный резерв, и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений;

резервирование замещением: резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только при отказе основного элемента;

общее резервирование: резервирование, при котором резервируется объект в целом;

раздельное резервирование: резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы;

смешанное резервирование: сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте;

мажоритарное резервирование: резервирование, при котором в нагруженном режиме находится нечетное количество не менее трех однотипных элементов и результатом работы объекта принимается одинаковый результат работы большинства основных элементов.

Состав и общие правила задания требований по надежности регламентируются ***ГОСТ 27.003-2016*** Надежность в технике (ССНТ).

6. Фундаментальные понятия теории безопасности

Для ССС такими понятиями являются «отказ» и «опасное состояние» [3].

Отказоустойчивость – способность системы продолжать функционировать, имея отказы различных элементов.

Опасное состояние для систем АЭС – чрезвычайное состояние, при котором возник ущерб «большого масштаба» (коллапс).

Под **опасностью** понимается способность системы переходить в опасное состояние.

Под **безопасностью** понимается способность системы функционировать, не переходя в опасное состояние.

Авария – происшествие с техникой, наносящее вред допустимого масштаба.

Безаварийность – способность системы функционировать без аварий.

Катастрофа – происшествие, сопровождающееся гибелью или пропажей людей.

Отказ по отношению к системе – синоним опасного состояния.

ЛЕКЦИЯ № 4

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Общие понятия о живучести систем электрической части электростанций

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Взаимосвязь надежности и живучести.
2. Методы повышения живучести технических систем.
3. Понятие коэффициента живучести систем ЭЧ ЭС.
4. Алгоритм расчёта коэффициента живучести системы методом перебора состояний.

1. Взаимосвязь надежности и живучести

Существует промежуточное понятие между надежностью и безопасностью, которое называется ***живучесть*** – способность системы сохранять свойства, необходимые для выполнения заданного назначения, при форсмажорных поражающих воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации (авариях, взрывах, пожарах, землетрясениях, наводнениях и пр.)

Недопустима подмена понятий живучести и безопасности понятием надёжности, т.к. надёжная система может оказаться и неживучей и опасной. Необходимость разделения этих понятий объясняется желанием уметь рассчитывать количественные показатели с целью выбора лучшей системы или целенаправленного её совершенствования. Если надёжность является характеристикой системы при нормальных условиях эксплуатации, то показатели живучести должны характеризовать систему при экстраординарных воздействиях. Безопасность же системы проявляется при её взаимодействии с другими системами или с обслуживающим персоналом и окружающей средой.

Всё универсальное множество состояний системы с точки зрения надёжности можно разделить на два непересекающихся подмножества: работоспособных ***A*** и неработоспособных ***B*** состояний. Граница разделения этих подмножеств зависит от задачи, поставленной перед системой, и её структуры. Области ***A*** и ***B*** полностью описываются логическими функциями работоспособности и неработоспособности системы [4]. Для живучести области работоспособных и отказовых состояний будут полностью совпадать с соответсвующими областями ***A*** и ***B*** надёжности, когда и в надёжности, и в живучести рассматриваются одни

и те же ***m*** элементов системы. При изменении состава и числа структурных элементов изменится и анализ живучести. С точки зрения безопасности, области безопасных и опасных состояний в общем случае не совпадают с областями работоспособных и отказовых состояний, т.е. опасные состояния возможны не только среди неработоспособных состояний ***B***, но и среди работоспособных состояний ***A*** [5].

Надежность – комплексное свойство, состоящее в общем случае из безотказности, ремонтопригодности, долговечности, сохраняемости и готовности. Для объектов, которые являются потенциальным источником опасности, важными понятиями являются безопасность и живучесть.

Безопасность – свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

Под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из- за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов [5].

Для анализа свойств живучести и для синтеза систем ЭЧ электростанций, с заданными свойствами живучести необходимо иметь адекватную количественную оценку живучести, что, в свою очередь, требует выработки понятия «живучесть системы.

В литературе и среди специалистов можно встретить разделение живучести на:

- *эксплуатационную* – свойство объекта, состоящее в его приспособленности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта;
- *при наличии катострофических внешних факторов*: стихийные бедствия, катаклизмы, поражающая сила военного оружия - свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации.

При этом предлагаются различные количественные показатели.

Одним из возможных вариантов расчета живучести ЭЧ ЭС по аналогии с расчетом её надежности является логико-вероятностный метод. При расчете живучести этим методом задача распадается на два этапа. На первом этапе составляется логическая функция работоспособности системы, а на втором осуществляется переход к вероятностной функции.

Возникает вопрос. Каковы же методологические особенности второго этапа расчета живучести по сравнению с расчетом надежности?

При расчете надежности вероятностная функция обусловлена уровнем безотказности элементов системы и в общем случае является функцией времени. Вероятностные характеристики надежности элементов системы рассчитываются с помощью общеизвестных статистических методов.

Для анализа живучести не представляется возможности получить аналогичные статистически устойчивые вероятностные характеристики элементов как функции времени. Неблагоприятные воздействия труднопредсказуемы как по интенсивности и месту возникновения, так и по времени. Поэтому *на втором этапе анализа живучести целесообразно рассчитывать вероятностные функции не от времени, а от числа неблагоприятных (поражающих) воздействий.* Различная физическая природа вероятностных характеристик надежности и живучести исключает их сопоставление, но не исключает использование аналогичных математических методов [5].

В качестве исходных данных при анализе живучести должны быть характеристики поражающих воздействий и характеристики уязвимости элементов системы при этих воздействиях, которые могут быть получены экспериментальным или расчетным путями. При анализе живучести исходят из наличия экстремальных условий, и решать вопрос: будет ли система работоспособна или нет в этих условиях.

Четкое разделение понятий надежности и живучести необходимо для построения адекватных моделей, позволяющих анализировать каждое из этих свойств систем ЭЧ ЭС и принимать специальные меры по их улучшению.

Вопросы отказоустойчивости, безопасности и живучести, являющиеся основополагающими в создании гарантоспособных (надёжных) систем, остаются на сегодняшний день очень актуальными. Только системный подход к решению данной проблемы на всех этапах жизненного цикла систем (от формирования концепции до утилизации) позволит создавать системы с высоким уровнем гарантоспособности.

В настоящее время свойство живучести распространяют не только на военные технические системы, но и на системы повышенной опасности иного назначения. Следует ознакомиться с этим понятием более подробно. Существует множество подходов к трактовке понятия живучести критических инфраструктур.

Живучесть – свойство системы сохранять и восстанавливать способность к выполнению основных функций в заданном объеме и в течение заданной наработки при изменении структуры системы и/или алгоритмов и условий ее функционирования вследствие непредусмотренных регламентом нормальной работы неблагоприятных воздействий. В то же время су-

ществует и другое более естественное и понятное определение живучести. Живучесть – свойство сложной системы адаптироваться в изменяющихся условиях функционирования противостоять неблагоприятным воздействиям и достигать цели функционирования за счет изменения поведения и структуры. Электростанциям, как любым системам повышенной опасности с критической инфраструктурой, присущи определенная избыточность, адаптивность, отказоустойчивость и живучесть. Свойство живучести позволяет системе сохраняться целостной в условиях неблагоприятных воздействий (случайных или целенаправленных), влекущих разрушение структуры, нарушение целостности, снижение безопасности и качества функционирования [16].

2. Методы повышения живучести систем ЭЧ АЭС

Методы повышения живучести сложных технических систем связаны, как правило, с избыточностью. Избыточность системы включает в себя превышение минимально необходимого числа технических средств системы одновременно используемых для выполнения ее функционального назначения.

Структурная избыточность системы может быть введена на следующих уровнях организации системы: на уровне технических средств, функциональных блоков, на уровне функциональных связей и подсистем, которые при анализе живучести следует рассматривать как функциональные единицы живучести (ФЕЖ).

Методы повышения живучести по отношению к внешним вредным воздействиям, действующим на систему делятся на активные и пассивные. Активные методы направлены на ликвидацию внешних причин, стремящихся вывести систему из работоспособного состояния. Их на этапе разработки системы учитывать практически затруднительно. Основное внимание следует обратить на использование пассивных методов, которые предназначены для восстановления работоспособности системы, отказ которой может произойти вследствие отказа ее отдельных технических средств, блоков, подсистем под действием как внешних, так и внутренних вредных воздействий.

Пассивные методы повышения живучести систем должны базироваться на изменении параметров технических средств, введении их избыточного количества (резервирование), введении избыточного количества связей между техническими средствами (реконфигурация структурной схемы).

Среди классических методов резервирования, которые можно осуществить: общее и раздельное, постоянное, замещением или мажоритарное. Кроме того, следует выделить функциональное резервирование, при кото-

ром одни и те же элементы могут выполнять в случае необходимости различные функции в технической системе, а также резервирование одних функциональных элементов другими, в основу действия которых положены различные физические процессы [10].

Методы повышения живучести электроэнергетических систем позволяют увеличить количество состояний системы, при которых она остаётся работоспособной.

3. Понятие коэффициента живучести системы

Системы ЭЧ ЭС являются сложными техническими системами, работающими в реальном времени, потеря их работоспособности может привести к катастрофическим последствиям. Такие системы должны быть наделены свойствами живучести.

Чтобы технические системы обладали свойством живучести, они должны исключать влияние неисправностей технических средств системы на её нормальную работу, что можно обеспечить введением в систему различных видов избыточности относительно минимального функционально необходимого её состава.

Техническая система, имеющая свойство живучести, выполняет свои функции с заданными характеристиками (показателями качества функционирования), если в ней имеется некоторое количество неисправных функциональных элементов (технических средств), и характеристики системы постепенно ухудшаются при дальнейшем увеличении числа неисправных элементов. Такая система является отказоустойчивой до отказа некоторой кратности и постепенно деградирует при увеличении кратности отказов.

Для анализа свойств живучести технических систем, сравнительной оценки свойств живучести двух или нескольких технических систем и, наконец, для синтеза технических систем с заданными свойствами живучести необходимо иметь адекватную количественную оценку живучести.

В качестве такой оценки предлагается использовать вероятность уязвимости системы $Q_c(n)$ и вероятность неуязвимости системы $R_c(n)$ (коэффициент живучести) и соответствующие им функции живучести системы, которые характеризуют её способность сохранять работоспособность при нескольких достоверных отказах элементов системы при n – кратном воздействии неблагоприятных факторов, то есть отказоустойчивость системы.

В этом случае, проверка отказоустойчивости структуры проводится поочерёдным выводом из строя элементов по одному, по два и т. д. вплоть до максимально возможного числа m, то есть в отказовом состоянии окажутся все m элементов системы.

Предлагается рассмотреть подробнее понятие *коэффициент живучести системы*, предварительно введя понятия: функциональная единица живучести (ФЕЖ), обобщённый отказ *n*-й кратности [5].

Под *ФЕЖ* системы понимается техническое устройство, подсистема, блок, узел и другие устройства, неисправность которых локализуется средствами, обеспечивающими свойство живучести системы.

При исследовании живучести технической системы предполагается, что в ней может возникнуть отказ любой кратности (могут выходить из строя элементы по одному, по два и т. д.).

Отказ *n*-й кратности для всех возможных комбинаций ФЕЖ называется обобщённым отказом *n*-й кратности. Обозначим его как q^n.

Считаем, что в техническую систему введён обобщённый отказ первой кратности q^1, если рассматриваются состояния технической системы при последовательном отказе каждой функциональной единицы. Если исследуется состояние избыточной технической системы для последовательного отказа сочетаний из *m* ФЕЖ по *n* ($n \le m$), то есть C_m^n, то в систему вводится обобщенный отказ *n*-й кратности q^n.

Коэффициентом живучести $K_{ж}(q^n)$ технической системы для данного обобщённого отказа называется отношение числа работоспособных состояний к их общему числу:

$$K_{Ж}(q^n) = \frac{N_{PC}(n)}{C_m^n}, \qquad (1)$$

где $N_{PC}(n)$ – число работоспособных состояний технической системы для обобщенного отказа *n*-й кратности; *n* – кратность обобщённого отказа; C^n_m – общее число состояний системы; *m* – количество ФЕЖ системы.

4. Алгоритм расчёта коэффициента живучести системы методом перебора состояний

Необходимым и важным этапом при исследовании живучести технических систем является формирование условий работоспособности системы. Проще всего это осуществить, используя алгоритм формирования функции работоспособности системы (ФРС) через кратчайшие пути успешного функционирования (КПУФ) [3], [4]. Такая форма записи ФРС является дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ).

Сформировав ФРС в виде матрицы КПУФ, можно определить наличие или отсутствие КПУФ для данного набора отказавших ФЕЖ и получить число работоспособных состояний технической системы для обобщённого отказа *n* – й кратности методом простого перебора состояний системы. Затем по формуле (1) рассчитать коэффициент живучести системы для данного обобщённого отказа. Этот алгоритм достаточно трудоёмкий, его можно использовать при расчёте на ЭВМ, но для этого должна быть

разработана соответствующая программа. Необходимо осуществить переход от ФРС, сформированной в ДНФ к ФРС в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме (ОДНФ). Такой переход возможен с применением методов ортогонализации через отрицание и разность конъюнкций [3], [4].

Если условия работоспособности системы представлены логической ФРС в ортогональной форме, то число работоспособных состояний системы для обобщённого отказа *n*-й кратности можно определить, используя следующее аналитическое выражение [5]:

$$N_{PC}(n) = \sum_{j=1}^{L} C_{m-r_j}^{n-s_j}, \qquad (2)$$

где C_{m-rj}^{n-sj} – число работоспособных состояний системы, определённой одной *j*-й ортогональной конъюнкцией ранга r_j, содержащей s_j аргументов с отрицанием; *L* – количество ортогональных конъюнкций в ФРС.

При вычислении числа сочетаний следует иметь в виду принятые в математике условия:

$$0! = 1;\ C_m^0 = \frac{m!}{(0!(m-0)!)} = 1 \qquad (3)$$

$$C_{m-r_j}^{n-s_j} = 0, \text{если } n - s_j < 0 \text{ или } m - r_j < n - s_j \qquad (4)$$

В качестве примера вычисляется число работоспособных состояний системы, ФРС которой в ДНФ и ОДНФ определяется выражением(5):

$$Y(\vec{X}_8) = \begin{vmatrix} X1 & X3 & X5 & X7 & & \\ X1 & X3 & X4 & X6 & X7 & X8 \\ X2 & X4 & X6 & X7 & & \\ X2 & X3 & X4 & X5 & X7 & X8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X1 & X3 & X5 & X7 & & & & \\ X1' & X2 & X4 & X6 & X7 & & & \\ X1 & X2 & X3' & X4 & X6 & X7 & & \\ X1 & X2 & X3 & X4 & X5' & X6 & X7 & \\ X1 & X2' & X3 & X4 & X5' & X6 & X7 & X8 \\ X1' & X2 & X3 & X4 & X5 & X6' & X7 & X8 \end{vmatrix} \qquad (5)$$

для $n = 2$.

Для расчёта используется формула (2):

$$N_{PC}(2) = \sum_{j=1}^{6} C_{8-rj}^{2-sj} = C_4^2 + C_3^1 + C_2^1 + C_1^1 + C_0^0 + C_0^0 = 6 + 3 + 2 + 1 + 1 + 1 = 14$$

Общее число состояний системы $C_8^2 = 28$.

Коэффициент живучести данной системы при обобщённом отказе *2*-й кратности будет равен:

$$K_{\text{Ж}}(2) = \frac{N_{PC}(2)}{C_8^2} = \frac{14}{28} = 0{,}5.$$

Коэффициент деградации D – отношение числа состояний, соответствующих неработоспособной системе, к общему количеству состояний системы:

$$D = \frac{M}{C_m^n}\ , \qquad (6)$$

где M – число состояний, соответствующих неработающей системе; C_m^n – общее количество состояний системы; n – кратность отказа; m – количество функциональных единиц живучести системы.

Выживаемость системы $R(n)$ – вероятность сохранения работоспособности при n-кратном неблагоприятном воздействии:

$$R(n) = 1 - Q(n) = P\left\{F = \frac{1}{A_n}\right\}, \qquad (7)$$

где F – функция работоспособности системы, принимающая значение 1, если система работоспособна, и 0, если система неработоспособна; A_n – событие, происходящее при n-кратном появлении НВ.

Запас живучести (d-живучесть) d – критическое число дефектов, уменьшенное на единицу:

$$d = K - 1\ , \qquad (8)$$

где K – критическое число дефектов, которое определяет потерю работоспособности системы.

Запас живучести (m-живучесть) m – максимальное число дефектов, которое еще может выдержать система без потери работоспособности:

$$m = \max\,(i)\{m_i\}\,, \qquad (9)$$

где m_i – число дефектов i-й кратности, которое еще может выдержать система без потери работоспособности.

Задание 2.

Рассчитать коэффициент живучести системы, рассмотренной в лекции, для обобщённых отказов 1-й, 3-й и 4-й кратностей и построить график функции живучести, пример которого изображен на рис.5.

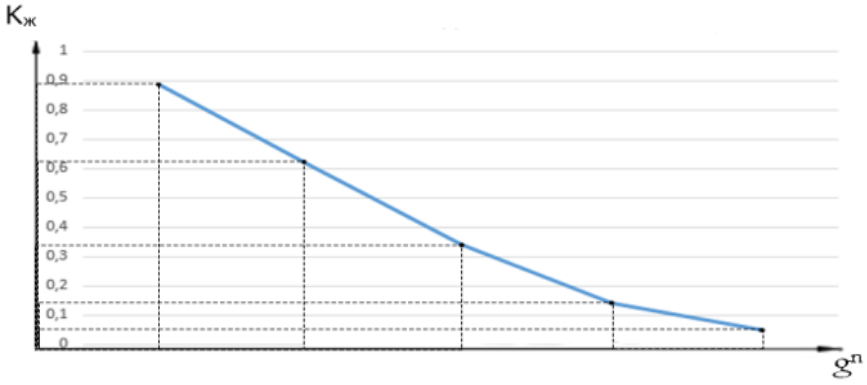

Рис. 5. График функции живучести $К_Ж(q^n)$

ЛЕКЦИЯ № 5

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Безопасность как высшая ступень эффективности функционирования в атомной энергетике

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Связь безопасности с надежностью и живучестью.
2. Основные цели и принципы безопасности АЭС.
3. Терминология теории безопасности атомных электростанций.

1. Связь безопасности с надежностью и живучестью

Понятия надежность и живучесть системы являются базовыми при рассмотрении вопросов, связанных с безопасностью электростанций, особенно АЭС. Термины "безопасность" и "безопасный" широко используются и в разговорной речи и в печати в рамках так называемой техники безопасности. Научная теория безопасности получила первоначальное развитие в авиации. В работах, посвященных проблемам обеспечения безопасности космических полетов, даются определения общей безопасности, как совокупности свойств противостоять совместному воздействию всех факторов, и частной безопасности, как способности противостоять одному из факторов. Такое определение безопасности приближается к определению живучести. При рассмотрении причины аварийных ситуаций анализируются отказы техники. В этом проявляется связь безопасности с надежностью.

Отсюда следует, что математический аппарат логико-вероятностных методов может быть использован и в теории безопасности. В первую очередь необходимо четко определить понятие опасного состояния и сформулировать требования, которым должен удовлетворять объект, чтобы его можно было отнести к безопасным.

Для объектов, которые являются потенциальным источником опасности, а к таковым относятся электростанции, важным понятием является безопасность. **Безопасность** - свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

Регламентированного понятия безопасность ЭЧ АЭС на сегодняшний день нет, поэтому можно предложить следующую формулировку понятия безопасность ЭЧ АЭС.

Безопасность ЭЧ АЭС - способность системы функционировать, не переходя в критические состояния, угрожающие здоровью и жизни людей, окружающей среды, другим техническим системам или наносящие другой ущерб в больших масштабах.

Тепловые (ТЭС) и атомные электростанции (АЭС), плотины и плотинные гидроэлектростанции (ГЭС), несмотря на свою красоту и экономическую полезность, являются объектами повышенной опасности для людей. Это связано не только с безопасностью обслуживающего персонала станции в случае аварии, но и с безопасностью людей, проживающих вблизи от этих объектов. В связи с этим данные объекты относятся к критическим инфраструктурам. Помимо случившихся в XX-XXI веках техногенных аварий на АЭС, ГЭС и других критических инфраструктурах, серия террористических актов, прокатившихся по миру в конце XX начале XXI столетия показала, что человечество вступило в новый этап, когда для решения важных политических задач в вооруженном противостоянии могут использоваться достаточно малочисленные боевые группы или даже отдельные «смертники».

В настоящее время в качестве цели, поражение которой может нанести огромный ущерб государству и ее гражданам, правильнее рассматривать не только военные, но и объекты гражданского сектора критического применения, в том числе и электростанции, выведение из строя которых, в том числе и за счет «каскадного эффекта», может привести к ущербу, сопоставимому с ударами, наносимыми вооруженными силами противника [16].

2. Основные цели и принципы безопасности АЭС

Современная философия обеспечения безопасности впервые наиболее четко сформулирована специалистами Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в "Основных принципах безопасности атомных станций" [11]. В этом документе рассматриваются цели и принципы, осуществление которых позволит достичь высокого уровня безопасности АС. При этом цели провозглашают, что должно быть достигнуто, а принципы - как должны быть реализованы эти цели.

К ***целям*** безопасности относятся:

1. Общая цель ядерной безопасности.

Цель: Защитить отдельных лиц, общество и окружающую среду путем создания и поддержания на атомной электростанции эффективных защитных мер от радиологической опасности.

2. Цель радиоактивной защиты.

Цель: Обеспечить, чтобы при нормальной эксплуатации дозы облучения на станции и в результате любого выброса радиоактивного

материала со станции находились на разумно достижимом низком уровне и ниже установленных пределов, и обеспечить уменьшение дозы облучения в результате аварий.

3. Техническая цель безопасности.

Цель: Предотвратить с высокой достоверностью аварии на атомных станциях; обеспечить, чтобы для всех аварий, учитываемых в проекте станции, даже для тех, вероятность которых крайне мала, радиологические последствия были бы малы или отсутствовали, и обеспечить, чтобы вероятность больших радиологических последствий тяжелых аварий была чрезвычайно мала.

Для существующих атомных станций на сегодняшний день выдвинуто требование, чтобы число повреждений активной зоны не превышало 10 на год эксплуатации станции.

Специалисты МАГАТЭ сформулировали *три вида фундаментальных принципа* обеспечения безопасности АС: принципы управления, принцип «глубокой эшелонированной защиты» и технические принципы.

Принципы ***управления*** включают три фундаментальных принципа управления:

1. Культура безопасности.

Принцип: Все лица и организации, причастные к ядерной энергетике, руководствуются в своих действиях и взаимоотношениях установленной культурой безопасности.

Устанавливаются четкие границы ответственности и линии связи; разрабатываются обоснованные руководства; обеспечивается четкое выполнение этих руководств; проводится внутренняя экспертиза деятельности, связанной с безопасностью; при подготовке и обучении персонала прежде всего подчеркиваются причины установления принятой практики обеспечения безопасности, а также последствия для безопасности, к которым ведут недостатки в выполнении персональных обязанностей.

2. Ответственность эксплуатирующей организации

Принцип: Окончательная ответственность за безопасность атомной электростанции лежит на эксплуатирующей организации. Она никаким образом не уменьшается в связи с самостоятельной деятельностью проектировщиков, поставщиков, строителей и регулирующих организаций.

Как только эксплуатирующая организация вступает во владение станцией, она берет на себя все заботы и, обладая соответствующими полномочиями, несет полную ответственность за запланированную деятельность по производству электроэнергии.

3. Нормативное регулирование (контроль) и независимая проверка

Принцип: Правительство устанавливает правовую основу для ядерной промышленности и создает независимую регулирующую организацию, на

которую возлагается ответственность за лицензирование и нормативный контроль АЭС и за проведение в жизнь соответствующих правил.

Деятельность регулирующего органа охватывает следующие функциональные обязанности:

- определение и разработку стандартов и правил по безопасности;
- выдачу лицензий эксплуатирующим организациям на основе независимых оценок безопасности;
- инспектирование, контроль и экспертизу характеристик безопасности атомных станций и эксплуатирующих организаций;
- требование от эксплуатирующей организации осуществления корректирующих действий, когда это необходимо для безопасности, и принятие мер принудительного характера, если не достигнуты приемлемые уровни безопасности, включая в случае необходимости лишение лицензии;
- поддержка исследований по безопасности;
- распространение информации о безопасности.

Принцип ***"глубоко эшелонированной защиты"*** лежит в основе всей технологии безопасности АЭС. Реализация этого принципа направлена на решение *двух главных задач* обеспечения безопасности АЭС: предотвращение аварий и ослабление последствий аварий:

1. Предотвращение аварий.

Принцип: В обеспечении безопасности первоочередное внимание уделяется предотвращению аварий, особенно, которые могли бы привести к серьезному повреждению активной зоны.

2. Ослабление аварий.

Принцип**:** На станции и за ее пределами предусмотрены и подготовлены меры по ослаблению, которые могли бы существенно уменьшить последствия аварийного выхода радиоактивного материала.

Глубоко эшелонированная защита включает ряд последовательных барьеров на пути выхода радиоактивных материалов в окружающую среду.

Глубоко эшелонированная защита помогает обеспечить осуществление трех функций безопасности (управление мощностью, охлаждение топлива и удержание радиоактивного материала) и предотвратить вынос радиоактивных материалов к человеку или в окружающую среду.

В соответствие с принципом глубоко эшелонированной защиты при нормальной работе станции на мощности все уровни защиты всегда должны быть работоспособны.

Основными ***техническими*** принципами безопасности АЭС являются:

1. *Апробированная инженерно-техническая практика.*

Принцип: Техническая деятельность, осуществляемая на атомной электростанции, основывается на инженерно-технической практике,

проверенной испытаниями и опытом, и отраженной в утвержденных нормах и стандартах и другой соответствующей документации.

2. *Обеспечение качества*.

Принцип: Обеспечение качества осуществляется во всех видах деятельности АЭС как часть всеобъемлющей системы, гарантирующей с высокой достоверностью соответствие всей продукции, услуг и выполняемых работ установленным требованиям.

3. *Человеческий фактор*.

Принцип: Персонал, занимающийся деятельностью, воздействующей на безопасность АЭС, полностью подготовлен и соответствующим образом аттестован для выполнения своих функций. В дополнение к этому, принимая во внимание возможность ошибки человека при эксплуатации АЭС, облегчается принятие операторами правильных решений и затрудняется принятие неправильных, а также обеспечиваются средства для обнаружения, корректирования или компенсации ошибки.

4. *Оценка и проверка безопасности*.

Принцип: До начала строительства и эксплуатации станции делается оценка ее безопасности. Эта оценка хорошо документируется и подвергается независимому рассмотрению. Оценка обновляется в свете новой существенной информации по безопасности.

5. *Проектирование*.

Использование опыта эксплуатации и исследований по безопасности. Большинство аспектов безопасного проекта тесно связано с тремя функциями, которые защищают от выброса и распространения радиоактивных материалов:

- управление мощностью реактора;
- охлаждение топлива;
- удержание радиоактивных материалов внутри соответствующих физических барьеров.

МАГАТЭ считает, что сами цели и принципы в [11] не являются нормативными требованиями, однако, национальные нормативные документы по безопасности должны отражать цели и принципы в виде конкретных требований.

В этой связи разработаны и введены в действие с 1 июля 1990 года "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций " (ОПБ-88) [15].

В заключение следует отметить, что одной из первоочередных проблем является создание стройной, четкой теории безопасности АЭС. Эта теория должна давать ясные рекомендации практике обеспечения безопасности АЭС на всех этапах проектирования, изготовления и эксплуатации.

Основными разделами теории безопасности должны быть:

- терминология и критерии безопасности;
- факторы, влияющие на безопасность;
- нормирование требований к количественным показателям безопасности АЭС;
- математические методы и модели теории безопасности;
- принципы обеспечения безопасности;
- качественный и количественный анализ безопасности АЭС, в том числе и ее электрической части;
- синтез безопасности АЭС по критериям надежности, живучести и экономической эффективности;
- методы прогнозирования, выявления, локализации, предотвращения и устранения аварийных ситуаций на АЭС;
- надежность систем обеспечения безопасности АЭС в том числе их бесперебойного питания;
- безопасность АЭС как эргатической системы (взаимодействие субъекта и объекта труда, «человек-машина»;
- управление безопасностью как составной частью управления качеством АЭС.

3. Терминология теории безопасности атомных электростанций

Центральным понятием теории безопасности АЭС является понятие "**авария**".

Авария - событие, связанное с нарушением пределов безопасной эксплуатации АС.

Пределы безопасной эксплуатации - установленные значения технологического процесса, отклонение от которых может привести к выходу радиоактивных продуктов и (или) ионизирующих излучений за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации границы.

Согласно ОПБ-88 **авария** - нарушение эксплуатации АС, при котором произошел выход радиоактивных продуктов и (или) ионизирующих излучений за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные пределы эксплуатации.

Аварии на АЭС характеризуются исходным событием, путями протекания и последствиями. При этом необходимо отметить, что авария-событие *случайное*, поэтому для описания закономерностей возникновения и протекания аварий должен применяться математический аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Аварии в ядерной технологии принято классифицировать на радиационные, ядерные, технические, проектные и запроектные.

Радиационной аварией считается выход радиоактивных продуктов или ионизирующего излучения за предусмотренные границы в количествах, превышающих значения для нормальной эксплуатации, требующих прекращения нормальной эксплуатации АЭС.

Ядерная авария - это авария, связанная с повреждением ТВЭЛов и превышающая установленные пределы безопасной эксплуатации.

Технической аварией на АЭС считается разрушение (разрыв) в процессе эксплуатации оборудования и трубопроводов, работающих под давлением, подлежащих регистрации в органах государственного надзора, а также выход из строя электрооборудования, вызвавшего останов энергоблока на срок более 10 суток для ремонта.

Запроектные аварии АЭС - события, для которых нет технических средств, ограничивающих радиоактивные поступления за пределы АЭС.

Для проектной аварии предусмотренные на АЭС системы безопасности (СБ) обеспечивают ограничение последствий с учетом принципа единичного отказа СБ или одной, независимой от исходного события, ошибки персонала АЭС.

Уменьшение последствий запроектных аварий достигается управлением аварией и (или) реализацией планов мероприятий по защите персонала и населения. Для этих действий используются любые работоспособные технические средства, предназначенные для нормальной эксплуатации, для обеспечения безопасности при проектных авариях или специально предназначенные для уменьшения последствий запроектных аварий.

Последовательность состояний элементов и систем АЭС в процессе развития аварии носит название **пути протекания аварии.**

Анализ причин и хода развития происшедших аварий показывает, что независимо от времени, типа производств и региона они ***подчиняются определенным закономерностям*** [3].

Как правило, аварии предшествует *первая фаза* накопления каких-либо дефектов в оборудовании или отклонений от номинальных процедур ведения процесса. Длительность этой фазы может измеряться минутами или годами. Сами по себе указанные дефекты и отклонения еще не представляют угрозы, но в критический момент они играют роковую роль. Накопление подобных отклонений связано с отсутствием диагностики для наблюдения за работой отдельных элементов и с привыканием обслуживающего персонала к таким отклонениям.

Вторая фаза – фаза инициирующего (неожиданного, редкого) события, в результате которого система быстро (взрывным образом) попадает в опасное состояние, наносящее ущерб «большого масштаба». У

людей не оказывается ни времени, ни средств для эффективных действий в эти мгновения.

Наконец, *третья фаза* развития аварии, в течение которой человеческий фактор может сыграть ключевую роль: активные и грамотные действия приведут к уменьшению ущерба, в противном случае – к его возрастанию.

Другим центральным понятием теории безопасности является понятие **безопасность АЭС.** Под безопасностью понимается свойство АЭС ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами, как при нормальной эксплуатации, так и в случае аварий.

Повышение безопасности всегда являлось одним из приоритетных мотивов в деятельности людей. В проблеме безопасности выходят на первый план неучтённые в теории надежности компоненты, а именно: среда, в которой функционирует система; защитные сооружения; неблагоприятные внешние воздействия; безответственные или умышленные действия людей.

Оценка риска аварий атомных электростанций привела к отказу от концепции «абсолютной» безопасности, т.к. вероятностный анализ риска конкретной АЭС, например, в США требует затрат более 2 млн долларов и 10 - 20 человеко-лет.

По аналогии с классификацией аварий различают радиационную, ядерную и техническую безопасность.

Весьма важным понятием является **эксплуатация АЭС.** Дословно *эксплуатация - это применение объекта по назначению*. Эксплуатация АЭС включает в себя все виды технического обслуживания.

ЛЕКЦИЯ № 6

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Оценка безопасности электроэнергетических систем

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Общее представление о задачах, решаемых с помощью теории безопасности.
2. Простейшие модели оценки безопасности электроэнергетических систем с помощью дерева отказов
3. Построение дерева отказов и процедура его анализа

1. Общее представление о задачах, решаемых с помощью теории безопасности

На этапе проектирования сложных энергосистем основными задачами являются построение рациональной структуры и определение алгоритмов функционирования. Решение этих задач зависит от интуиции и опыта практической работы конструкторов, причем однозначное решение найти практически затруднительно. Всегда существуют альтернативные варианты построения системы, допускающие возможность модификаций. Следовательно, фактический выбор наиболее рациональной структуры системы производится путем перебора и сравнения различных вариантов.

На этом этапе важной задачей является создание простой, но достаточно точной математической модели реальной системы. Необходимая точность математической модели зависит от достоверности исходных данных, хотя их недостоверность не является основанием для отказа от проведения оценок эффективности функционирования системы, несмотря на их относительный характер. Кроме того, для сложных систем проведение сравнительных расчетов надежности весьма полезно и при полном отсутствии статистической информации, в т.ч. для случаев, когда элементы системы используются в принципиально новых режимах работы [6].

При проектировании сложных энергосистем необходимо рассмотреть все множество опасных состояний и логику их возникновения, т.е. знать, как, при каких обстоятельствах могут возникнуть пожар, взрыв, разгерметизация и прочие разрушения. Это позволит принять соответствующие меры защиты, а также разработать безопасный алгоритм управления системой.

В связи с недостатком полной и достоверной информации и невозможностью проведения полноценных экспериментов для оценки безопасности единственным выходом является составление математической модели с разработкой сценариев, включающих все возможные варианты развития аварийных ситуаций.

2. Простейшие модели оценки безопасности электроэнергетических систем с помощью дерева отказов

В изучении вопросов обеспечения безопасности объектов и людей довольно широкое распространение получили диаграммы влияния с ветвящейся структурой и дополнительными логическими свойствами (условиями), называемые деревом событий – отказов, происшествий, имеющие следующие достоинства [6]:

- сравнительная простота построения;
- направленность на отражение присущих объекту, для которого они выполнены, существенных факторов и свойств;
- дедуктивный характер выявления причинно-следственных связей исследуемых явлений и процессов;
- лёгкость трансформации таких моделей, изменение композиции дерева и процесса его изучения;
- наглядность реакции изучаемого объекта (системы) на изменения.

С помощью таких диаграмм, возможно, достаточно качественно анализировать исследуемые объекты, довольно легко выполнять их дальнейшую формализацию и алгоритмизацию, приспосабливая их тем самым к обработке средствами вычислительной техники. Следует применять методы статистического моделирования и количественной оценки изучаемых процессов, явлений, свойств объектов исследования.

При создании дерева главным является определение его структуры. Она складывается из следующих составляющих:

а) *элементов* – основного события (происшествия) и предшествующих этому событию предпосылок;

б) *связей между элементами* – логических условий, соблюдение которых необходимо и достаточно для возникновения основного события.

Как показывает анализ структуры дерева, основными компонентами диаграммы влияния служат *узлы* (вершины) и *связи*, характеризующие отношения между ними. В качестве узлов подразумеваются *элементы* моделируемых объектов: состояния, свойства, события (переменные или константы). А в качестве связей выступают работы, активности ресурсы и другие возможные взаимодействия. Связи или отношения между переменными и (или) константами в узлах диаграммы графически

показывают с помощью линий, которые называются дугами или рёбрами. Каждые два узла, соединенные между собой, образуют ветвь диаграммы.

Составление деревьев специального типа, т.е. деревьев-исходов, являющихся вероятностными графами, позволяет учитывать влияние на объекты различных разрушительных воздействий, например, взрывов, излучений или разной природы полей, высвободившихся в результате происшествия. С использованием построенных диаграмм – графов, сетей, сценариев – могут быть созданы математические модели аварийности и травматизма.

Дерево события представляет собой неориентированный граф, являющийся связным и конечным. Каждая пара вершин в нём должна быть связанной, т.е. соединённой цепью, при этом все соединения не должны образовывать петель (циклов), когда каждый узел является общим для двух ветвей. Т.е. они должны содержать маршруты, вершины которых одновременно являются началом одних и концом других цепей.

Структура дерева происшествия строится следующим образом. Обычно она включает размещаемое сверху одно нежелательное событие: авария, несчастный случай, катастрофа, и т.д. Оно соединяется с набором предпосылок ему – соответствующих инициирующих условий – отказов, ошибок, негативных внешних воздействий, образующих цепи или ветви. Листьями на ветвях дерева происшествий служат предпосылки – это фактические инициаторы причинных цепей, рассматриваемые как постулируемые исходные события, дальнейшую детализацию которых считают нецелесообразной. В качестве узлов дерева происшествия могут служить отдельные события или состояния, а также логические условия их объединения – сложения, перемножения [6].

Определения и символы, используемые при построении дерева (сценария) происшествия:

Схема «**И**» (схема совпадения). Сигнал на её выходе появляется только тогда, когда на входы поступают все входные сигналы.

Схема «**ИЛИ**» (схема объединения). Сигнал на выходе этой схемы появляется при поступлении на какой-либо вход любого одного сигнала, или при поступлении на входы большего числа сигналов.

3. Построение дерева отказов и процедура его анализа

Дерево отказов (ДО) – это топологическая модель безопасности. В нём отражены логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями, в качестве которых выступают первичные или результирующие отказы. Совокупность исходных событий ведёт к главному анализируемому событию. Дерево отказов, таким

образом, представляет собой ориентированный граф, построенный в виде подобия дереву [6].

Цель построения дерева отказов состоит в символическом представлении условий, существующих в системе и способных вызвать её отказ. Дерево позволяет в явном виде указывать на слабые места в системы, оно является наглядным средством представления ситуации и обоснования принимаемых для нейтрализации опасностей решений. Дерево полезно в качестве средства для исследования и поиска возможных разумных, часто компромиссных соотношений в исследуемом объекте и (или) для анализа и установления степени соответствия конструкции объекта (устройства, системы) заданным (предъявляемым) требованиям. У ДО различают пять разных типов вершин:

- отображающие первичные отказы;
- отображающие вторичные или результирующие отказы;
- отображающие локальные отказы, не влияющие на возникновения других отказов;
- соответствующие операции логического объединения случайных событий (ИЛИ);
- соответствующие операции логического произведения случайных событий (И).

У ДО каждой отображающей первичный или результирующий отказ вершине соответствует определенная вероятность возникновения отказа.

К существенным преимуществам ДО относится то обстоятельство, что их анализ ограничивается выявлением только тех инициирующих условий систем и событий, которые приводят к постулируемым отказам или авариям. Чтобы определить, произойдёт ли отказ (рассчитать вероятность отказа), необходимо найти их аварийные сочетания. Для этого проводят качественный, а затем количественный анализ ДО.

Итак, в структуре ДО имеется одно головное событие (авария, какой-то инцидент и т.п.), которое соединяется с рядом других, ниже стоящих событий – отказов, ошибок, неблагоприятных внешних воздействий. Нижестоящие события образуют причинные (причинно-следственные) цепи, т.е. они служат элементами в сценариях аварий. Для связи между событиями в узлах деревьев используют знаки «И» и «ИЛИ». Поскольку логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий, то это соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события. А если в дереве использован знак «ИЛИ», то это означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения даже одного из нижестоящих событий. Это соответствует сложению вероятностей нижестоящих событий для оценки вероятности вышестоящего события.

Прежде, чем приступить к построению дерева неисправностей необходимо тщательно изучить объект (устройство, систему). Если предполагаются конкретные цели анализа дерева, то в зависимости от содержания этих целей для его построения используют разные методы. К таким методам относятся методы первичных отказов, вторичных отказов, инициированных отказов.

Наиболее удобно и полно многообразие причин травматизма и аварийности представляется в виде диаграммы, отражающей процесс появления и развития (активации) цепи инициирующих условий. Основными составляющими диаграмм причин или опасностей являются узлы (вершины) и взаимосвязи между ними. В качестве узлов выступают инициирующие условия: события, состояния и свойства элементов рассматриваемой системы и логические условия их трансформации «И» и «ИЛИ».

Операция «И» означает, что перед тем, как произойдет некоторое событие *А*, должно произойти несколько событий, например, *Б* и *В* и в вероятностном аспекте выражается логическим произведением $P(A) = P(Б)\cdot P(B)$.

Действие операции «ИЛИ» означает, что некоторое событие *Г* будет иметь место, только если произойдёт хотя бы одно из нескольких событий или же больше, чем одно, в том числе все события.

Пусть произошли события *Д* и *Е*. В таком случае вероятность возникновения события *Г* имеет вид алгебраической суммы $P(Г) = P(Д) + P(Е) – P(Д)\cdot P(Е) \approx P(Д) + P(Е)$, т.к. $P(Д)\cdot P(Е)$ очень мало.

Пример 1: Гибель человека от электрического тока может произойти при включении его тела в электрическую цепь с достаточными для этого силой тока и временем воздействия тока на организм человека. Значит для того, чтобы произошел несчастный случай (головное событие *А*), необходимо одновременное существование следующих условий:

- событие *Б* – наличие высокого напряжения на корпусе электрической установки;
- событие *В* – сам факт появления человека на токопроводящем основании, соединённом с землёй;
- событие *Г* – касание телом человека корпуса электроустановки в течение достаточного времени.

Событие *Б* может явиться следствием любой из двух причин (*Z*): Z_1 или Z_2, где Z_1 – снижение сопротивления изоляции токоведущих частей электроустановки, а Z_2 – касание токоведущими частями установки корпуса этой же электроустановки.

Событие *В* также должно быть обусловлено двумя инициирующими условиями: Z_3 – появлением человека на токопроводящем основании; Z_4 – касание телом человека заземленных элементов в помещении.

Событие *Г* является следствием появления одного из трёх инициирующих условий: Z_5 – потребности ремонта; Z_6 – потребности в техобслуживании; Z_7 – использования электроустановки по назначению (нормальной эксплуатацией электроустановки).

Анализ диаграммы опасного состояния направлен на выявление минимально необходимых и достаточных условий для возникновения головного события *А*. В данном случае выражение условия реализации несчастного случая имеет следующий вид:

$$P(A)= P(Б)\cdot P(В)\cdot P(Г) = (P(Z_1)+P(Z_2))\cdot(P(Z_3)+P(Z_4))\cdot(P(Z_5)+P(Z_6)+P(Z_7))$$

Дерево причин поражения электрическим током показано на рис. 6.

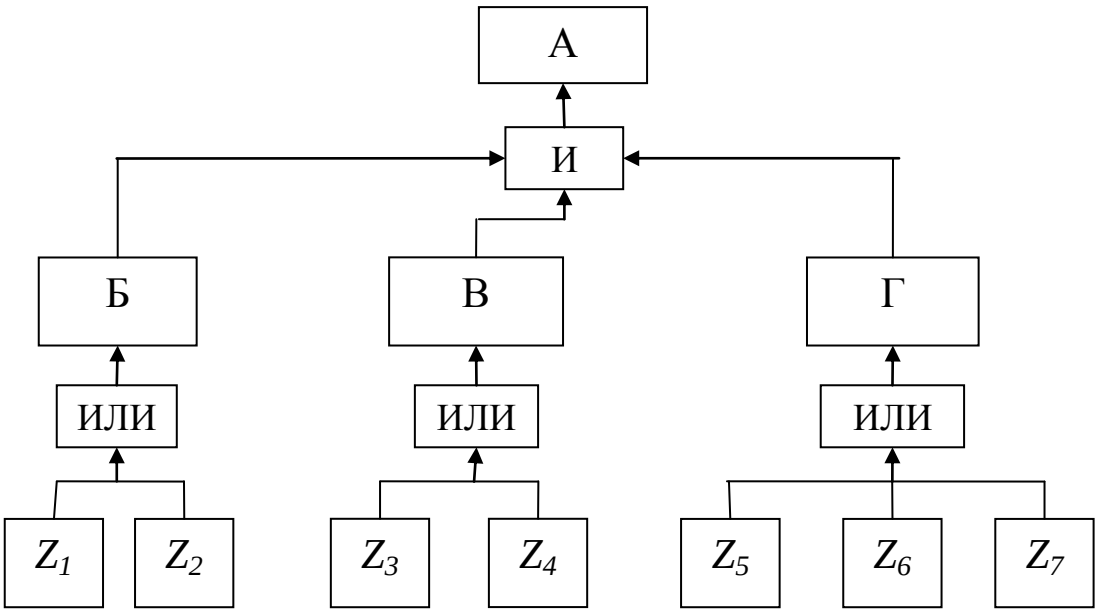

Рис. 6. Дерево причин поражения электрическим током

Задание.

Изобразить диаграммы для предложенных состояний систем.

- *Имеется простая система – помещение, в котором находятся электрическая лампочка и выключатель. Считается, что отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, и, значит, завершающим событием является отсутствие освещения в комнате. Основными или первичными событиями дерева отказов являются:*

- отказ источника питания Z_1; отказ предохранителя Z_2;

- отказ выключателя Z_3; перегорание лампочки Z_4.

- *Имеется система с завершающим событием, которым является прекращение выработки электроэнергии генератором, обусловленное следующими событиями: отказ выключателя (отсутствие замыкания контактов), неисправности внутренних цепей двигателя, источника питания и предохранителя.*

ЛЕКЦИЯ № 7

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: ***Основы логико-вероятностной теории безопасности электроэнергетических систем***

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. О разработке основ теории безопасности структурно-сложных систем.
2. Аналитические и графические формы представления опасного состояния системы в ЛВТ безопасности.
3. Алгоритм расчета опасного состояния структурно-сложной энергосистемы.

1. О разработке основ теории безопасности структурно-сложных систем

Крупнейшие аварии и катастрофы, произошедшие в мире, выявили существенную роль и значимость научных разработок по теории безопасности. В нашей стране таким мощным толчком стала авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года.

Академик В.А. Легасов так оценивал обстановку с безопасностью в то время: «…в руках квалифицированных людей наши аппараты казались и надёжными, и безопасно эксплуатируемыми. Беспокойство о повышении безопасности атомных станций казалось надуманным вопросом, потому что это была среда высококвалифицированных специалистов, они были убеждены, что вопросы безопасности решаются исключительно квалификацией и точностью инструктирования персонала… Я не видел ни одного в Советском Союзе коллектива, который мало-мальски компетентно ставил бы и рассматривал эти вопросы».

Другой академик – Ю.Н. Руденко – в 1986 г. писал: «…Часто проблема безопасности в энергетике ассоциируется с безопасностью работы АЭС, поскольку АЭС вследствие аварии может оказаться источником радиационного заражения большой территории. Однако за почти 30-летний период эксплуатации АЭС таких аварий, в силу используемых конструктивно-технологических принципов практически не было: в процессе нормальной эксплуатации АЭС загрязнение окружающей среды на несколько порядков меньше загрязнения, создаваемого электростанциями, работающими на угле. Поэтому, говоря о проблеме безопасности в энергетике, следует иметь в виду не только и даже не столько АЭС, а средства добычи (производства,

получения), переработки (преобразования), передачи, хранения и распределения различных видов энергии и энергоносителей».

«Советские АЭС – абсолютно безопасные», - говорил в своё время и академик А.П. Александров.

В конце 1980-х годов была сформулирована Государственная научно-техническая программа (ГНТП) «Безопасность». Её целью была разработка научных основ, методов, системы нормативно-технических средств, обеспечивающих безопасность населения и окружающей среды, функционирования и развития народнохозяйственных объектов с учётом риска возникновения природных, техногенных и природно-техногенных аварий и катастроф с региональными и глобальными экономическими и экологическими последствиями. Работы по программе начаты в 1991 г. под руководством академика К.В. Фролова.

Принципиально новый подход, реализуемый в ГНТП «Безопасность» состоит в том, что «…реальное обеспечение безопасности человека, сложных технических систем и окружающей среды возможно только на путях постановки на национальном, региональном и международном уровнях четырёх базовых проблем:

- разработка фундаментальных основ теории техногенных и природных аварий и катастроф, теории защиты и безопасности;
- переход к проектированию, созданию и эксплуатации потенциально опасных производств и объектов на базе новых критериев, методов и средств обеспечения безопасности;
- создание методов и средств оповещения, защиты и спасения людей, а также ведения восстановительных работ в зонах возникновения и развития катастроф;
- создание единой национальной, региональной и международной нормативно-законодательной базы по техническому, правовому и экономическому регулированию вопросов безопасности».

Если в качестве предшествующего знания принять знания (теории) о надёжности и живучести сложных систем, то объединяющим началом с безопасностью может стать вопрос и о возможности количественной оценки этого свойства сложных систем.

Научный подход к проблеме безопасности требует проведения комплексного анализа, классификации аварий и катастроф с учётом характера и размера их последствий, основных поражающих факторов; учёта предельных параметров прочности, износостойкости, виброактивности, акустики, сейсмостойкости, механики разрушения, надёжности, риска и живучести технических объектов, персонала и окружающей среды. Для решения указанных вопросов необходимы соответствующие методы моделирования на ЭВМ, физические модели возникновения и развития катастроф и т.д. [3].

Требования к процессу создания систем с учётом теории безопасности:

1. Объективное определение тех инициирующих условий, которые вносят наибольший вклад в «копилку» опасности, т.е. определение факторов, принадлежащих приоритетному учёту.

2. Обнаружение комбинаций, предотвращающих попадание системы в опасное состояние, т.е. нахождение самых выгодных средств защиты от ЧС.

3. Оценки возможного риска создаваемой системы в конкретной ситуации.

2. Аналитические и графические формы представления опасного состояния системы в ЛВТ безопасности

По аналогии с теорией надёжности [3], где всё начинается с уяснения понятия работоспособности системы, в теории безопасности, наоборот, требуется в каждом конкретном случае дать описание возможного сценария опасного состояния (СОС). СОС выявляет, каким образом может возникнуть ущерб «большого масштаба»: от взрыва, пожара, затопления, разгерметизации в технике, массопотоков природных вод, сейсмичности региона, экзогенных геологических процессов в природе.

Одним из эффективных направлений в теории безопасности технических систем является *логико-вероятностная теория (ЛВТ) безопасности*. Под ЛВТ понимаются основные знания по расчетам риска возникновения аварий и катастроф структурно сложных систем, базирующиеся на логическом представлении развития опасных состояний и математических методах вычисления истинности функций алгебры логики [3].

Возможные опасности часто носят потенциальный, т.е. скрытый характер. Условия реализации потенциальной опасности необходимы для её возможного проявления, они являются причинами этой опасности и называются *инициирующими условиями (ИУ)*.

Опасность – тревожное состояние, являющееся следствием некоторой причины или группы причин (ИУ), которые в свою очередь могут являться следствием другой причины или группы причин (ИУ). Т.е. образуются разветвлённые взаимосвязи, отображаемые графами в виде *сценария опасного состояния*, состоящего из инициирующих условий, имеющих *разную физическую сущность* и представляющих собой деревья событий, причин, отказов, опасностей, неисправностей и т.п. В качестве ИУ могут быть короткие замыкания в электросети, разряды молнии, искрение электрооборудования, сварочные работы, диверсионные акты, отказы, нарушения правил эксплуатации, ошибки операторов, различные повреждающие воздействия и иные причины, приводящие к чрезвычайной ситуации.

Любой риск оценивается по набору факторов, зависящих от объёма информации. Чем больше информации, тем больше факторов риска. Поэтому важным является выбор определяющих факторов, подлежащих *приоритетному учёту*, не допуская при этом неоправданным упрощений.

В логико-вероятностной теории безопасности аналитическое описание опасного состояния осуществляется с помощью логической функции опасности системы (ФОС), аргументами которой выступают инициирующие события и условия (ИС, ИУ). Логико-вероятностные методы (ЛВМ) исследования безопасности позволяют объективно выявлять наиболее опасные места, причины и инициирующие условия.

При разработке теории безопасности ответственных электроэнергетических объектов для случаев возникновения аварий и катастроф с серьезными последствиями, необходимо учитывать не только стандартные (проектные) условия их функционирования, но также возможность нестандартных разрушающих (запроектных) воздействий и грубых нарушений правил эксплуатации.

Первоочередными задачами логико-вероятностной теории безопасности электротехнических систем следует считать разработку методов количественной оценки риска возникновения той или иной аварии и прогнозирования ее возможных последствий.

Наиболее трудным препятствием на пути создания указанной теории является практическая невозможность перебора всех ситуаций, которые могут привести систему в опасное состояние. Преодоление этого препятствия возможно с помощью ряда мер [3]:

1) следует максимально конкретизировать и четко представить *суть опасного состояния*, как итогового, завершающего события в рассматриваемой системе. Конкретизируя и дифференцируя исследуемое опасное состояние (взрыв, пожар, поражение электрическим током, потеря питания системы собственных нужд АЭС и пр.) мы существенно сужаем и все множество состояний системы.

2) необходимо ограничить объект исследования *разумными пределами*. Имеются в виду не только пространственные границы (стены здания, границы района), но и степени границы дробления системы на ее элементы.

3) требуется строгая логика и дисциплина *перебора вариантов поведения и возможных состояний* при составлении сценария развития событий, приводящих систему в опасное состояние. Определение возможных событий более высокого уровня для выявления инициирующих условий более низкого уровня, проведения глубокого анализа поведения системы с целью выявления логических взаимосвязей, образующих цепочки (пути протекания аварии). Следует при этом двигаться не «снизу вверх» (от той или иной поломки, отказа, нежелательного инициирующего события), а

«сверху вниз» (от исследуемого опасного состояния к тем причинам, которые способны его вызвать).

4) для получения количественных результатов для завершающего опасного состояния необходимо *задаться значениями показателей надежности*, к которым относятся: вероятность отказа *Q(t)*, интенсивность отказов *λ(t)*, интенсивность восстановлений *υ(t)* и др. Указанную переборную задачу следует формализовать на удобном математическом языке (теории графов, алгебры логики и пр.) и передать ее ЭВМ.

Обычно сценарий опасного состояния представляют в виде блок-схемы, в которой показаны все её функциональные элементы и взаимосвязи между ними.

После составления сценария опасного состояния и апробации его среди специалистов следует приступить к составлению ФОС с помощью кратчайших путей опасного функционирования (КПОФ), либо с помощью минимальных сечений предотвращения опасности (МСПО) [3].

Кратчайший путь опасного функционирования (КПОФ) представляет собой такую конъюнкцию инициирующих условий *(Z_i),* ни одну из компонент которой нельзя изъять, не нарушив опасного функционирования системы. Такую конъюнкцию можно записать в виде функции алгебры логики (ФАЛ):

$$\varphi_i = \wedge Z_i \quad i \in K\varphi_l \tag{10}$$

где $K\varphi_l$ означает множество номеров ИУ, соответствующих данному *l*-му КПОФ.

ИУ принимает одно из двух значений:

$$Z_i = \begin{cases} 1, \text{ если } i\text{–е условие произошло}; \\ 0, \text{если } i\text{–е условие не произошло} \end{cases} \tag{11}$$

Иначе говоря, КПОФ описывает один из возможных самостоятельных вариантов попадания системы в опасное состояние с помощью минимального набора инициирующих условий, абсолютно необходимых для его осуществления, то есть данного варианта взрыва, пожара, затопления или иного ОСС.

Минимальное сечение предотвращения опасности (*МСПО)* представляет собой такую конъюнкцию из отрицаний инициирующих условий *(Z'_i),* ни одну из компонент которой нельзя изъять, не нарушив условия безопасного функционирования системы. Такую конъюнкцию можно записать в виде следующей ФАЛ:

$$\Psi_i = \wedge z'_i \quad i \in K\psi_j \text{ ,} \tag{12}$$

где $K\psi_j$ означает множество номеров ИУ, соответствующих данному *j*-му МСПО.

Другими словами, минимальное сечение предотвращения опасности описывает один из возможных способов нарушения опасного функционирования с помощью минимального набора запрещенных условий Z'_i.

Каждая реальная техническая система имеет *конечное* (*l*) число КПОФ (*l =1,2,...,d*) и МСПО (*j = 1,2,...,n*).

Используя эти понятия, можно по-разному записать условия опасного состояния системы:

- либо в виде дизъюнкции всех имеющихся КПОФ

$$Y\left(Z_1,...,Z_m\right)=\bigvee_{l=1}^{d}\varphi_l=\bigvee_{l=1}^{d}\left[\bigwedge_{i\in K\varphi_l}Z_i\right]; \tag{13}$$

- либо через конъюнкцию отрицания всех МСПО

$$Y\left(Z_1,...,Z_m\right)=\bigwedge_{j=1}^{n}\Psi'_j=\bigwedge_{j=1}^{n}\left[\bigvee_{i\in K\psi_j}Z_i\right]. \tag{14}$$

Таким образом, условия опасного состояния реальной системы можно представить в виде условий опасного функционирования некоторой эквивалентной (в смысле безопасности) системы, структура которой представляет параллельное соединение КПОФ, или другой эквивалентной системы, структура которой представляет последовательное соединение отрицаний МСПО.

Сознательное подчёркивание полной аналогии с математическим описанием структурной надёжности системы привело к целесообразности замены аргументов в ФОС (не через X_i, а через Z_i), ввиду более широкого понимания ИУ (ИС). В общем случае истинность Z_i связана с любыми событиями, ведущими к попаданию системы в опасное состояние. В частном случае - отказ $Z_i \equiv X'_i$.

Следуя алгоритму ЛВМ надежности, записывается в общем виде выражение для определения вероятности опасного состояния системы:

$$O_c = P\left\{\overline{Y(Z_m)}=1\right\}=f_1\left(O_{zi},Б_{zi}\right) \tag{15}$$

или вероятности ее безопасного состояния

$$Б_c = P\left\{\overline{Y'(Z_m)}=1\right\}=f_2\left(O_{zi},Б_{zi}\right)=1-O_c \tag{16}$$

где O_{zi} – вероятность опасности в виде вероятности отказа за фиксированное время, т.е. Q_{zi} или вероятность нарушения тех или иных правил эксплуатации и $Б_{zi} = 1 - Q_{zi}$.

3. Алгоритм расчета опасного состояния структурно-сложной энергосистемы

В заключение следует обобщить все вышеизложенное и сформулировать *алгоритм расчета* опасного состояния системы:

1. Сформулировать, конкретизировать и четко представить суть опасного состояния.

2. Ограничить объект исследования пространственными границами и представить систему набором ее элементов (аналогично поступали при расчетах надежности и живучести).

3. Выяснить инициирующие условия (факторы), приводящие к анализируемому опасному состоянию.

4. Разработать сценарий опасного состояния путем перебора возможных состояний системы «сверху вниз» (от конкретного ОСС к тем причинам, которые способны его вызвать).

5. После составления сценария опасного состояния и апробации его среди специалистов составить ФОС с помощью кратчайших путей опасного функционирования (КПОФ), либо с помощью минимальных сечений предотвращения опасности (МСПО).

6. Следуя алгоритмам ЛВМ надежности, записать выражение для определения вероятности опасного состояния системы.

Достоинством ЛВМ расчета безопасности является их работоспособность и при отсутствии исходных вероятностей инициирующих событий, что, как правило, является принципиальной трудностью при количественной оценке риска редких событий. С помощью этой модели можно объективно оценить важность любого инициирующего условия и их произвольных комбинаций (по два, три и т.д.) [3].

ЛЕКЦИЯ № 8

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Сценарий и анализ опасности поражения электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Сценарий развития событий, приводящих к поражению электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В.
2. Формирование и анализ функции опасного состояния (ФОС).

1. Сценарий развития событий, приводящих к поражению электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В

Расширяется диапазон ИУ по сравнению с *примером 1*(ДО изображено на рис. 6) для составления сценария опасности поражения электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В. Предлагается руководствоваться тем, что в системах электроснабжения предприятий используются технические средства обеспечения электробезопасности.

Суть опасного состояния: поражение электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В.

Группа технических средств электробезопасности включает следующие инициирующие *события*:

- Z_1 – прикосновение к токоведущим частям;
- Z_2 – приближение к корпусу электроустановки;
- Z_3 – прикосновение к корпусу;
- Z_5 – однофазное замыкание на землю(ОЗЗ);
- Z_6 – двойное замыкание на землю (ДЗЗ) в различных точках сети.

В качестве инициирующих *условий* используются:

- Z_4 – недостаточно высокий уровень сопротивления изоляции фаз сети;
- Z_7 – отказ 1-й ступени защиты от однофазного замыкания на землю;
- Z_8 – отказ 2-й ступени защиты от однофазного замыкания на землю;
- Z_9 – отказ максимальной токовой защиты;
- Z_{10} – отказ блока защиты от ДЗЗ;
- Z_{11} – отказ заземляющего устройства;
- Z_{12} – отказ устройства контроля параметров заземления;
- Z_{13} – отказ или отсутствие устройства компенсации токов ОЗЗ.

Инициирующие события и условия отдельно или в комбинациях друг с другом образуют обобщающие инициирующие факторы, которые в сочетании между собой, а также событиями и (или) условиями приводят к возникновению опасного состояния. На рис. 6 изображен сценарий опасного состояния: поражение электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В.

2. Формирование и анализ функции опасного состояния (ФОС)

Для данного сценария функция опасного состояния через КПОФ запишется следующим образом:

$$Y(\overrightarrow{Z_{14}}) = \begin{vmatrix} Z_{13} \begin{vmatrix} Z_1 Z_4 & \\ Z_3 Z_5 & \begin{vmatrix} Z_7 & Z_{11} \\ Z_8 & Z_{12} \end{vmatrix} \end{vmatrix} \\ Z_6 \begin{vmatrix} Z_2 & \begin{vmatrix} Z_9 & \\ Z_{10} & \begin{vmatrix} Z_{11} \\ Z_{12} \end{vmatrix} \end{vmatrix} \\ Z_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_1 & Z_4 & Z_{13} & & \\ Z_3 & Z_5 & Z_7 & Z_{11} & Z_{13} \\ Z_3 & Z_5 & Z_8 & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_2 & Z_6 & Z_9 & & \\ Z_3 & Z_6 & Z_{10} & Z_{11} & \\ Z_3 & Z_6 & Z_{10} & Z_{12} & \end{vmatrix} \quad (17)$$

ФОС (17) является монотонной и повторной (по аргументам Z_3, Z_{11}, Z_{12}).

Определить вероятность поражения электрическим током было бы целесообразно, используя метод наращивания кратчайших путей успешного функционирования или схемно-логический метод [3], [4], [13]. Вынося за скобки повторные элементы Z_3, Z_{11}, Z_{12}, получится ФАЛ, удобная для последующего анализа.

Инвертируя (17), можно получить самые короткие МСПО, от которых, в первую очередь, зависит безопасность системы:

$$\psi_1 = Z'_6 Z'_{13} \qquad \psi_2 = Z'_1 Z'_3 Z'_6 \qquad \psi_3 = Z'_1 Z'_5 Z'_6$$
$$\psi_4 = Z'_3 Z'_4 Z'_6 \qquad \psi_5 = Z'_4 Z'_5 Z'_6 \qquad \psi_6 = Z'_2 Z'_3 Z'_{13}$$
$$\psi_7 = Z'_9 Z'_{10} Z'_{13} \qquad \psi_8 = Z'_1 Z'_2 Z'_3 \qquad \psi_9 = Z'_2 Z'_3 Z'_4$$

Анализ показывает, что если не будет только двойного замыкания на землю ДЗЗ в различных токах сети Z'_6 и безотказно будет действовать устройство компенсации токов ОЗЗ Z'_{13}, то безопасность сети практически на 100 % гарантируется при наличии всех остальных одиннадцати ИУ.

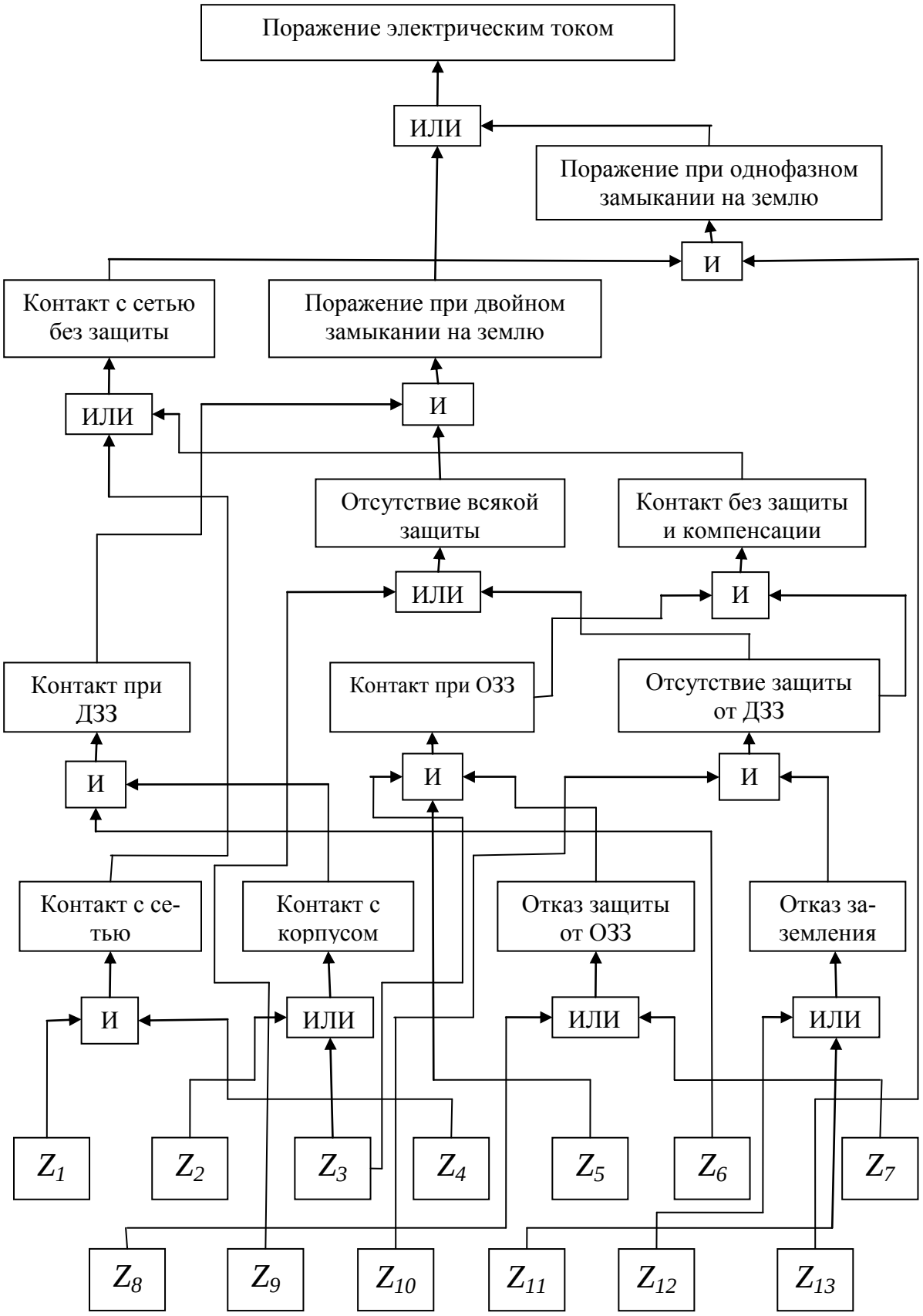

Рис. 6. Сценарий опасного состояния – поражение электрическим током в сетях напряжением выше 1000 В

Задание 4.

Произвести оценку риска взрыва водорода в помещении, где размещена аккумуляторная батарея:

1) Составить СОС. Суть опасного состояния – взрыв водорода. Необходимо учесть ИУ, приводящие систему в ОС.

Рекомендации. Известно, что для предупреждения взрывов смеси водорода, выделяющегося из аккумуляторов, с воздухом, принимается ряд специальных мер. Интенсивность газовыделения АБ зависит от режима её использования, срока службы, температуры окружающей среды и др. Водород удаляется системой вентиляции или сжигается в специальных приборах. Содержание водорода в атмосфере помещения постоянно контролируется автоматическими и переносными газоанализаторами.

Взрыв обязательно произойдёт, если будет достигнута взрывоопасная концентрация водорода из-за отсутствия контроля за содержанием водорода (ИУ: $Z_1 – Z_3$) и вентиляции (ИУ: $Z_4 – Z_7$), а также наличия очага воспламенения смеси (ИС: $Z_8 – Z_{10}$).

При учёте ИУ двигаться от минимально учитываемых условий («ядра» системы) к учёту дополнительных обстоятельств, добавляемых к «ядру». Ограничиться десятью ИУ, включающими ошибки персонала и способы нарушения инструкции.

2) Сформировать ФОС через дизъюнкцию КПОФ и конъюнкцию МСПО. Инвертировать конъюнкцию в дизъюнкцию МСПО, получив функцию безопасного состояния (ФБС), применив теорему де Моргана: $ab = (a'b')'$. *Проанализировать «выгодные» МСПО, т.е. те ИУ, без которых не обойтись как для создания взрывоопасной обстановки, так и для предотвращения взрыва.*

3) Произвести оценку риска взрыва АБ с применением ЭВМ. Исходные данные для расчёта приведены в таблице 2.

4) Оценить значимость и вклад ИУ в создании опасного состояния [3], [4], [13].

Таблица 2

Исходные опасности элементов системы Z_i

Z_i	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}
o_{z_i}	0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0001	0,01	0,01	0,01

ЛЕКЦИЯ № 9

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Связь надёжности с безопасностью в системах, состоящих из элементов с тремя состояниями

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Постановка задачи.
2. Пример задачи по расчету надёжности с тремя несовместными состояниями.
3. Возможные подходы к оценке риска как меры опасности.

1. Постановка задачи

Ранее в области теории и расчетов надёжности нас интересовали системы с двумя видами состояний её элементов: работоспособное и неработоспособное (отказ). ЛВМ позволяют проводить анализ систем с большим количеством состояний элементов.

В случае системы, состоящей из элементов с тремя состояниями: отказ типа «обрыв»; отказ типа «короткое замыкание»; исправная работа, резервирование может не только увеличивать, но также и снижать надежность. Это зависит от преобладающего вида отказов элемента, конфигурации системы и числа резервных элементов.

Ставится задача определить вероятность отказа системы из-за её «обрыва» и вероятность отказа системы из-за невозможности её отключения, т.е. по причине «замыкания» системы.

Затруднения в ЛВМ первоначально возникли из-за неясности вычисления вероятности отказа всей системы по причине её замыкания. С этой целью пришлось исследовать полиномиальное разложение

$$(R_i + Q_{iO} + Q_{iЗ})^n, \qquad (18)$$

где n – число независимых элементов.

Можно сформулировать некоторые фундаментальные закономерности (для постановки задачи о передачи информации и возможности её прекращения) для последовательного соединения n элементов и параллельного соединения m элементов.

Надёжность системы с последовательным соединением есть вероятность того, что система не откажет из-за отказов тира «обрыв», минус вероятность того, что система откажет из-за отказов типа «замыкание»:

$$R_{посл} = \prod_{i=1}^{n}(1 - Q_{iO}) - \prod_{i=1}^{n} Q_{iЗ} = R_{С.О} - Q_{С.З}, \qquad (19)$$

где $R_{C.O}$ – безотказность системы по «обрыву»; $Q_{C.З}$ – вероятность отказа системы типа «замыкание».

Надёжность системы с параллельным соединением есть вероятность того, что система не откажет из-за отказов типа «замыкание» минус вероятность того, что система откажет из-за отказов типа «обрыв»:

$$R_{пар} = \prod_{i=1}^{m}(1 - Q_{iЗ}) - \prod_{i=1}^{m} Q_{iO} = R_{C.З} - Q_{C.O}, \qquad (20)$$

где $R_{C.З}$ – безотказность системы по «замыканию»; $Q_{C.O}$ – вероятность отказа системы из-за «обрыва».

А так как ФРС состоит из *m*параллельных КПУФ, а каждый КПУФ – есть последовательное соединение *n*аргументов, то используя выражения (19) и (20), можно утверждать о возможности раздельного вычисления вероятности отказа системы по «обрыву» $(Q_{C.O})$ и по «замыканию» $(Q_{C.З})$.

Рассматривается отказ типа «замыкание» как инициирующее событие. Его истинность состоит в том, что оно произошло. При замещении логических переменных вероятностями правила перехода следует инвертировать:

$$i = \begin{cases} 1, \textit{если i-й элемент закоротил;} \\ 0, \textit{если i-й элемент работоспособен.} \end{cases} \qquad (21)$$

Тогда

$$Q_{iЗ} = P\{X_i = 1\}, \text{ а } R_{iЗ} = P\{X_i = 0\} = P\{X_i' = 1\}. \qquad (22)$$

2. Пример задачи по расчету надёжности с тремя несовместными состояниями

Для понимания сути задачи о трёх несовместных состояниях полезно снова вернуться к ФРС системы (5), изображенной на рис.1.

ФРС в ОДНФ представлено в виде [3], [4]:

$$\begin{vmatrix} X_1 & X_3 & X_5 & X_7 & & & & \\ X_1' & X_2 & X_4 & X_6 & X_7 & & & \\ X_1 & X_2 & X_3' & X_4 & X_6 & X_7 & & \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5' & X_6 & X_7 & \\ X_1 & X_2' & X_3 & X_4 & X_5' & X_6 & X_7 & X_8 \\ X_1' & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6' & X_7 & X_8 \end{vmatrix} \qquad (23)$$

При определении вероятности безотказной работы на «обрыв», т.е. при вычислении истинности ФРС (6), произведём обычное замещение логических аргументов в (23) на вероятности:

$$R_{C.O} = P\{Y(\overrightarrow{X_8}) = 1\} = R_{1O}R_{3O}R_{5O}R_{7O} + Q_{1O}R_{2O}R_{4O}R_{6O}R_{7O} + R_{1O}R_{2O}Q_{3O}R_{4O}R_{6O}R_{7O} + R_{1O}R_{2O}R_{3O}R_{4O}Q_{5O}R_{6O}R_{7O} + R_{1O}Q_{2O}R_{3O}R_{4O}Q_{5O}R_{6O}R_{7O}R_{8O} + Q_{1O}R_{2O}R_{3O}R_{4O}R_{5O}Q_{6O}R_{7O}R_{8O} \quad (24)$$

При определении вероятности отказа системы по «замыканию», произведём замещение логических аргументов в (24) по правилам (22):

$$Q_{C.3} = P\{Y(\overrightarrow{X_8}) = 1\} = Q_{13}Q_{33}Q_{53}Q_{73} + R_{13}Q_{23}Q_{43}Q_{63}Q_{73} + Q_{13}Q_{23}R_{33}Q_{43}Q_{63}Q_{73} + Q_{13}Q_{23}Q_{33}Q_{43}R_{53}Q_{63}Q_{73} + Q_{13}R_{23}Q_{33}Q_{43}R_{53}Q_{63}Q_{73}Q_{83} + R_{13}Q_{23}Q_{33}Q_{43}Q_{53}R_{63}Q_{73}Q_{83} \quad (25)$$

Подставим в формулы (24) и (25) исходные данные:

$$Q_{iO} = 0{,}1; \qquad Q_{i3} = 0{,}2; \quad i = 1, 2\ldots..8.$$

Получим: $Q_{C.O}$ =0,022; $Q_{C.3}$ =0,088; $R_C = 1 - Q_{C.O} - Q_{C.3} = 0{,}89$.

В заключение необходимо отметить, что реальные системы, у которых все элементы могут находиться в трёх состояниях, практически не существуют. Но такая постановка задачи для ССС открывает перспективы для систем с разным числом несовместных состояний у разных её элементов.

3. Возможные подходы к оценке риска как меры опасности

К оценке риска попадания системы в опасное состояние можно подойти с двух сторон:

1. Адаптировать модель надёжности к модели безопасности, прибегнув к анализу инициирующих факторов, приводящих к опасному состоянию;

2. Разрабатывать самостоятельную модель безопасности, учитывающую возможные отказы техники и людей.

Постановка задачи: развить модель надёжности в сторону учёта возможных инициирующих событий и условий (ИС и ИУ) с целью оценки риска попадания системы в опасное состояние.

Проиллюстрируем такой подход на примере электроэнергетической системы, изображенной на рис.1, ФРС которой может быть сформирована либо через кратчайшие пути успешного функционирования (КПУФ), либо через отрицания минимальных сечений отказов (МСО). Критерием отказа этой системы является потеря питания на РЩ$_1$ (X_7).

Разовьём модель надёжности добавлением в неё 9-го логического элемента Z_9 и сформулируем два понятия опасного состояния:

1. Поражение электрическим током;
2. Отсутствие бесперебойного питания потребителей от РЩ$_1$ (X_7).

$$Z_9^{(1)}=\begin{cases}1-\text{если произойдёт касание щита } X_7;\\ 0-\text{в противном случае}\end{cases} \quad (26)$$

$$Z_9^{(2)}=\begin{cases}1-\text{если в данный момент требуется}\\ \text{подать питание на потребители;}\\ 0-\text{в противном случае}\end{cases} \quad (27)$$

Функцию опасного состояния можно записать следующим образом:

- в первом случае:

$$Y_C^{(1)}\left(X_1,\dots X_8,Z_9^{(1)}\right)=\begin{vmatrix}X_1 & X_3 & X_5 & X_7 & & \\ X_1 & X_3 & X_4 & X_6 & X_7 & X_8\\ X_2 & X_4 & X_6 & X_7 & & \\ X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_7 & X_8\end{vmatrix} Z_9^{(1)} \quad (28)$$

- во втором случае:

$$Y_C^{(2)}\left(X_1,\dots X_8,Z_9^{(2)}\right)=\left\|\begin{matrix}X_7\end{matrix}\middle|\begin{matrix}X_1\\ X_2X_4\end{matrix}\middle|\begin{matrix}X_3\\ X_2X_4X_6\end{matrix}\middle|\begin{matrix}X_5\\ X_4X_6\end{matrix}\middle|\begin{matrix}X_1\\ X_6\\ X_8\end{matrix}\middle|\begin{matrix}X_2\\ X_5\\ X_8\end{matrix}\right\| Z_9^{(2)} \quad (29)$$

Вероятность опасности системы

$$O_C^{(1)}=P\left\{Y_C^{(1)}\left(X_1,\dots X_8,Z_9^{(1)}\right)=1\right\}$$
$$=[R_1R_3R_5+R_2R_4R_6+R_1R_3R_4R_6R_8+R_2R_3R_4R_5R_8$$
$$-(R_1R_3R_4R_5R_6R_8+R_1R_2R_3R_4R_5R_6+R_1R_2R_3R_4R_6R_8+R_1R_2R_3R_4R_5R_8$$
$$+R_2R_3R_4R_5R_6R_8)\,2R_1R_2R_3R_4R_5R_6R_8]R_7O_9^{(1)} \quad (30)$$

где $O_9^{(1)}$ – вероятность касания щита X_7.

Вероятность опасности системы во втором случае $O_C^{(2)}$ проще всего можно определить по формуле

$$O_C^{(2)}=P\left\{Y_C^{(2)}\left(X_1,\dots X_8,Z_9^{(2)}\right)=1\right\}=Q_CO_9^{(2)}=(1-R_C)O_9^{(2)}, \quad (31)$$

где $O_9^{(2)}$ - вероятность потребности в подаче питания на потребители.

Для преобразования логической функции в вероятностную следует воспользоваться теоремой де Моргана для перевода (29) из КНФ в ДНФ и одним из методов ортогонализации [3], [4].

$$Y_c^{(2)}\left(X_1,\dots X_8,Z_9^{(2)}\right)=\left|\begin{array}{c} X_7 \\ \left|\begin{array}{c} X_7' \\ X_1'X_2' \\ X_1'X_2X_4' \\ X_1X_2'X_3' \\ X_1X_2X_3'X_4' \\ X_1X_2X_3'X_4X_6' \\ X_1'X_2X_3'X_4X_6' \\ X_1X_2X_3X_4'X_5' \\ X_1X_2'X_3X_4'X_5' \\ X_1X_2'X_3X_4X_5'X_6' \\ X_1X_2X_3X_4X_5'X_6' \\ X_1'X_2X_3X_4X_5'X_6' \\ X_1'X_2X_3X_4X_5X_6'X_8' \\ X_1X_2'X_3X_4X_5'X_6X_8' \end{array}\right| \end{array}\right| \qquad (32)$$

При переходе к вероятностной функции по ФАЛ (32) следует перемножить вероятности исходных событий в конъюнкциях, а затем сложить их.

Задание 5.
При исходных вероятностях
$R_1=R_2=0{,}7;$
$R_3=R_4=R_7=0{,}9;$
$R_5=R_6=R_8=0{,}99,$
$O_9^{(1)}=O_9^{(2)}=0{,}0001$

Получить оценку рисков $O_c^{(1)}$ и $O_c^{(2)}$, *а так же соотношение между ними.*

Этим примером удается показать связь надежности с безопасностью, в том числе и для случая, когда безотказная работа системы приводит к большему риску, чем в случае ненадёжной системы [3].

Не отрицая целесообразности в некоторых случаях развития надёжности в направлении безопасности, чаще рассматривается самостоятельная модель безопасности с учётом надежности входящих в неё компонент.

ЛЕКЦИЯ № 10

Дисциплина: Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электрических станций

Тема: Роль инженерной психологии в обеспечении надёжности и безопасности

ВОПРОСЫ ЛЕКЦИИ:

1. Влияние человеческого фактора на обеспечение надёжности и безопасности.
2. Анализ поведения человека.
3. Расчёт надёжности эргатической системы.

1. Влияние человеческого фактора на обеспечение надёжности и безопасности

Работа конструктора, разрабатывающего технические устройства и сложные энергосистемы такова, что ему приходится отвечать за обеспечение в разработке всех требуемых техническими условиями параметров и характеристик, включая надежность. Разработку оптимальной конструкции, выбор её формы, цвета, условий эксплуатации, обслуживания, управления, ремонта необходимо вести с учетом человеческих (антропологических, психологических и др.) возможностей и ограничений. Влияние человеческого фактора на обеспечение надежности сложных систем (объектов) весьма велико. Например, частота отказов устройств, систем по вине человека колеблется от 20 до 80 %. Показатель надежности всей системы P_S(вероятность безотказной работы) определяется по формуле

$$Ps(t) = Pч(t) * Pу(t)\ , \qquad (33)$$

где $P_Ч$ – показатель надежности человека; $P_У$ – показатель надежности устройства.

Существует естественная связь между инженерной психологией и надежностью как областями науки, обе эти области связаны с прогнозированием и улучшением параметров и характеристик систем, но оперируют они различными способами и средствами. Специалист по инженерной психологии воздействует на технические факторы, оказывающие непосредственное влияние на психофизические возможности оператора, к ним относятся уровень шума, освещённость, уровень воздействия факторов окружающей среды и т.п. Специалист по надежности варьирует конструкцию, материалы, схемы, уровни нагрузок. Человек – более сложная система, чем машина, ему присуща меньшая стабильность, на работу его организма ока-

зывает влияние большое число различных факторов. Надежность оператора может быть рассмотрена и рассчитана по аналогии с элементами технической системы с использованием входных и выходных параметров. Действия, поведение человека можно охарактеризовать тремя параметрами: входным сигналом (*S*), внутренней реакцией (*R*), откликом на выходе (*O*), и рассматривать их комбинации. Упрощенная математическая модель поведения человека изображается следующим образом: *S*↔*R*↔*O*↔*E*, где S – изменение условий окружающей среды, воспринимаемых оператором (например, загорание сигнальной лампы); *R* – восприятие и обработка человеком физического сигнала (фиксация, запоминание, обдумывание и т.д.), *O* – ответное действие человека, обусловленное его внутренней реакцией на поступивший физический сигнал (движение, речь, нажатие кнопки и т.п.), *E* – изменение в системе, вызванное действием оператора.

2. Анализ поведения человека

Сложность анализа заключается в том, что поведение человека определяется действием на него многих цепей *S*↔*R*↔*O*. Для того чтобы оператор был в состоянии откликнуться должным образом, сигналы должны им восприниматься и требовать отклика, который оператор способен произвести. Необходимо учитывать ограничения, налагаемые ростом и весом человека, временем его реакции на сигналы. Кроме того, человек должен получать подтверждения о последствиях отклика, т.к. не видя результаты своей деятельности, испытывает неуверенность.

Из сказанного следует, что аппаратура должна обеспечивать оператора входными сигналами и сигналами, передаваемыми по каналу обратной связи. Конструктор должен предусмотреть средства ввода информации оператору и при этом не перегрузить каналы его восприятия. Вопрос выбора автоматического режима, использования оператора или промежуточного варианта не имеет однозначного решения. Как правило, желательно наличие оператора, если в процессе возможны неожиданные события, так как только человек обладает гибкостью и способен принять нужные решения, связанные с появлением этих событий.

Оценка надежности системы: человека, машины и эргатической системы «человек-машина» в целом проводится на этапе проектирования энергосистемы. При выборе конкретных типов органов управления, индикаторов и т.д. используют справочные данные по надёжности. Органы управления, индикаторы имеют конечное число размерных параметров, связанных с оценкой надежности (табл. 3). Различный набор параметров гарантирует разную надежность работы человека. Например, следует учитывать, что надёжность устного распоряжения или выполнения записи

равна 0,9996. Надёжность мыслительных операций (принятия решения) 0,999.

Т а б л и ц а 3

Параметр управляющего устройства	Значение параметра	Вероятность безотказной работы P(t)
Размер (длина) ручки, мм	152 - 128	0,9963
Длина перемещения ручки, мм	30 - 40	0,9975
Сопротивление управлению		0,9999

3. Расчёт надёжности эргатической системы

Задание 6.

1) Требуется оценить, стоит ли конструировать управляющее устройство, обеспечивающее вероятность его безотказной работы $P_Э(t)=0,994$. Исходные данные приведены в табл. 3.

2) Необходимо оценить надежность операции нажатия на кнопку оператора $P_Ч(t)$ при загорании сигнальной зеленой лампочки, предварительно рассчитав вероятность нажатия кнопки $P_O(t)$, зажигания лампы $P_S(t)$ при заданной вероятности обдумывания возможных действий оператором $P_R(t) = 0,999$. Исходные данные приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Кнопка (технические данные)	Вероятность безотказной работы *P(t)*	Лампочка (технические данные)	Вероятность безотказной работы *P(t)*
Диаметр кнопки (миниатюрная)	0,9995	Диаметр лампочки 6,4 - 12,7	0,9997
Один ряд	0,9997	Количество лампочек 3-4	0,9975
Расстояние между кнопками 10 - 13 мм	0,9993	Индикация непрерывная	0,9996
Отсутствие фиксации	0,9998		

Примечание: *Надежность операции нажатия на кнопку человека (оператора) при загорании сигнальной зеленой лампочки определяется вероятностью нажатия им на кнопку, которая определяется с учетом вероятностей нажатия кнопки, зажигания лампы и обдумывания возможных* действий оператором.

Специалист по безопасности, в отличие от специалиста по надёжности, должен иметь психологию «диверсанта», т.е. грамотно думать, как проще всего привести систему в опасное состояние, в отличие от специалиста по надёжности, думающего о сохранении её работоспособности [3]. Двойственность этих подходов не равноценна, так как для некоторых серь-

ёзных систем (например, склад боеприпасов) практически даже невозможно сформулировать понятие их работоспособности, в то же время – не представляет большого труда составить сценарий их перехода в опасное состояние (например, взрыв этого склада).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.

2. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике (ССНТ). Состав и общие правила задания требований по надежности.

3. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Издательство «Политехника», 2012.

4. Анисимов О.Ю. Основы теории и расчета надёжности ЭЧ ЭС. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2003.

5. Парфенов Ю.М. Надёжность, живучесть и эффективность корабельных электроэнергетических систем. – Ленинград: ВМА, 1989.

6. Тимошенков С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Надёжность технических систем и техногенный риск. – Москва: Юрайт, 2017.

7. Кенсицкий О.Г., Ключников А.А., Федоренко Г.М. Безопасность, надёжность и эффективность эксплуатации электротехнического и электроэнергетического оборудования блоков АЭС : монография. – Чернобыль, 2009.

8. Березюк Н.Т., Гапунин А.Я., Подлесный Н.И. Живучесть микропроцессорных систем управления. – К., Техника, 1989.

9. Калявин В.П., Рыбаков Л.М. Надёжность и диагностика элементов электроустановок: учебное пособие. – СПб.: Элмор, 2009.

10. Острейковский В.А. Теория надёжности: учебник для вузов – М.: Высш. шк., 2003.

11. Основные принципы безопасности АЭС. Отчет Международной консультативной группы по ядерной безопасности. Международное агентство по ядерной безопасности. – Вена, 1988. – февраль.

12. Черкесов Г.Н. Надёжность аппаратно-программных комплексов : учебное пособие. – СПб.: Питер, 2005.

13. Анисимов О.Ю., Омельченко Н.В. Надёжность и диагностика систем электропотребления. Конспект лекций по курсу: учебное пособие. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2011.

14. Анисимов О.Ю., Омельченко Н.В. Надежность электрооборудования электрических станций. Сборник задач : учебно-методическое пособие. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009.

15. "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций" (ОПБ-88) ПН АЭ Г-1-011-89/ Госатомэнергонадзор СССР. – М.,1989. – 63 с.

16. Федухин А.В., Муха Ар.А. Обеспечение живучести систем противоаварийной автоматики на гидроэлектростанциях // Математичні машини і системи. – 2018. – № 2.

СОДЕРЖАНИЕ

У ч е б н о е и з д а н и е

Омельченко Наталья Викторовна

О С Н О В Ы
НАДЁЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ: КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Учебное пособие

В авторской редакции

Изд. № 50/2021. Объем 4,5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»