

В. В. Вычужанин, Н. Д. Рудниченко

**МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ
В ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

МОНОГРАФИЯ

**Одесса
«Экология»
2019**

УДК 004:37:001:62

В949

Рецензенты: доктор технических наук, профессор И. А. Чмырь;
доктор технических наук, профессор С. А. Михайлов

Вычужанин В. В.

В949 Методы информационных технологий в диагностике состояния сложных технических систем : монография / В. В. Вычужанин, Н. Д. Рудниченко. — Одесса : Экология, 2019. — 178 с. : ил.

ISBN 978-617-7046-75-1

В монографии предложены методы и модели оценки риска отказов сложных технических систем, основанные на использовании средств информационных технологий в диагностике и прогнозирования их состояния.

Материалы монографии будут полезными для аспирантов, магистрантов, преподавателей высших учебных заведений и курсов повышения квалификации, а также всем тем, кто интересуется вопросами применения информационных технологий для решения задач надежной эксплуатации сложных технических систем.

УДК 004:37:001:62

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	
1.1. Свойства сложных технических систем.....	6
1.2. Отказы сложных технических систем. Техническое состояние сложных технических систем.....	7
1.3. Оценка риска отказов сложных технических систем.....	8
1.4. Методы оценки риска отказов сложных технических систем.....	11
1.5. Мониторинг, диагностика и прогнозирование состояния сложных технических систем.....	13
1.6. Управление риском отказов сложных технических систем.....	16
ГЛАВА 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
2.1. Обработка информации при анализе аварийных ситуаций для сложных технических систем.....	18
2.2. Концепции и технологии обработки данных.....	19
2.3. Распределенный программный комплекс для обработки потоковых Big Data от сложных технических систем.....	21
2.4. Информационные системы мониторинга и диагностики отказов сложной технической системы.....	27
2.5. Использование диагностической информации при прогнозировании и управлении состоянием сложных технических систем.....	28
2.6. Диагностические модели состояний сложных технических систем. Методы анализа диагностической информации.....	30
ГЛАВА 3. Информационное обеспечение мониторинга и диагностики технического состояния сложных технических систем	
3.1. Обработка диагностических данных большого объема технического состояния сложных технических систем.....	36
3.2. Методическое обеспечение информационной поддержки мониторинга и диагностики технического состояния сложных технических систем.....	58
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
4.1. Концепция анализа и оценки риска отказов сложной технической системы.....	70
4.2. Методика оценки живучести сложных технических систем.....	80
4.3. Модели оценки живучести сложных технических систем	

4.3.1. Методологический подход при решениях задач по разработке моделей оценки живучести технических систем	99
4.3.2. Когнитивное имитационное моделирование для оценки живучести сложных технических систем.....	105
4.3.3. Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем.....	108
4.3.4. Нечеткие модели оценки риска сложных технических систем	112
4.3.5. Модель нейросети для прогнозирования риска отказов компонентов сложных технических систем	120
4.4. Метод структурной оптимизации характеристик системы дистанционного мониторинга и диагностики сложных технических систем.....	124
4.5. Информатизация прогнозирования риска отказов сложных технических систем	136
4.6. Применение кластерного анализа данных для выделения меры схожести факторов влияния на работоспособность сложных технических систем	152
4.7. Мобильное приложение для мониторинга, диагностики и прогнозирования риска отказов компонентов сложной технической системы.....	157
4.8. Программное приложение для автоматизации построения модели оценки риска отказов сложных технических систем.....	164
ЛИТЕРАТУРА.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежной эксплуатации сложных технических систем (СТС) направлено на эффективное применение существующих подходов на основе традиционных методов мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния СТС. Усложнение СТС требует развития известных и разработки новых методов обеспечения надежности СТС. В настоящее время для СТС ограниченно получили развитие теории и методы информационных технологий в диагностике состояния СТС. Актуальным остается формирование методологического применения информационных технологий при прогнозировании состояния СТС с оценкой риска отказов, учитывающей взаимосвязанность функционально взаимодействующих компонентов таких систем.

В монографии рассмотрены свойства СТС, приведены основные понятия технической диагностики - области знаний, охватывающей теорию, методы и средства определения технического состояния сложных систем. Представлен анализ методов диагностики и прогнозирования состояния СТС. Предложены методы, результаты исследований применения информационных технологий для оценки риска отказов СТС.

Монография состоит из 4 глав.

В главе 1 приведены результаты анализа методов определения технического состояния СТС. Рассмотрены причины и методы оценки риска отказов СТС. Проанализированы основные проблемы построения систем управления риском отказов СТС.

В главе 2 рассмотрены основные подходы к обработке информации при анализе аварийных ситуаций СТС. Проведен анализ информационных систем мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния СТС, диагностических моделей состояний СТС и методов анализа диагностической информации.

В главе 3 представлены результаты разработок методического обеспечения информационной поддержки мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния СТС. Представлен программный комплекс для обработки потоковых Big Data СТС. Осуществлена оптимизация анализа информации в разноструктурных хранилищах данных в системе обработки Big Data от СТС.

В главе 4 определены расчетные показатели при оценке и управлении риском отказов функционально взаимосвязанных структурных компонентов СТС. Приведены результаты разработок методов и моделей оценки технического состояния СТС. Представлены результаты решения задачи информатизации прогнозирования риска отказов СТС. Приведено описание разработанного программного приложения для автоматизации построения модели оценки риска отказов СТС.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

1.1. Свойства сложных технических систем

Часто к сложным системам относят системы, не корректно описываемые математически. Если в системе имеется большое число элементов, связанных друг с другом неизвестным образом или неизвестна природа явлений, протекающих в системе, тогда она также относится к сложной. Под сложной технической системой (СТС) понимают систему, в которой при вычленении или добавлении компонент возникают качественно новые свойства системы. Каждая из компонент системы описывается набором характеристических признаков, значения которых определяют текущее состояние компоненты и системы в целом.

СТС характеризуются разветвленной структурой. Общим для всех элементов СТС является: наличие связей между ними; целостность; определенная структура и иерархичность; конечность; наблюдаемость; относительная самостоятельность элементов. Изменения свойств отдельных элементов и (или) связей в системах влечет за собой изменение свойств многих других элементов. Элементы при определенных условиях могут рассматриваться как подсистемы, а подсистема - как элемент более сложной системы. Т.е. системы могут содержать ряд подсистем [1-3].

СТС разделяются на классы по различным признакам. Чаще всего системы классифицируются: по степени определенности функционирования (детерминированные и вероятностные); по степени организованности - хорошо организованные, плохо организованные (диффузные), самоорганизующиеся системы; по взаимодействию со средой различают системы замкнутые и открытые и т.д.

СТС обладают специфическими свойствами: нелинейность; гетерогенность; стохастичность; неопределенность; петли обратной связи (циклы). Свойства системы не всегда совпадают со свойствами ее элементов. В современном понимании СТС является информационно-технической системой [1-3]. Поведение СТС затруднительно моделировать из-за сложных взаимосвязей между их частями и взаимодействий между данной системой и окружающей средой.

Из методологических подходов к анализу состояния СТС, системный подход наиболее близок к проблеме анализа закономерностей развития и построения подобных систем. В рамках теории систем СТС - это набор взаимосвязанных и взаимодействующих частей, составленных в порядке, позволяющим воспроизвести свойство целого [4-8].

В период эксплуатации СТС подвержена изменению технического состояния, а значит, необходим анализ надежности и безопасности таких

систем. Надежность создает ценность, в которой СТС сохраняет свои показатели функционирования в соответствии с требованиями. Надежность - это свойство СТС сохранять во времени способность функционировать в заданных режимах. Надежность комплексное свойство, которое в зависимости от назначения СТС и условий ее применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность [9-14]. Безотказность СТС - свойство системы непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение заданного времени или наработки в заданных режимах и условиях применения объекта. Ремонтпригодность СТС – свойство системы, заключающееся в ее приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором она готова выполнять требуемые функции в заданных условиях после отказа путем ее технического обслуживания и ремонта.

1.2. Отказы сложных технических систем. Техническое состояние сложных технических систем

Отказы СТС определяются техническим состоянием систем. Под термином «техническое состояние» (ТС) понимается совокупность свойств объекта, которые изменяются в процессе эксплуатации, характеризующиеся признаками, установленными стандартами или технической документацией [1-3,15]. Совокупность условий, удовлетворяющих или не удовлетворяющих требованиям, определяющими исправность, работоспособность СТС образуют виды его ТС. Изменение состояния надежности связано с переходом ТС в состояние отказа или с переходом ТС в предотказные состояния. Отказ ТС характеризуется значением ущерба, который может быть нанесен при его наступлении. Если значение ущерба причиняемого при наступлении отказа превышает заранее определенное значение, то такой отказ опасный, и он может стать причиной аварии.

Основными техническими состояниями СТС являются:

- исправность - состояние СТС и ее элементов, при котором она соответствует требованиям нормативно-технической и проектной документации;
- неисправность - состояние СТС, при котором она не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической или проектной документации;
- работоспособность - состояние СТС, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют всем требованиям нормативно-технической и проектной документации;
- неработоспособность - состояние СТС, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять

заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической или проектной документации;

- предельное состояние - состояние СТС, при котором ее дальнейшая эксплуатация недопустима или восстановление ее работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Для качественного исследования технического состояния СТС должны быть разделены на подсистемы (комплексы, агрегаты) и элементы (узлы и детали). В составе подсистем могут рассматриваться конструктивно и функционально завершенные составные части системы, взаимодействие которых обеспечивает достижение поставленной цели при выполнении запланированной задачи. В качестве элементов в рассмотрение включаются составные части, являющиеся результатом некоторого деления конструкции системы без соблюдения принципов конструктивной и функциональной завершенности частей. Каждый элемент системы связан с другими элементами определенным образом, а идентичные элементы могут иметь различные характеристики в различных системах. Поэтому, при исследовании технического состояния СТС необходимо выявить взаимосвязи и провести ее структурный анализ.

1.3. Оценка риска отказов сложных технических систем

Оценку риска отказов считают мерой, которая на стадии предпроектной проработки СТС из имеющихся вариантов технических решений позволяет осуществить оптимальный выбор с точки зрения минимизации затрат на создание объекта и возможных ущербов при реализации данного решения на практике. Под риском отказа понимают сочетание вероятности наступления нежелательного события и возможного ущерба. Концепция оценки риска отказов СТС, заключается в недопустимой вероятности повреждения систем [16,17]. Вероятностный подход проявляется в применении теории надежности для прогноза безотказности СТС. Процедура построения сценария опасного поведения системы является итерационным процессом (рис.1.1), в ходе которого проводится анализ системы и определяются меры повышающие уровень безопасности. Оценка риска отказов включают процедуры [16]: (рис. 1.2) анализ риска (определение области применения; идентификация); оценивание риска. Анализ риска отказов СТС предоставляет входные данные для оценки риска и принятия решений, относительно обработки риска, а также для выбора стратегий и методов обработки риска отказов.

Цель идентификации риска отказов заключается в составлении перечня риска, основанного на событиях, создающих, повышающих, предотвращающих, ускоряющих или замедляющих достижение целей. Последствия и вероятность возникновения риска отказов СТС можно

определять посредством моделирования результатов события или на основе экстраполяции экспериментальных исследований.

Целью оценивания риска отказа является содействие принятию решений, основанных на результатах анализа риска относительно необходимости его обработки и установления приоритета осуществления при его обработке. Обработка риска отказа - это циклический процесс: оценивания обработки риска; принятия решения; проведение новой обработки риска, если уровни остаточного риска отказов не допустимы; оценивание результативности обработки.

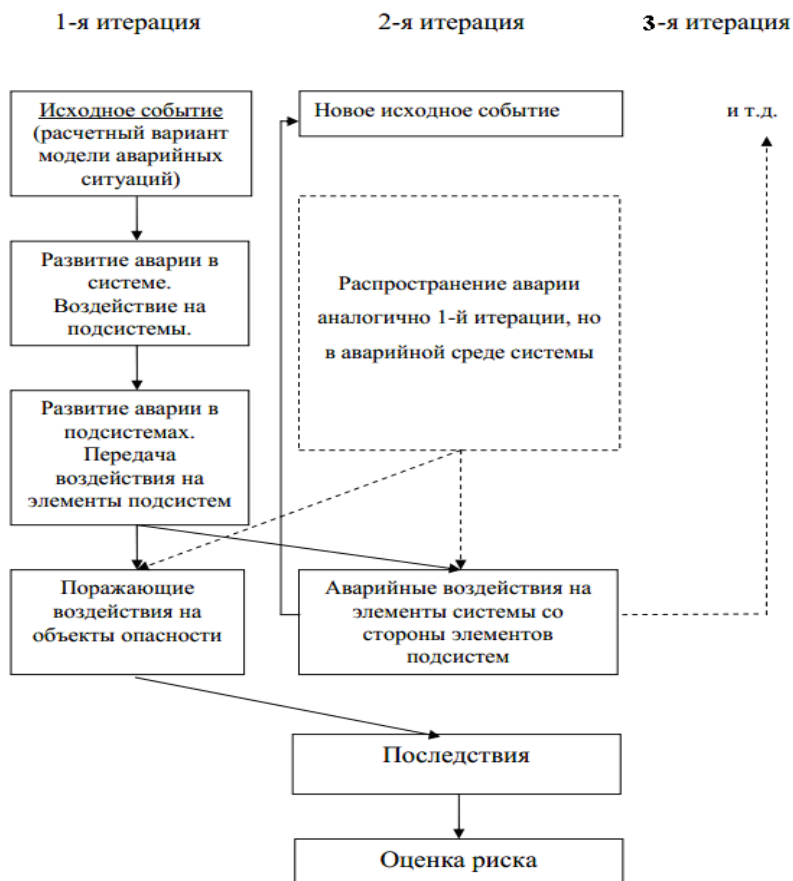


Рис.1.1. Итерационная логическая схема развития аварии при оценке риска отказов в системе

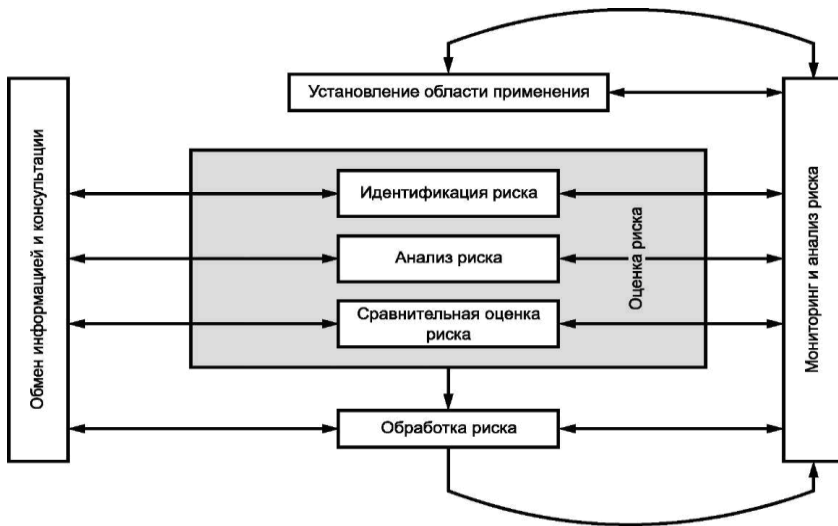


Рис. 1.2. Процедуры оценки риска отказов СТС

Проблема оценки риска отказов СТС связана [16,17] с факторами:

1. Многообразием оборудования, различающимся по физическим принципам и режимам работы, затрудняющим использование универсальных методов и средств диагностирования ТС систем;
2. Различиями в структуре оборудования. Подходы к оценке риска отказов многоканальных и одноканальных СТС существенно отличаются;
3. Составом СТС, включающих взаимосвязанные и взаимозависимые подсистемы, блоки и узлы, с нетривиальными межэлементными связями, между которыми происходит взаимный обмен энергией, веществом и информацией, обладающих структурными и функциональными особенностями;
4. Трудностями получения экспертных данных по надежности элементов и межэлементных связей;
5. Необходимостью учета множества параметров, от которых зависит функционирование СТС;
6. Необходимостью проведения оценки риска отказов СТС с использованием статистических данных по произошедшим ранее отказам элементов и межэлементных связей;
7. Необходимостью в быстродействующих средствах мониторинга и оценки риска отказов СТС;
8. Ролью человеческого фактора.

Допустимый уровень риска отказов СТС определяется критериями приемлемого риска, устанавливаемых в зависимости от

методов проведения анализа риска, наличия необходимой информации, возможностей и целей анализа. Критерии основываются на эксплуатационных, технических, экономических, нормативно-правовых, экологических факторах или их комбинации. Допустимый уровень риска отказов СТС может быть определен, например, на основе имеющихся статистических данных с использованием различных критериев. Уровни риска отказов разделяют на группы: высшая группа (уровень риска является недопустимым); средняя группа (затраты и последствия при принятии риска следует учитывать, а возможности соотносить с последствиями); низшая группа (уровень риска настолько мал, что необходимость в обработке риска отсутствует) [16].

Из литературных источников следует, что при диагностике состояния СТС не всегда выполняется последовательный анализ систем с учетом их структурных и функциональных особенностей. Поэтому при оценке структурного и функционального риска отказов необходимо СТС разделить на подсистемы и элементы. Оценке структурного риска отказов СТС должно предшествовать выявление взаимосвязей и взаимодействия подсистем и элементов, т.е. проведен структурный анализ СТС. Оценка структурного риска отказа при переменных внешних и внутренних воздействиях должна учитывать угрозы и риски, возникающие при взаимодействии структурных компонентов в иерархии и топологии СТС. Оценка функционального риска отказов должна определять угрозы и риск исходя из функционального состояния структурных компонентов СТС.

1.4. Методы оценки риска отказов сложных технических систем

В рамках технократической концепции оценку риска отказов СТС выполняют с помощью методов, подразделяемых на детерминированные, вероятностные, экспертные, методы оценки в условиях неопределенности нестатической природы, комбинированные ([18] (рис.1.3)).

Детерминированный метод включает анализ последовательности этапов развития аварий, начиная от исходного события через последовательность стадий отказов, деформаций и разрушения компонентов до установившегося конечного состояния системы. Вероятностный метод анализа риска отказов предполагает оценку вероятности возникновения негативных событий и расчет относительных вероятностей развития процессов. При этом анализируются разветвленные цепи событий и отказов оборудования, выбирается математический аппарат и оценивается вероятность негативных событий. Расчетные математические модели в этом подходе можно упростить в сравнении с детерминированными методами. Основные ограничения вероятностного анализа безопасности связаны с недостаточностью сведений по функциям распределения параметров, а также недостаточной статистикой по отказам оборудования. Применение

упрощенных расчетных схем снижает достоверность получаемой оценки риска для аварий. Тем не менее, вероятностный метод в настоящее время считается одним из наиболее перспективных. На практике для оценки тенденций развития отказов широко используют методы экспертных оценок, основанные на получении количественных оценок риска путем обработки мнений экспертов. Наиболее приемлемым вариантом в практике является комбинация вероятностного и экспертного методов.

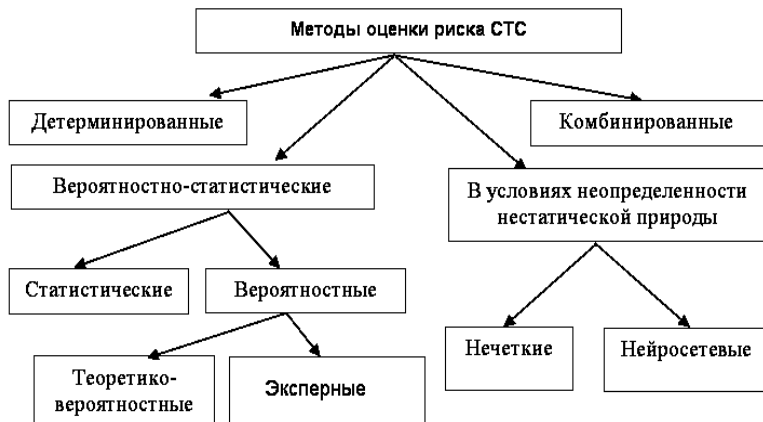


Рис. 1.3. Классификация методов оценки риска отказов СТС

С развитием и применением информационных технологий для решения задач оценки риска отказов СТС используют отображение систем в виде ориентированных графов структурных взаимосвязей всех или основных элементов. К таким методам относятся логико-вероятностный метод [19], метод Байесовских сетей, и др., базирующиеся на вероятностной парадигме оценивания и прогноза состояния СТС [20-22].

Перспективным направлением анализа данных в настоящее время является метод, основанный на нейросетевых технологиях. Внедрение нейросетевых технологий в системы мониторинга дает возможность системе не только фиксировать параметры и сравнивать их с эталонными значениями, но и производить анализ получаемых параметров системы в комплексе, прогнозируя возможность наступления отказов СТС.

Методы оценки риска отказов СТС объединяются в группы, в которые входят количественные методы, позволяющие рассчитать риск в терминах вероятности причинения вреда определенного вида, качественные, направленные на получение относительных характеристик риска (низкая степень риска, средняя, повышенная и высокая) и смешанные. Сравнение качественных и количественных методов оценки риска отказов СТС с точки

зрения простоты анализа, наличия исходной информации для расчета, времени и стоимости ее получения показало, что первые проще и дешевле, так как не нуждаются в проведении специальных исследований или испытаний и требуют меньших затрат времени. Отличие методов – в их точности. При качественной оценке риска отказов определяют последствия, вероятность и уровень риска по различным шкалам. При количественном анализе риска оценивают практическую значимость и стоимость последствий, их вероятности и получают значение уровня риска. Количественные методы требуют большего объема исходной информации, часть из которой может быть недостоверной. Поэтому предпочтение отдается качественным методам. В смешанных методах используют числовую шкалу оценки последствий, вероятности и их сочетания для определения уровня риска.

Проведенный анализ публикаций и нормативных материалов по методам оценки риска отказов СТС показал, что большинство из них основываются на вероятностных анализах безопасности систем ограниченного объема и рассматривают только отдельные последовательности событий технологического оборудования. Многообразие методов оценки риска отказов СТС базируется на инженерных, модельных, экспертных и других подходах, часто имеющих узкую отраслевую направленность, что ограничивает возможность применения методов. Многие методы оценки риска отказов СТС основаны на том, что все элементы системы работают в штатных режимах. Ряд методов не обладает свойствами масштабируемости, существенно зависят от субъективных факторов, регулирующих их точность и достоверность. Кроме того, рассмотренные методы связаны со сложными и дорогостоящими расчетами, определяющими значения оценки риска отказов с точностью не выше первого порядка. Оценка риска отказов СТС для автоматизации принятия решений в аварийных сценариях часто осуществляют без комплексной оценки структурного и функционального риска отказов систем, учета взаимосвязанности и взаимодействия их структурных компонентов.

1.5. Мониторинг, диагностика и прогнозирование состояния сложных технических систем

Мониторинг технических систем это динамическая информационно-аналитическая система, работающая в режиме реального времени и позволяющая выполнять непрерывный контроль ТС элементов и СТС, формировать первичные прогнозные оценки и рекомендации эксплуатирующим и проектным организациям. При этом используются базы данных и знаний, а также данные периодически проводимых диагностических проверок, позволяющих уточнить место возникновения

дефектов и причины неисправностей. Под информационно-технологическим процессом мониторинга риска отказов подразумевают процесс преобразования информации о риске в оценку риска. Задачи мониторинга риска приведены в табл. 1.1. Информационные технологии мониторинга технического состояния имеют ряд причин, по которым не могут быть совершенными. К некоторым из причин относятся:

- разобщенность баз данных испытаний, контроля и диагностики, отсутствие интеллектуальных компонент, позволяющих качественно и эффективно осуществлять поддержку принятия ответственных решений и, как следствие, сокращать общее время, затрачиваемое на обслуживание;

- нестационарность физических процессов во многих СТС, сложность их математического описания, зависимость технических характеристик от внешних условий работы, ограниченный состав контролируемых параметров систем, их технологический разброс и т.д.

Таблица 1.1. Задачи мониторинга риска отказов [23]

Мониторинг риска		
Аналитический мониторинг	Мониторинг оборудования	Операционный мониторинг
Выделение информационных признаков риска	Наблюдение за оборудованием	
Исчисление риска	Отслеживание изменений в развитии риска	
Оценка риска	Контроль параметров, определяющих риск	Контроль результатов управления риском
Формирование базы знаний проблемной области риска		
Разработка информационной технологии мониторинга риска		

Важным элементом защиты и обеспечения безопасного функционирования СТС являются системы штатной и аварийной диагностики. Техническая диагностика (ТД) [24] исследует состояние объектов диагностирования и направлена на разработку методов и средств обнаружения отказов, разработку систем диагностирования с применением методов информационных технологий. Особенности ТД СТС обуславливаются отличительными свойствами отказов в таких системах и сценариями развития аварий в СТС. Диагностирование включает в себя три основных этапа: фиксация отклонений диагностических параметров от их

номинальных значений; анализ характера и причины возникновения этих отклонений; установление величины ресурса исправной работы. Техническая диагностика изучает методы получения и оценки диагностической информации, диагностические модели и алгоритмы принятия решений и базируется на теориях распознавания и контролепригодности. [25].

Теория распознавания, используя диагностические модели при исследовании объекта, определяет решающие правила для распознавания текущего состояния и вида неисправности. Благодаря известным характеристикам неисправностей появляется возможность разработки оптимальных алгоритмов распознавания. Теория контролепригодности решает вопросы рациональной последовательности поиска отказавшего или неисправного элемента, контроля состояния объекта. Решения базируются на использовании диагностической информации, характеризующей состояние объекта.

Определение и выбор диагностических параметров ТС сложный, слабо формализованный процесс, состоящий из этапов. На первом этапе назначаются существенные и диагностические параметры, выделяются подсистемы ТС. На втором этапе уточняют предварительно выбранные параметры путем использования различных формальных методов. Если определяющие параметры выделены, то составляют и выбирают диагностические модели, число которых определяется спецификой диагностируемой системы и условиями ее эксплуатации.

Перспективным направлением при диагностике ТС является использование экспертных систем. В частности, интеллектуализация экспертно-диагностического процесса на основе нейросетевого моделирования и нечеткой логики [26,27]. Такого рода системы часто не обладают необходимой гибкостью и являются изолированными, функционируя в рамках замкнутого вычислительного комплекса и/или используя узкоспециальные алгоритмы.

Последующим этапом после диагностики ТС является прогнозирование их технического состояния. Существенной проблемой при прогнозировании состояния ТС становится неучет при разработке подобных систем коррелирующих факторов. Для решения проблемы используется модель авторегрессии, в которой временные ряды анализируются независимо, несмотря на то, что исследуемые характеристики могут коррелироваться. При этом не проверяется соблюдение основных предположений регрессионного анализа, а также не используются соответствующие методы адаптации к их нарушениям. Все это приводит к погрешностям при прогнозировании ТС. Основные трудности при разработке систем прогнозирования и управления надежностью ТС связаны с тем, что для многих систем исходная информация о закономерностях изменения их параметров мала. Решение

проблемы находят в использовании классической математической статистики, а также теории случайных функций для изученных и описанных закономерностей. Для прикладных исследований применяется адаптивный алгоритм прогнозирования развития СТС, основанный на междисциплинарном подходе классической теории надежности, а также использовании логико-вероятностных методов. Такой подход позволяет получить реальную методику определения наилучшего значения периода дальнейшей эксплуатации системы, используемого в качестве исходного для принятия решений. При прогнозировании находят применение методы, основанные на стохастическом моделировании на базе традиционных методов, представляющих собой математическую формализацию и уточнение концепций технического и фундаментального анализа. Широко используется метод стабильного индивидуального прогнозирования состояния, основанный на байесовом подходе и робастной статистике.

1.6. Управление риском отказов сложных технических систем

Цель управления риском отказов СТС заключается в минимизации влияния случайных событий и не допущение необоснованных ущербов системам. Эффективное управление риском отказов базируется на методологии [28-31], направленной на: выявление риска и оценку вероятности его реализации, масштаба последствий; определение максимально возможного убытка; выбор методов и инструментов управления риском; разработку стратегии управления риском с целью снижения вероятности реализации риска и минимизации возможных негативных последствий; реализацию стратегии управления риском; оценку достигнутых результатов и корректировку стратегии управления риском. Процесс управления риском отказов СТС [32] иллюстрируется рис. 1.4, где R , $R_{\text{доп}}$ – уровень и допустимый уровень риска. Одной из проблем при управлении риском СТС является отсутствие методов и средств эффективного контроля, позволяющего не только констатировать ТС системы (простой контроль) и устанавливать причины возникновения состояния отказа ее элемента (диагностический контроль), но и прогнозировать ее будущее состояние, предупреждая отказы (прогнозирующий контроль) [33- 35].

Из анализа исследований в области управления риском СТС [36-39] можно сделать вывод о том, что методология управления риском должна отвечать концепциям:

- решение, связанное с риском, должно быть экономически грамотным;
- в управлении риском принимаемые решения должны базироваться на необходимом объеме достоверной информации;

- управление риском отказов должно носить системный характер;
- управление риском отказов должно предполагать текущий анализ эффективности принятых решений и оперативную корректировку используемых принципов и методов управления риском.



Рис. 1.4. Процесс управления риском отказов СТС

Существующие концепции, методы и методики, используемые в системах управления риском различаются, прежде всего, по уровню и совершенству используемых математических методов, положенных в основу процедур оценивания рисков.

В технике отсутствуют эффективные и адекватные модели для анализа и управления риском отказов СТС. Для решения задач управления риском СТС могут быть использованы информационные инновационные технологии с когнитивно-имитационными и нечеткими моделями оценки риска отказов. Результаты анализа существующих методов построения систем управления риском СТС свидетельствуют о необходимости разработки метода, позволяющего учесть специфику взаимодействия и функционирования систем.

ГЛАВА 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. Обработка информации при анализе аварийных ситуаций для сложных технических систем

Благодаря наличию информационной компьютерной и телекоммуникационной компонент СТС появляются новые возможности в повышении эффективности их эксплуатации. СТС в практическом плане системы, имеющие проблемы больших данных. С позиций больших данных для таких систем возникают проблемы: обработки большого объема информации; значительного количества связей, затрудняющих поиск оптимальных решений и вызывающих паразитические обратные связи; роста времени на анализ и обработку информации в системе, при требованиях сокращения времени проектирования или производства [40,41].

Первая проблема решается применением: более мощных вычислительных ресурсов; параллельных вычислительных систем; технологии корпоративной обработки информации, решается техническими и организационными средствами. Вторая проблема приводит к столкновениям и противоречиям интересов элементов системы и системы в целом. Это создает эффект диссипации информации и тормозит работу СТС, снижая ее эффективность. Проблема является наиболее сложной, так как решается аналитическими средствами и последующими организационными, техническими средствами и требует использования информационной логистики. Третья проблема решается организационными и техническими средствами на основе применения методов параллельного проектирования и конструирования.

Информационную базу для процедур контроля и диагностики СТС составляет совокупность физических параметров. Ввиду необходимости получения больших массивов информации при контроле СТС все шире внедряются автоматизированные и роботизированные системы контроля качества. Для оценки значимости информации и определения ценности результатов диагностики СТС используются некоторые основные положения теории информации.

При разработке диагностических систем необходимо использовать основные принципы моделирования процесса обработки информации. При этом следует учитывать особенности диагностических систем, как специального класса предметных областей, которые характеризуются большими объемами анализируемой информации и ограниченным периодом времени для выработки решений. Практическая работа с большими объемами информации показывает, что одной из главных проблем взаимодействия с информационными ресурсами

является противоречие между количеством и качеством информации. Принципиальное значение приобретают достоверность, актуальность, непротиворечивость, целостность и точность информации.

Для оценки эффективности функционирования системы диагностики СТС следует применять системный подход, рассматривая весь цикл обработки информации: получение; проверка; ввод в компьютер; вопросы информационной безопасности; вопросы потребителей информации; характерные временные интервалы получения информации; предполагаемые объемы. Одной из основных задач диагностирования СТС является оптимизация информационного обеспечения процесса принятия решений, заключающаяся в минимизации объема представляемой для этого информации. В качестве основного критерия оптимизации выступает требование к однозначности классификации каждой возможной ситуации. Следовательно, минимизация объема должна выполняться с учетом значимости различных элементов информации для однозначности описания ситуаций.

2.2. Концепции и технологии обработки данных

Характерной чертой тенденций компьютерного анализа, интерпретации данных и принятия решений является развитие технологий и средств «извлечения» знаний из данных, интеллектуального анализа данных. Современные концепции хранения и анализа данных включают взаимосвязанные компоненты: хранилища данных (Data Warehouse); оперативная аналитическая обработка (On-Line Analytical Processing, OLAP); интеллектуальный анализ данных — ИАД (Data Mining).

Технология хранилищ данных включает очистку данных, интеграцию данных, а также онлайн-аналитическую обработку, т.е. технологию анализа с такими процедурами, как консолидация, агрегация, подведение итогов, просмотр информации «под разными углами». Хотя технология OLAP позволяет проводить многомерный анализ для принятия решений, для более глубокого анализа требуются дополнительные методы, такие как методы классификации данных, кластерного анализа, характеристики изменений данных во времени и т.д.

Применяемая технология интеллектуального анализа данных является результатом естественной эволюции информационных технологий, обусловленным прогрессом аппаратных и программных средств и возникновением мощных и доступных компьютеров и накопителей данных. Это способствовало развитию индустрии информационных технологий и сделало доступными многочисленные базы данных и репозитории информации для управления транзакциями извлечения данных и анализа данных [41,42]. К наиболее часто решаемым задачам методами

ИАД относятся: анализ значимых факторов, сокращение или увеличение их числа, выявление зависимостей, ассоциаций, исключений и закономерностей, в том числе для уменьшения размерности факторного пространства либо для виртуального (сбора, обработки) анализа данных; классификация; моделирование и прогноз; ранжирование; сегментация и т.п. К наиболее часто используемым методам, технологиям решения таких задач относятся методы деревьев решений, нейронных сетей, математической статистики, экспертного анализа и нечеткой логики, визуализации, генетических алгоритмов, эволюционного программирования, прецедентов, вариативного моделирования, а также интегрированные методы и технологии. Целью применения технологии ИАД является нахождение в исследуемых данных таких моделей, которые не могут быть найдены обычными методами. С точки зрения применения ИАД выделяют два вида моделей: предсказательные и описательные. К базовым методам Data Mining можно отнести также и подходы, использующие элементы теории статистики. В связи с тем, что ИАД является развитием статистики, таких методов много. Основная их идея сводится к корреляционному, регрессионному и другим видам статистического анализа. Основным недостатком является усреднение значений, что приводит к потере информативности данных и уменьшению количества добываемых знаний. Data Mining может применяться практически везде, где возникает задача автоматического анализа данных. Это контроль за функционированием потенциально опасных объектов.

Для обработки данных, предполагающих наличие физических неопределенностей и нечеткой логики, успешно используются методы теории вероятностей и классическая теория множеств. Однако с развитием систем, использующих методы теории искусственного интеллекта, возникла необходимость расширения формальных методов для учета лингвистической неопределенности задач. К числу универсальных методов оптимизации, используемых для ИАД, относятся генетические алгоритмы, позволяющие решать задачи различных типов (комбинаторные, общие задачи с ограничениями и без ограничений) и различной степени сложности. Эти методы характеризуются возможностью, как однокритериального, так и многокритериального поиска в большом пространстве, ландшафт которого является негладким. Перспективным направлением ИАД является использование нейронных сетей для решения разнообразных задач анализа данных. При их применении наиболее важен и сложен выбор конкретной архитектуры сети. Размер и структура сети должны соответствовать (например, в смысле формальной вычислительной сложности) существу исследуемого явления. Метод ориентирован исключительно на практический результат, а не на суть механизмов, лежащих в основе явления или соответствии полученных результатов какой-либо имеющейся теории.

2.3. Распределенный программный комплекс для обработки потоковых Big Data от сложных технических систем

С расширением функциональных возможностей развивающихся СТС повышаются требования к надежности их работы [42,43]. Это оказывает существенное влияние на количество информационных источников в СТС, а также объем вычислительных действий по обработке Big Data, поступающих с информационно-измерительных систем (ИИС), выполнение которых необходимо для эффективного функционирования СТС [44], снижения риска их отказов [45].

Для сбора, обработки данных с ИИС СТС, а также для управления технологическими процессами в них используются SCADA-системы, работающие в реальном времени [46]. Однако топологическая сложность подобных систем связана с существенными затратами, с масштабированием и адаптацией к большому количеству информационно-измерительных сигналов, собранных для реконфигурации структуры управления СТС. Следует также отметить, что большинство SCADA-систем используется главным образом для обеспечения обзора контролируемых процессов в СТС с возможностью выполнять способы Process Analyzer в целях анализа состояния систем в основном для статистической обработки данных. В этой связи новые технологии обработки и методы анализа Big Data для этой сферы становятся более востребованными. Методы обработки Big Data [47,48] предусматривают анализ больших массивов данных с терабайтным или петабайтным масштабами в реальном времени. Сложной задачей является быстрая (с низкой задержкой) аналитика полного объема Big Data. Это означает необходимость сканирования терабайтов данных за секунды, что возможно только при обработке данных с большим параллелизмом. На основе проведенного анализа интерпретации информационных потоков в распределенных информационных системах Big Data установлено, что при создании таких систем не существует единых методов и технологий, объединяющих все этапы построения соответствующих кластерных систем.

Одной из архитектур по обработке Big Data, использующей поисковые алгоритмы, является реляционная система управления базами данных (СУБД). Недостатки применения подобных СУБД привели к разработке адаптивно-подстраиваемой архитектуре, способной расширяться и масштабироваться при необходимости и постоянном увеличении данных. К такой технологии относится NoSQL [49]. Использование NoSQL архитектур, как систем хранения и обработки данных, не всегда является оптимальным, что связано со скоростью и производительностью жестких дисков. Решение части проблем найдено в поисковой архитектуре – экосистеме Hadoop. Фреймворк Apache Hadoop [50,51] - среда с открытым исходным кодом на Java для разработки и выполнения распределённых программ, работающих на вычислительных кластерах из сотен и тысяч

узлов. Базовыми модулями Apache Hadoop [52] являются: Hadoop Common (набор инфраструктурных программных библиотек и утилит, используемых для других модулей и родственных проектов); HDFS (Hadoop Distributed File System) – распределенная файловая система; Hadoop YARN – модуль управления ресурсами кластера для выполнения приложений пользователя; Hadoop MR – модель программирования для обработки Big Data. Примерами проектов, входящих в экосистемы Hadoop, являются Apache Hive, Apache Pig, Apache HBase, Apache Spark и др. HDFS построена на основной подчиненной архитектуре, где «Name Node» - мастер, а «Data Nodes» - подчиненные узлы, в которых находятся фактические данные (рис.2.1). Для доступа к данным в хранилище Hadoop используется SQL-подобный язык Hive, являющийся своего рода SQL для MR [53].

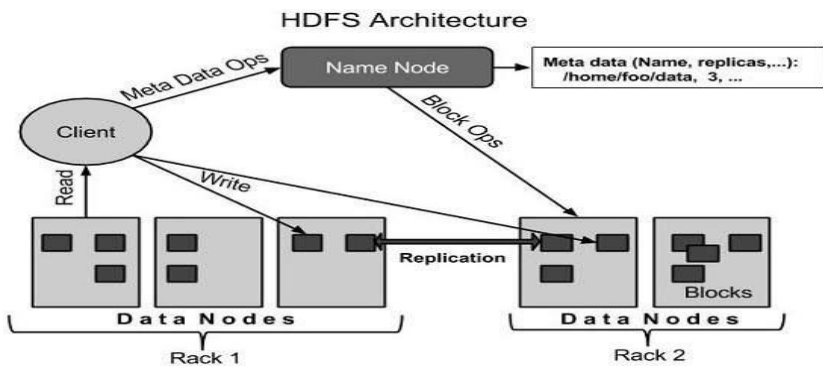


Рис. 2.1. Архитектура файловой системы Hadoop

Стандартным использованием в Hadoop архитектуре является применение MR задач (рис. 2.2). MR соответствует модели функционального программирования [54] и выполняет явную синхронизацию на этапах вычислений.

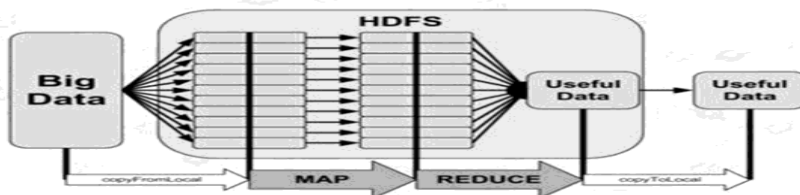


Рис. 2.2. Операции MapReduce

MR предоставляет простой API программирования с точки зрения функций map () и reduce () [55]. Apache Hadoop MR - свободная платформа

для организации обработки Big Data в петабайтах с использованием легко масштабируемой парадигмы MR, являющейся отказоустойчивым решением. MR функционирует в режиме реального времени с потоковыми Big Data, применяя алгоритмы, не предназначенные для распределенной обработки на множестве узлов без изменения реализации последних. Hadoop MR позволяет создавать задания, как с базовыми обработчиками, так и со свертками, написанными без использования Java. Утилиты Hadoop streaming используют в качестве базовых обработчиков и свертки любой исполняемый файл, работающий со стандартным вводом-выводом операционной системы. Есть также SWIG-совместимый прикладной интерфейс программирования Hadoop pipes на C++. Ограничение MR состоит в том, что она предполагает пакетное выполнение, при котором значительные объемы данных целиком проходят цепочку трансформаций, занимающих много времени, что не пригодно для интерактивных ответов пользователям.

Для быстрого анализа потоковых данных в режиме реального времени также используется Apache Spark [55,56] - универсальное средство анализа информации Big Data, позволяющее обрабатывать данные, размещенные на платформах хранения данных Hadoop, Cassandra, Mesos, S3 и т.д.. Apache Spark предоставляет стек библиотек, включая SQL и DataFrames, MLlib для машинного обучения, GraphX и Spark Streaming. По сравнению с Hadoop MR, Apache Spark обеспечивает в 100 раз большую производительность при обработке данных в памяти и в 10 раз больше - при размещении данных на дисках. Apache Spark предоставляет пользователю дружественный интерфейс программирования для уменьшения усилий по кодированию, используя концепцию распределенных коллекций данных Resilient Distributed Data (RDD). Apache Spark можно использовать в интерактивном режиме из оболочек Scala, Python, Java,, R и SQL. На рис.2.3, 2.4 показаны итерационные операции на Spark RDD с промежуточными результатами в распределенной памяти вместо стабильного хранилища (диск).

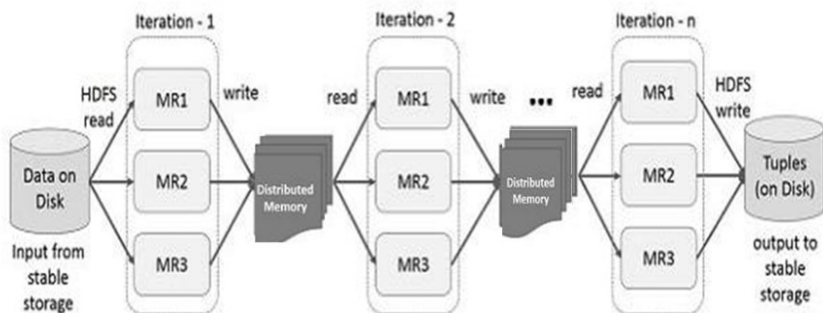


Рис. 2.3. Итеративные операции с Apache Spark RDD

Преимуществами Apache Spark по сравнению с Hadoop MR являются: высокая масштабируемость добавлением новых узлов в вычислительный кластер без необходимости внесения изменений в применяемые алгоритмы; встроенная возможность работы в режиме реального времени, позволяющая построить алгоритмы потоковой обработки данных; большое количество вспомогательных программных решений, необходимых для организации системы, поддерживающей полный цикл предметных задач. Сравнение технологий распределенных вычислений позволяет сделать выбор в пользу технологии Apache Spark.

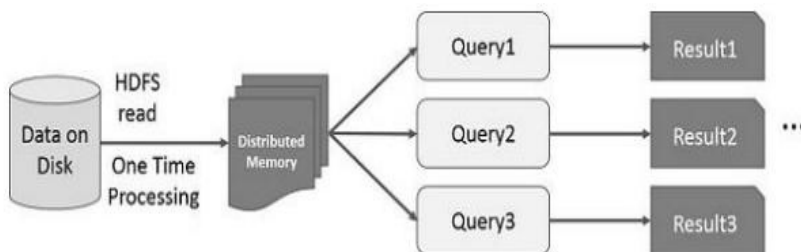


Рис. 2.4. Интерактивные операции с Apache Spark RDD.

В целях аналитики Big Data, поступающих непрерывно с ИИС СТС, а также управления технологическими процессами в них возможно использование инфраструктуры облачных вычислений. В этих целях могут применяться методы Process Analyzer (PA), создающих среду, в которой почти все этапы функционирования СТС могут быть записаны и использованы не только для безопасности систем, но и для оптимизации процесса анализа Big Data в реальном времени. Применение облачных вычислений для обработки Big Data открывает возможности для значительного снижения издержек аналитики Big Data, поступающих с измерительных устройств СТС. Необходимо учитывать, как обрабатываются и управляются данные на различных кластерах, оказывающих существенное влияние при проектировании и эксплуатации систем управления и обработки данных на нескольких уровнях. Самым сложным является быстрое рассмотрение в полном большом наборе данных, что возможно при их подготовке с высоким параллелизмом.

На рис.2.5 показано, как доступные и обслуживаемые данные через интернет обрабатываются через веб-сервер в виде запросов MySQL или NoSql и далее аналитика данных Back-end уровня, выполняемая на Apache Spark по HDFS. В облачной архитектуре используется распределенный программный брокер сообщений Apache Kafka - проект с открытым исходным кодом, написанным на языке программирования Scala, позволяющим отправлять (получать) потоковую информацию через облако.

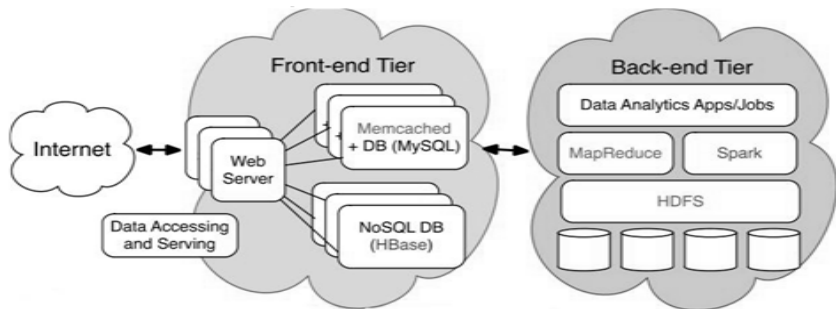


Рис. 2.5. Доступ к данным и обслуживание через интернет

На рис.2.6 представлено взаимодействие Apache Kafka, Spark-кластера при передачах потоков данных в реальном времени о состоянии СТС с задействованным сервисом Kafka в облаке.

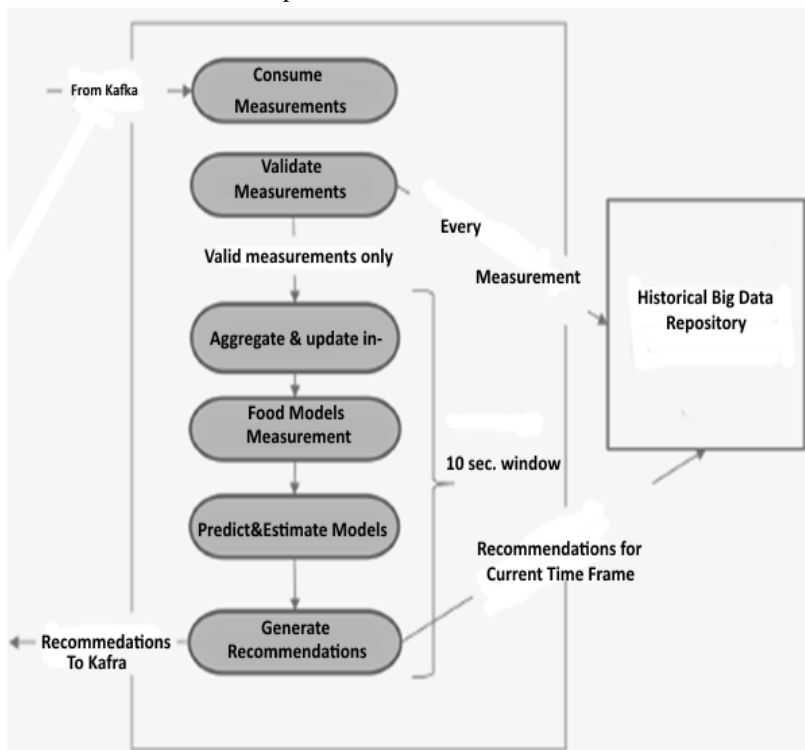


Рис.2.6. Обзор потокового процесса

В кластере данные проверяются, очищаются, агрегируются, организовываются и направляются в систему оптимального управления СТС с определением соответствующих рекомендаций по ее эксплуатации. При переносе данных на облако, используется ПЭВМ, подключенная к технологическому процессу СТС, на основе применения MefosService, позволяющего выполнять синхронизацию данных с элементов СТС, а также создавать файл в json-структуре с полями, количество которых соответствует числу элементов СТС. Входные данные обрабатываются в Kafka сервере. Spark получает данные измерений с сервера Kafka, хранит их в памяти и передает имеющиеся модели технологических процессов в элементах СТС через установленный интервал времени. Процесс передачи данных отражен на рис. 2.7. В процессе Spark-Streaming метаданные синхронизируются и предварительно обрабатываются и выводятся с ПЭВМ Mefos-Service в Kafka, оттуда в Spark-кластер. В Spark-Streaming исходные данные накапливаются в памяти и сохраняются в репозитории данных. Данные рекомендаций по управлению также накапливаются в памяти и сохраняются в репозитории Big Data.

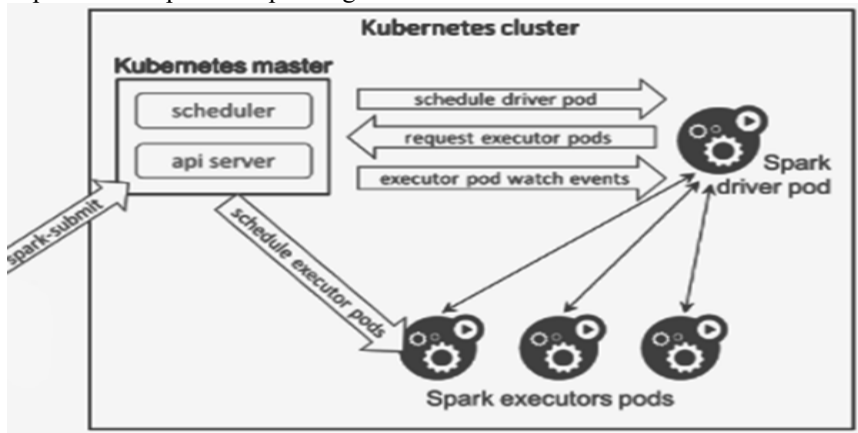


Рис.2.7. Apache Spark 2.3 с поддержкой кластера Kubernetes

Рекомендуется использовать Apache Spark с поддержкой кластера Kubernetes (рис.2.7). Учитывая, что Kubernetes является стандартом де-факто для управления контейнерными средами, вполне естественно поддерживать API-интерфейс Kubernetes в Spark.

Чтобы просмотреть ресурсы Apache Spark, созданные в кластере, можно использовать команду kubectl в отдельном окне терминала.

```
$ kubectl get pods -l 'spark-role in (driver, executor)' -w
NAME    READY STATUS RESTARTS AGE
sparkpi-driver  1/1 Running 0 14s
```

spark-pi-da1968a859653d6bab93f8e6503935f2-exec-1
0/1 Pending 0 0s

Проведенный сравнительный анализ характеристик двух файловых систем Hadoop MapReduce и Apache Spark MapReduce и Spark позволил сделать выбор в пользу системы Apache Spark для обработки потоковых Big Data.

2.4. Информационные системы мониторинга и диагностики отказов сложной технической системы

Общим в методах диагностики ТС СТС в вопросе получения и обработки информации можно указать использование процедур идентификации диагностических параметров. Согласно [57] система диагностики состоит из трех элементов: объекта диагностирования, технических средств диагностирования и оператора. Учитывая эту информацию, а также структуру информационного обеспечения в системе принятия решения согласно может использоваться следующая структура информационного обеспечения в системе диагностирования (рис. 2.8).

Для СТС используются информационные системы мониторинга (ИСМ), позволяющие увеличить качество и оперативность управления СТС (рис.2.9). В состав ИСМ входит математическое обеспечение (интерпретатор значений контролируемых параметров элементов СТС в значения, характеризующие состояния систем), позволяющее проводить анализ состояния системы.

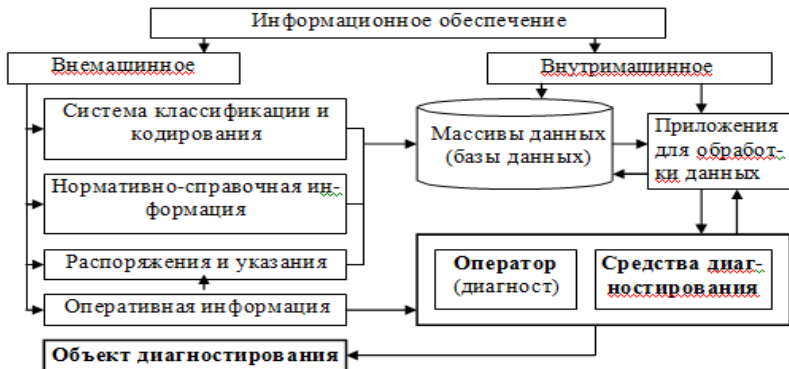


Рис.2.8. Структура информационного обеспечения в системе диагностирования на транспорте (предлагается (на основании

При достаточно большом значении времени реакции ИСМ на изменение состояния СТС и при появлении в течение этого интервала

времени редкого скачкообразного изменения (разрегулировки, отказы элементов СТС и т.д.) контролируемых параметров СТС, происходит изменение их состояния, которое не может быть адекватно воспринято ИСМ в связи с существенным значением длительности ее реакции.

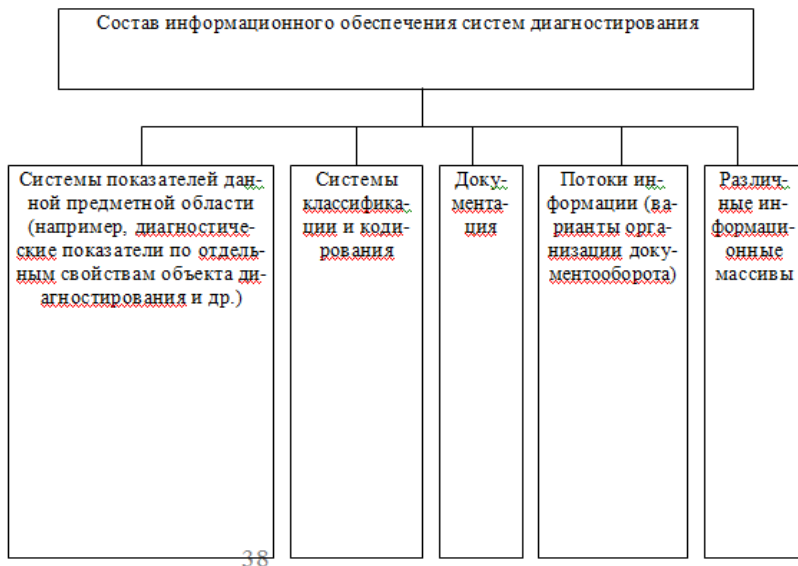


Рис. 2.9. Общая схема состава информационного обеспечения систем диагностирования (предлагается)

Для преодоления сложившегося положения необходимо разрешить противоречие между тенденциями к усложнению СТС и требованиями к снижению вероятности отказов СТС (за счет совершенствования ИСМ в части, касающейся уменьшения времени их реакции). Разрешить противоречие можно совершенствованием математического обеспечения ИСМ и ускорением расчетов контролируемых параметров.

2.5. Использование диагностической информации при прогнозировании и управлении состоянием сложных технических систем

Анализ отечественных и зарубежных работ по управлению СТС показывает, что в настоящее время при их эксплуатации в основном принята «жесткая» стратегия технического обслуживания, использующая только априорную информацию.

В то же время более перспективными являются «гибкие»

стратегии управления техническим состоянием потенциально опасных объектов, основанные на анализе и оценке фактического технического состояния объектов с использованием диагностических данных, прогнозе его изменения в процессе эксплуатации, оценке остаточного ресурса, корректировке параметров программы поддержания и функционирования в процессе эксплуатации. Для этого необходим научно-методический аппарат, позволяющий по результатам реальной оценки (достоверной диагностической информации о существовании предпосылок к аварийным ситуациям) принимать своевременные решения по предупреждению возможных чрезвычайных ситуаций. Его неотъемлемая часть — прогнозирование динамики изменения опасности объекта и принятие адекватных компенсационных мер.

Современные методы прогнозирования основаны на использовании большого числа различных математических методов. Это методы функционального анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории случайных функций и случайных процессов, спектрального анализа, теории распознавания образов. Основными факторами, влияющими на выбор способа прогнозирования состояния сложных объектов, являются совокупность имеющихся параметров, целевая направленность поставленной задачи и рабочий алгоритм.

С развитием технологии ИАД появились программные системы, выполняющие анализ систем поддержки принятия решений (СППР). Для выполнения анализа СППР должна накапливать информацию, обладая средствами ее ввода и хранения.

Постоянное накопление данных приводит к непрерывному росту их объема. В связи с этим на СППР ложится задача обеспечить надежное хранение больших объемов данных. Рост объемов анализируемых данных, высокая скорость обработки и анализа, а также сложность использования машинной формы представления данных стимулируют исследования и разработку интеллектуальных СППР. По степени «интеллектуальности» обработки данных при анализе выделяют классы задач анализа: информационно-поисковый; оперативно-аналитический; интеллектуальный.

Обобщенная архитектура СППР может быть представлена следующим образом. В подсистемах ввода данных — OLTP (Online transaction processing) - реализуется операционная (транзакционная) обработка данных. Для их реализации используют обычные системы управления базами данных (СУБД).

Для реализации подсистемы хранения используют СУБД и концепцию хранилищ данных. Подсистема анализа может быть построена на основе:

- подсистемы информационно-поискового анализа на базе реляционных СУБД и статических запросов с использованием языка SQL (Structured Query Language);

- подсистемы оперативного анализа. Для реализации таких подсистем применяется технология оперативной аналитической обработки данных OLAP (On-line analytical processing), использующая концепцию многомерного представления данных;
- подсистемы интеллектуального анализа. Данная подсистема реализует методы и алгоритмы ИАД (Data Mining).

2.6. Диагностические модели состояний сложных технических систем. Методы анализа диагностической информации

Основные аспекты системного подхода при анализе СТС: исследуемый объект является сложной системой; рассматривается система моделей объекта, его подсистем и элементов; используется система критериев оценки эффективности, надежности, безопасности и т.п.; необходима система информационного обеспечения исследований; рассматривается система процедур выработки и принятия решений на всех этапах функционирования объекта. Широта приложений системного анализа обуславливает и многообразие используемых методов. Прежде всего метод математического моделирования (включая оптимизационные, вероятностные, имитационные, нечеткие и другие модели), а также элементы теории информации, принятия решений и т.п.

Задачи, связанные с моделированием СТС для оценки риска отказов, заключаются в оценивании структурных свойств их устойчивости (надежности, стойкости, живучести, безопасности), эффективности и риска функционирования. Для решения задач используются методы, составляющие содержание системного анализа, теории надежности, теории вероятностей, математической статистики и исследования операций, в том числе цепи Маркова, теория массового обслуживания, метод статистического моделирования, аппарат полумарковских процессов и т.п. [15, 58,59]. Широко используется подход с применением вероятностной модели реального явления, учитывающей вероятность осуществления нежелательной возможности (риска) и случайный ущерб в случае ее осуществления.

Как правило, для любого исследуемого техногенного объекта распределение свойств, параметры воздействия и начальное состояние известны с той или иной степенью неопределенности. Это связано с множеством сложно учитываемых факторов, ограниченностью числа используемых параметров модели, конечной точностью экспериментальных измерений. При построении модели возможны следующие варианты описания неопределенности параметров: детерминированное; стохастическое; случайное; интервальное; нечеткое. Такая форма используется, когда информация о параметрах модели

задается экспертом на естественном языке, а, следовательно, в «нечетких» (с позиции математики) терминах.

Диагностическая модель (ДМ) — это формализованное описание объекта диагностирования, адекватно отображающее структуру, процесс смены технических состояний и обеспечивающее возможность определения технического состояния с требуемой глубиной [60]. Она является исходной для создания алгоритмов диагностирования и ее следует рассматривать как результат построения математической модели объекта с учетом его заданного конструктивного исполнения. Диагностическая модель может быть задана в явном или неявном виде. Явная модель представляет собой совокупность формальных описаний исправного и работоспособного объекта и всех его неисправных и неработоспособных состояний. Неявная модель объекта диагностирования это формальное описание объекта, математические модели его физических неисправностей и правила получения по этим данным описаний, характеризующих другие состояния. Обычно задается математическая модель исправного объекта, по которой можно построить модели неисправных состояний. Общее описание ДМ объектов контроля приводится в фундаментальных работах по технической диагностике [60]. Однако в них в основном используется структурно-аналитическое описание объекта, что в большей степени подходит для проверки исправности (в основном, на этапе производства). Поэтому актуальной является задача функционального представления объекта и построение на этой основе функциональной ДМ, которая более приспособлена для описания поведения объекта контроля на этапе эксплуатации. Для описания объекта диагностирования (ОД) используются логические и временные параметры, показатели структуры (топологии) [61]. Логические параметры описывают функционирование ОД с использованием заданного алфавита – правила трансформации значений входных переменных в значения выходных переменных и переменных внутреннего состояния. Временные параметры описывают динамику поведения ОД – характеристики переходных процессов, задержки, частоту изменения параметров и т.п. Структура формирует функциональное представление элементов и определяет характер их взаимодействия. Для описания ОД применяется аналитическая, структурная, структурно-аналитическая, поведенческая (автоматная) модели. При аналитическом описании топологии применяется система уравнений, в которых определяется зависимость выходных переменных от значений входных и внутренних переменных. При структурной форме описания топологии выполняется графическое изображение ОД в виде совокупности элементов и межсоединений. Структурно-аналитическая модель описания ОД является сочетанием рассмотренных двух моделей. Автоматная (поведенческая) модель предназначена для формального описания ОД с использованием таблиц переходов и выходов. Они заполняются значениями входных, выходных и

внутренних переменных, которые вычисляются по определенным правилам преобразования. Одним из основных этапов построения диагностической модели ОД является выбор и обоснование вида модели неисправностей, которые характерны для рассматриваемых объектов. Основные разновидности моделей неисправности: логические; логико-параметрические; логико-динамические. Для задачи проверки исправности (работоспособности) логическая модель дефектов достаточно полно описывает объект диагностирования. Для описания может быть использована дискретная (двухуровневая – «исправен»/«не исправен» или многоуровневая шкала) или непрерывная шкала (например, коэффициент готовности элемента, коэффициент ошибок потока и т.п.). Для задач проверки правильности функционирования, наряду с логической, может быть использована логико-параметрическая модель дефектов. При рассмотрении логико-динамической модели к событиям нарушения правильности или условий выполнения функций добавляются временные характеристики процедур их выполнения. Логико-динамическая модель описывает поведение неисправного ОД во времени за счет дополнительного учета временных характеристик – задержек, переходных процессов, джиттера и т.д. Это дополнительно усложняет описание ОД, так как логические дефекты дополняются неисправностями, которые описывают динамические свойства элементов и сигналов, но при этом расширяются возможности диагностирования.

Можно сделать вывод, что модель ОД характеризуется совокупностью параметров его компонентов и межсоединений, а также выбранной моделью неисправностей, которая максимально адекватна конкретному виду диагностируемого объекта.

Для эффективного и адекватного решения каждой задачи диагностирования – проверка исправности (работоспособности) и правильности функционирования, необходимо разработать и исследовать собственную ДМ. Может использоваться следующая иерархическая структура компонентов ДМ: модуль (элементарная структура) или виртуальная структура (поток, канал, стык и т.п.); блок; узел (сосредоточенная структура, содержит несколько блоков); подсеть (распределенная структура, содержит несколько узлов); сеть (распределенная структура, содержит несколько подсетей).

Для определения и индикации технического статуса объектов на уровне физических элементов СТС можно выделить возможные варианты: исправен – нет аварий и состояний; авария (у хотя бы одного из их компонентов фиксируется хотя бы одна авария); состояние (у хотя бы одного из их компонентов фиксируется хотя бы одно состояние без аварии).

Переходы между разными вариантами технического статуса в диагностике принято описывать при помощи графов [61]. На основании анализа графов переходов для процессов определения технического статуса

объектов всех уровней иерархии разработаны и реализованы алгоритмы принятия решения в соответствующих функциях программного обеспечения менеджера системы управления. В процессе моделирования структурных свойств систем и отношений между ними граф представляет собой структурную модель физических объектов различной природы.

Для описания ДМ может использоваться способ применения адаптированной таблицы функций неисправности (ТФН), которые активно применяются для решения задач технической диагностики [62]. ТФН позволяют описать поведение (например, логику функционирования) исправного устройства и устройства с различными неисправностями (дефектами). Для общего случая в таблицу диагностирования включают тесты обоих типов: проверяющие (обнаружения) и диагностирующие (поиска), в совокупности называемые диагностическими тестами.

Среди методов моделирования развита технология структурно-логического моделирования надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования СТС. Методика этой технологии стремится обеспечить полную автоматизацию процессов построения математических моделей и расчетов показателей структурных свойств устойчивости СТС в программных комплексах.

Перспективными являются модели для прогноза ТС СТС на период будущей эксплуатации и оценки количественных показателей систем. Результаты такого моделирования позволяют осуществлять переход к эксплуатации и техническому обслуживанию СТС по их фактическому состоянию, применить метод формализованной оценки безопасной (ФОБ) эксплуатации.

В настоящее время нашло широкое применение имитационное моделирование (ИМ). Оно часто осуществляется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 2.10. ИМ позволяет экспериментировать с аналитически-вероятностной моделью, проигрывая различные ситуации и упрощая принятия решения. Это соответствует ФОБ, согласно которой необходимо управлять риском путем сопоставления различных вариантов. Для каждого из них производится оценка затрат и выгод и принимается оптимальное решение для снижения риска отказов.

Разработанная теоретическая база и наличие большого спектра программного обеспечения имитации в виде мощных продуктов ИМ, таких как Arena, AutoMod, AnyLogic, Extend, GPSS World и других [63,64] способствует широкому применению ИМ. Однако программные средства облегчают только сам процесс испытаний и не касаются самой трудоемкой задачи сбора исходной информации, ее интерпретации, формализации и адекватного соотношения с конкретным объектом. Освоение таких программных сред требует значительных усилий. Перспективным при оценке риска отказов СТС является применение методологии когнитивно-имитационного моделирования (КИМ), используемой для анализа и

принятия решений в неопределенных ситуациях (рис.2.11). Методологию рекомендуется использовать при разработке систем прогнозирования технического состояния и поддержки принятия решений [44,65].

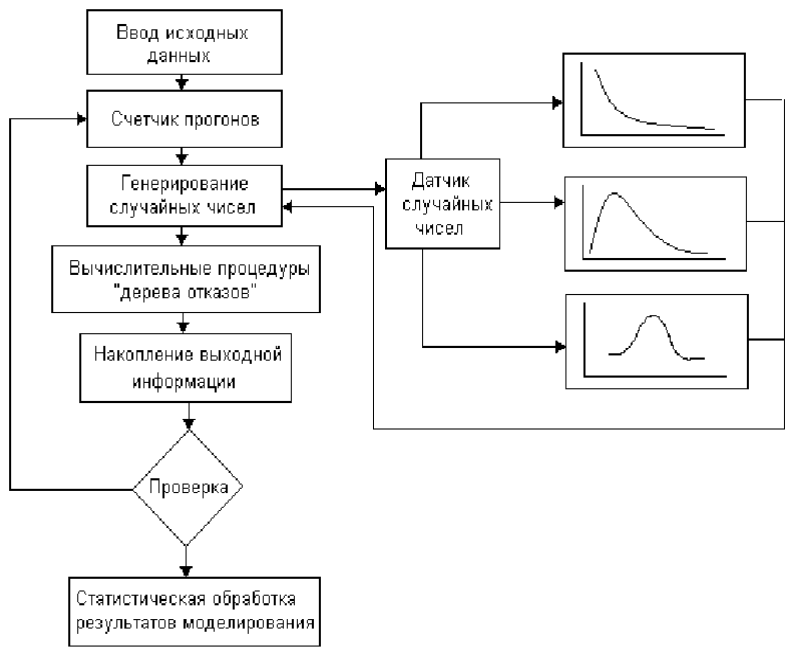


Рис. 2.10. Блок-схема имитационного моделирования



Рис. 2.11. Когнитивно-имитационные модели оценки риска отказов СТС

Существенным преимуществом КИМ является использование при моделировании частично-достоверных и неполных данных об объекте исследования. Анализ и оценка риска отказов СТС связаны с использованием неопределенной информации, обусловленной сложностью, случайностями различного типа, неточностями, невозможностями проведения адекватных измерений, недостатком знаний об объекте. Применение аппарата нечеткой логики позволяет получить адекватный ответ на перечисленные проблемы.

При формировании нечетко-вероятностных моделей оценки риска отказов СТС используются различные подходы, позволяющие заблаговременно идентифицировать возможный переход конкретного процесса в аварийный режим для предотвращения риска в неприемлемых масштабах.

В работах [66, 67] описано применение нечетко-вероятностных моделей оценок рисков СТС, позволяющих заблаговременно идентифицировать возможный переход конкретного процесса в аварийный режим для предотвращения и риска в неприемлемых масштабах. В [68] качестве подобной модели используется модель идентификации предаварийных ситуаций технологического процесса на основе аппарата нечеткой логики с дополнением по [69] элементами, позволяющими учитывать вероятность отказов оборудования СТС.

Для анализа и оценки риска отказов часто используются нечеткие когнитивные карты, построенные в виде проекции на топологию сети, позволяющие визуализировать пути распространения возможных угроз в СТС. Недостатком является отсутствие возможности идентификации нечетких лингвистических переменных для определения градаций уровня рисков, что является существенным для оценки риска отказов СТС в условиях неопределенности.

Использование нечеткой логики для построения нечетко-вероятностных моделей оценки риска отказов взаимосвязанных и взаимодействующих элементов и межэлементных связей СТС позволяет уменьшить затраты времени на исследования.

Однако в стандартах формулируются только критерии оценки безопасности, но не содержатся модели и детали, позволяющие проводить сравнительный анализ вариантов оценки риска отказов СТС на основе аппарата нечеткой логики.

Проведенный анализ методов моделирования для оценки риска отказов СТС показал перспективность и необходимость развития методов когнитивно-имитационного и нечеткого моделирования для оценки структурного и функционального риска отказов элементов и межэлементных связей взаимосвязанных и взаимодействующих СТС.

ГЛАВА 3. Информационное обеспечение мониторинга и диагностики технического состояния сложных технических систем

3.1. Обработка диагностических данных большого объема технического состояния сложных технических систем

В настоящее время для обеспечения процессов обработки и анализа Big Data активно применяются решения на основе модели распределенных вычислений Map Reduce, что позволяет обеспечить параллельную обработку данных и увеличить скорость их обработки [70-77]. Благодаря использованию распределенной файловой системы (HDFS) становится возможным гибкая организация процессов обработки и свертки данных на управляющий сервер. Преимуществами такого подхода является автоматизация распределения вычислительных узлов на кластеры в рамках компьютерной сети, что позволяет задействовать вычислительные возможности неограниченного числа хостов, обеспечить имплементацию алгоритмов резервирования данных для обеспечения надежности их хранения, а также поддерживать программные реализации для большинства современных языков программирования высокого уровня [78-81]. Недостатками модели является трудоемкость организации обработки потоковых данных в режиме реального времени, сложность в развертывании системы при нестабильности канала передачи данных с низкой пропускной способностью, ресурсоемкая процедура визуализации данных по итерациям их обработки. При увеличении длины SQL команд на агрегированные операции поиска, выборки, вставки и сохранения данных в реляционных СУБД, возрастает сложность формирования транзакционных запросов к базам данных (БД). В зависимости от используемых аппаратных ресурсов это может существенно снижать быстродействие и эффективность обработки данных в режиме реального времени. Поэтому, в качестве хранилищ Big Data целесообразно использование не реляционных БД (NoSQL), а MongoDB, Redis, HBase, Firebase и др. Использование NoSQL в рамках обработки Big Data обусловлено факторами: высокий уровень гибкости в обеспечении необходимого уровня масштабирования данных; отсутствие ограничений на хранимые типы данных; поддержка модели представления данных; наличие документно-ориентированного подхода.

Для больших объемов технической информации характерна статичность и стабильность, т.к. значительную часть времени эксплуатации СТС в штатных условиях ее параметры резко не меняются. Такая специфика обуславливает необходимость постоянной реорганизации данных с целью исключения малоинформативных массивов и применения статистических аналитических процедур для обобщения и агрегации информации, что требует дополнительных вычислительных ресурсов и операций [82]. Для

решения подобных задач целесообразной является разработка аналитического блока, реализующего парсинг и классификацию данных с целью их сжатия в виде отдельного узла при имплементации микросервисной архитектуры. Задачей при обработке Big Data от датчиков параметров элементов системы, модулей сбора и передачи данных, управляющих модулей СТС, является эффективная сегментация и кластеризация информации на отдельные множества [83]. Преимуществом подхода является возможность проведения более точного анализа данных параллельным использованием разных типов моделей для каждого из выделенных множеств, что позволяет осуществлять сопоставление и анализ адекватности каждой из них, а также способствует уменьшению числа совершаемых вычислительных операций по обработке массива данных.

Актуальными являются исследования возможностей структурирования и краткого представления поступающих данных для обеспечения возможностей их дальнейшей обработки и анализа. Полученные модели могут интегрироваться в проектируемые системы поддержки принятия решений на основе использования методов искусственного интеллекта (ИИ) для извлечения из собранных данных новых полезных знаний и выявления скрытых закономерностей (Data mining) [84]. Подобные системы позволят снизить затраты времени на аналитические операции, позволяя проводить оценку различных сценариев эксплуатации СТС, их подсистем и элементов, строить аналитические модели и производить прогноз технического состояния систем.

Эффективность организации процесса Data mining для Big Data существенно зависит от типа представления данных, их согласованности, качества очистки, целостности, упорядоченности и детализации. В современном ИИ существует значительное число подходов, позволяющих проектировать обучающиеся системы для автоматизации процессов поиска, накопления, структурирования данных и знаний [85]. Наиболее перспективными из них являются искусственные иммунные и нейронные сети, глубокое машинное обучение и гибридные адаптивные алгоритмы обучения, в основе которых находятся принципы и модели функционирования головного мозга человека. Подобные методы позволяют существенным образом ускорить процессы анализа Big Data, однако, для их применения необходима первоначальная структуризация данных и выявления значимых признаков для формирования входных и выходных данных проектируемых моделей [86]. В рамках решаемой задачи возможно применение метода деревьев принятия решений (DCT) для описания ключевой онтологической метаинформации о разнородных наборах данных больших объемов [87]. Визуализация DCT осуществляется отображением связанного ориентированного ациклического графа [88-90]. Ветви графа построенного DCT хранят в себе значения атрибутов, представляющих собой функциональные параметры элементов СТС, от которых зависит

целевая функция, а на листьях DCT выводиться ее значение. Концептуальная схема состава предлагаемой системы структурирования и обработки Big Data приведена на рис.3.1.

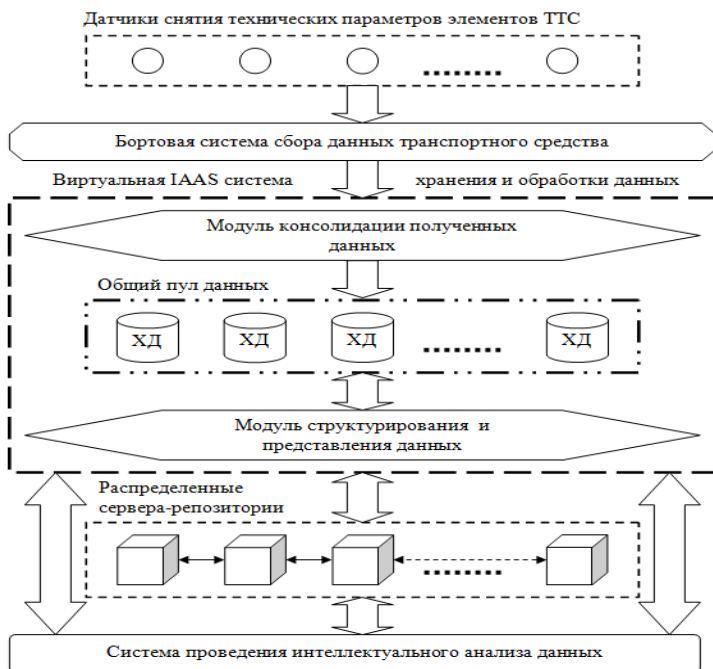


Рис.3.1. Концептуальная схема состава системы структурирования и обработки Big Data

Под управлением системы сбора данных осуществляется сбор и преобразование технических параметров элементов СТС от сенсоров. Полученные данные агрегируются, структурируются по принадлежности к подсистемам и сохраняются в файлах формата *.json, после чего отдельными потоками отправляются в облачную IAAS инфраструктуру с использованием виртуального рабочего окружения и контейнеризации средствами Docker. Интегрированные в рамках IAAS системы данные обрабатываются модулем консолидации по заданным критериям с целью их дальнейшего согласованного и равномерно распределения в рамках отдельных хранилищ данных (DS) в виде узлов (Nodes) пространства данных (пула). Модуль представления и структурирования данных (МПСД) осуществляет запрос на извлечения требуемых данных заданного объема в пул, в ответ на который возвращается набор данных из соответствующих

DS. В результате работы МПСД полученные модели DCT в виде упорядоченной схемы метаданных в форматах json и xml отправляются для дальнейшего хранения в распределенные репозитории, функционирующие под управлением файловой системы HDFS. Дальнейшее проведение интеллектуального анализа данных по хранимой метайнформации становится возможным использованием аналитического программного обеспечения (Kname, SPSS Statistics, QIWare или др.) или собственной информационной системы.

В случае необходимости проведения дополнительных операций по обработке или анализу данных из системы должен быть предусмотрен прямой доступ к IAAS системе посредством интеграции соответствующего API или поддержки RDP с сервисом режима терминального доступа. Предлагаемый подход построения модели DCT основывается на алгоритме CART. Модель DCT включает в себя: корневую вершину, которая инцидентна всем выходящим из нее рёбрам графа; внутренние вершины, инцидентные единственному входящему ребру графа и нескольким выходящим; концевые вершины, которые инцидентны входящему ребру.

Логически, построение модели DCT формируется путем выполнения следующих этапов:

1. Выбор подмножества обучающей выборки заданного размера, для построения структуры дерева.

2. На каждой итерации по формированию нового разделения в дереве проводится численная оценка частотности признаков.

3. Выбор признака с максимальной частотностью проявления и осуществление операции разделения иерархии дерева на новый уровень.

Данный процесс повторяется до исчерпания всей обучающей выборки или достижения заданных первоначально граничных условий, в частности, максимально допустимой глубины дерева.

Для снижения размерности хранимых данных необходимо осуществить оценку технического состояния каждого из элементов ТС исходя из набора нескольких разнородных параметров, т.е. решить задачу классификации.

В качестве примера для проведения исследований выбрана судовая энергетическая установка на базе Wartsila 16V50DF [91].

Предусмотрено выполнение двух комплексов операций (представления и структурирования), содержащих этапы (рис.3.2).

Основными параметрами, регулирующими логику выполнения процесса построения МПСД модели DCT, являются:

- CR , критерий разделения дерева - индекс неоднородности;
- DP , уровень максимальной глубины дерева;
- CN , значение уровня достоверности построения модели для оценки пессимистической ошибки отсечения ветвей дерева;
- LT , минимальное значение листа дерева;

- *LS*, минимальный размер выборки в обучающем подмножестве;
 - *PP*, количество альтернативных узлов дерева для ранней остановки
 при построении DCT.

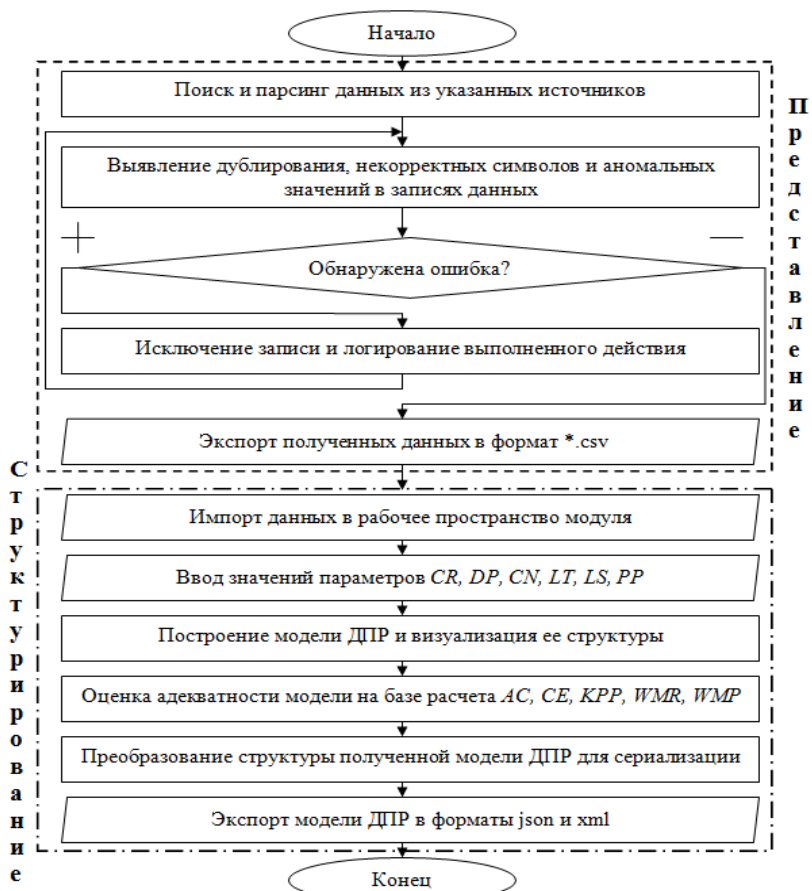


Рис.3.2. Общий алгоритм построения модели DCT описания больших данных

В качестве функциональных параметров (атрибутов) для построения модели DCT используются следующие показатели по всем элементам СТС:

– структурный риск выхода из строя элемента системы (R_{str}), отображающий уровень его уязвимости в топологии СТС, принимает вещественный тип данных в диапазоне $[0,1]$;

– функциональный риск выхода из строя элемента системы (R_{func}), отображающий уровень его уязвимости в динамике функционирования СТС, принимает вещественный тип данных в диапазоне $[0,1]$;

– режим эксплуатации элемента системы (OM), характеризует интенсивность и нагрузку его использования, принимает строковый тип данных в виде двух возможных вариантов «Штатный» (Regular) и «Внештатный» (Irregular);

– длительность эксплуатации элемента системы (OD), определяет срок его функционального использования в рамках системы, принимает целочисленный тип данных в диапазоне $[1,20]$;

– степень ремонтпригодности элемента системы (MD), формализует уровень подверженности элемента к функциональным модификациям при отказе для оперативного обеспечения его дальнейшего функционирования, принимает строковый тип данных в виде трех возможных вариантов «Низкая» (Low), «Средняя» (Middle) и «Высокая» (High);

– степень физического износа элемента системы (W), отображает уровень его повреждений, оказывающих влияние на его целевое функционирование, принимает целочисленный тип данных в виде процентов от 0 до 100%;

– регламентная наработка на отказ элемента системы ($MTBF$), характеризует средний период времени между возникновением отказов в его работе, принимает целочисленный тип данных в диапазоне от 0 до 10^6 ;

– количество выполненных ремонтов элемента (RN), описывает историю проведения технических манипуляций по восстановлению его работоспособности, принимает целочисленный тип данных в диапазоне $[1,10]$;

– среднерыночная стоимость элемента (EC), характеризует критичность его выхода из строя с финансовой точки зрения и потенциальную стоимость замены, принимает целочисленный тип данных в диапазоне $[10^3,10^5]$;

– работоспособность элемента (PR), принимает строковый тип данных в виде трех возможных вариантов «Низкая» (Low), «Средняя» (Middle) и «Высокая» (High).

Интегральным показателем оценки элемента (целевой переменной для классификации) системы является его техническое состояние (TS), т.е. конечным значением листа DCT может быть один из двух классов «Допустимое» (Acceptable) и «Недопустимое» (Unacceptable).

Итоговый функционал данных для описания на базе DCT имеет вид

$$TS\langle\text{Acceptable}, \text{Unacceptable}\rangle = \{R_{\text{str}}, R_{\text{func}}, OM, OD, MD, W, MTBF, RN, EC, PR\}$$

Значения R_{str} и R_{func} формируются на базе подхода построения КИМ оценки риска отказов СТС с применением поражающих моделирующих импульсов и нормирующих воздействий.

Работоспособность и степень ремонтпригодности MD оценены экспертным путем на базе использования методов последовательных сравнений с учетом коэффициента ранговой корреляции Спирмана.

Среднерыночная стоимость элемента EC определена на базе анализа и сопоставления цен от 5 разных производителей путем усреднения итоговых значений.

Остальные статистические данные по 20000 элементов взяты из базы данных OREDA [92].

Для исследования возможности повышения эффективности решения задачи классификации при построении модели DCT предлагается использовать следующие индексы неоднородности:

1. Информационная энтропия (IG). Рассчитывается энтропия всех атрибутов модели (C) по выборке данных (X) и выбирается атрибут с наименьшим значением энтропии для формирования дальнейших ветвей.

$$IG(C) = -\sum p(X) \log p(X), \tag{3.1}$$

где, $p(X)$ - доля примеров в заданном классе модели DCT, C – число атрибутов модели.

2. Коэффициент усиления информации (GR). Модифицированный вариант IG , расширяющий информационную энтропию для каждого атрибута модели с целью обеспечения широты и однородности при обработке данных и уменьшения смещения в сторону многозначных атрибутов.

GR определяется через показатель разделения информации (SP), который представляет потенциальную информацию, сгенерированную путем разделения набора обучающих данных X на v разделов, соответствующих результатам атрибута C .

$$SPC(X) = -\sum (|X_j|/X) \log_2(X_j/X), j=1..v \tag{3.2}$$

Итоговое значение GR определяется как

$$GR(C) = G(C)/SP(C) \tag{3.3}$$

3. Индекс Джини (GI). Мера неравенства между распределениями характеристик набора данных. Разделение по выбранному атрибуту модели приводит к уменьшению среднего индекса Джини в результирующих подмножествах. Если набор данных X содержит данные n классов, тогда индекс Gini определяется следующим образом

$$Gini(X) = 1 - \sum p_i^2, i=1..n, \tag{3.4}$$

где p_i — вероятность (относительная частота) класса i в X .

Наилучшим считается разбиение, для которого $Gini(X)$ минимально. Если N — число примеров в узле — предке, L, R — число примеров соответственно в левом и правом потомке, l_i и r_i — число экземпляров i -го

класса в левом/правом потомке. Тогда качество разбиения оценивается по следующей формуле

$$Gini(X^i) = N - ((1/L \sum l_i^2) + (1/R \sum r_i^2)) \rightarrow \min, i = 1..n \quad (3.5)$$

4. Стандартная точность (*AC*). На каждом шаге выбирается такой атрибут для разделения, который максимизирует общую точность классификации модели.

С целью оценки качества построения модели целесообразно задействовать и имплементировать следующие численные метрики:

– *ACC* – относительное количество правильно классифицированных примеров в выборке данных, т.е. процент верных классификаций

$$ACC = (t_p + t_n) / (t_p + f_p + f_n + t_n), \quad (3.6)$$

где t_p (True Positive) – истинно положительный вариант оценки моделью DCT технического состояния ТС, f_p (False Positive) – ложно положительный вариант оценки моделью DCT технического состояния ТС, f_n (False Negative) – ложно отрицательный вариант оценки моделью DCT состояния ТС, t_n (True Negative) – истинно отрицательный вариант оценки моделью DCT технического состояния ТС.

– *CE* – относительное количество неверно классифицированных примеров в выборке данных, т.е. процент не правильных классификаций. Ошибка классификации *CE* моделью DCT зависит от количества неправильно классифицированных выборок и оценивается по формуле

$$CE = (F/n) \cdot 100, \quad (3.7)$$

где *F* – количество неправильно выбранных выборок, а *n* – общее количество выборок.

– *KPP* – каппа-статистика, позволяет провести учет случайной правильной классификации.

$$KPP = (P_0 - P_e) / ((\max P_0) - P_e), \quad (3.8)$$

где P_0 – исходная характеристика близости классов, P_e – случайная величина в диапазоне от 0 до P_0 .

– *WMR* – значение средневзвешенной полноты классификации, т.е. доля правильно классифицированных записей относительно общего количества всех релевантных записей в выборке.

– *WMP* – значение средневзвешенной точности классификации, т.е. доля правильно классифицированных записей относительно всей обработанной выборки.

С целью апробации концепции структурного представления онтологической схемы метаинформации о данных проведено моделирование процесса функционирования МПСД построением DCT по обозначенному функционалу TS ТС средствами кроссплатформенного программного обеспечения Rapid Miner Studio. После проведения сбора и

предобработки данных на основе их автоматического (ручного) статистического анализа с использованием диаграмм размаха распределений, осуществлена их консолидация стандартными средствами системы. Данные импортированы в рабочее пространство системы средствами функционального блока Retrieve (рис.3.3).

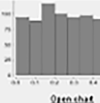
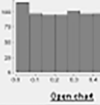

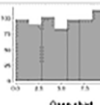
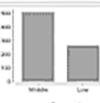
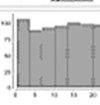
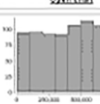
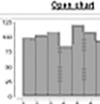
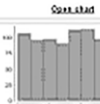
^ StructRisk	Real	0		Min 0.001	Max 0.666	Average 0.337	Deviation 0.192
^ FunkRisk	Real	0		Min 0.002	Max 0.665	Average 0.333	Deviation 0.196
^ OperMode	Polynomial	0		Least Irregular (999)	Most Irregular (999)	Values Irregular (999) Details...	
^ OperDurat	Real	0		Min 0.026	Max 19.935	Average 7.174	Deviation 4.000
^ Maintainability	Polynomial	0		Least High (230)	Most Middle (506)	Values Middle (506), Low (265), High (230) Details...	
^ Wear	Real	0		Min 0.351	Max 33.310	Average 17.141	Deviation 9.635
^ FailureMean	Real	0		Min 1109.749	Max 999734.014	Average 507681.995	Deviation 286314.751
^ Repairs	Real	0		Min 1.005	Max 9.994	Average 5.436	Deviation 2.558
^ Average cost	Real	0		Min 1007.507	Max 99945.079	Average 50146.621	Deviation 28508.536

Рис.3.3. Фрагмент результатов статистической обработки представленных данных для формирования модели DCT

Импортированные данные с блока Retrieve поступают на блок Set Role, необходимый для установки логических ролей нужным атрибутам анализируемой выборки данных. С помощью данного блока осуществляется выбор целевой выходной переменной для формирования структуры DCT, которой в нашем случае является техническое состояние элемента CTC.

Настроенный набор данных поступает на вход блока Split Data, осуществляющего разбиение выборки на подмножества в соответствии с выбранным соотношением. Блок сконфигурирован таким образом: для обучающего подмножества доля выборки расположена в диапазоне [50%;70%], для тестового подмножества диапазон - [50%;30%]. Разделение производится следующим образом, если метка является номинальной, то выполняется стратифицированная выборка (случайные подмножества выделяются так, чтобы каждый поднабор содержал примерно одинаковые пропорции двух значений целевой переменной), в противном случае осуществляется простая перемешанная выборка данных. Разделенные данные поступают на вход блоку конфигурации модели DCT (Decision Tree) и блоку сопоставления результатов (Apply Model), необходимому для осуществления дальнейшей оценки эффективности работы модели. Блок Decision Tree реализует операторы задания всех обозначенных ранее параметров и ограничений при построении имитационной модели DCT (рис 3.4), позволяя осуществлять выбор и конфигурацию различных комбинаций структурирования обрабатываемых данных по элементам CTC с целью выявления наиболее информативного их представления в графическом виде.

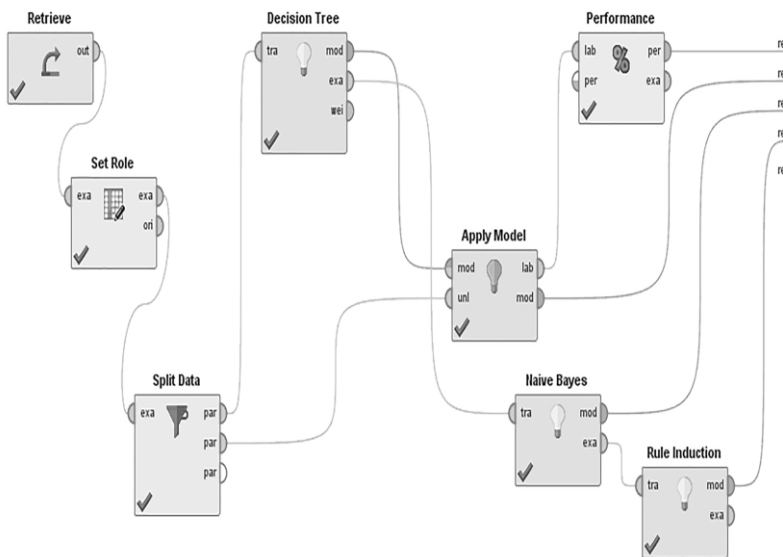


Рис.3.4. Блоковый состав имитационной модели построения DCT

Определение численных значений метрик оценки качества работы построенной модели DCT осуществляется в блоке Perfomance. Результаты оценки выводятся из блока Perfomance для визуализации модели в режиме анализа результатов системой Rapid Miner Studio. С целью информационного дополнения структурированной модели DCT необходимо определение и формализация логических продукционных правил способных упростить представление и интерпретацию данных в блоках Native Bayes и Rule Induction. С блока Decision Tree данные поступают на Native Bayes. После завершения процесса обработки осуществляется их передача в блок Rule Induction. Полученные результаты визуализируются. Структура модели DCT на базе использования индекса GR приведена на рис.3.5.

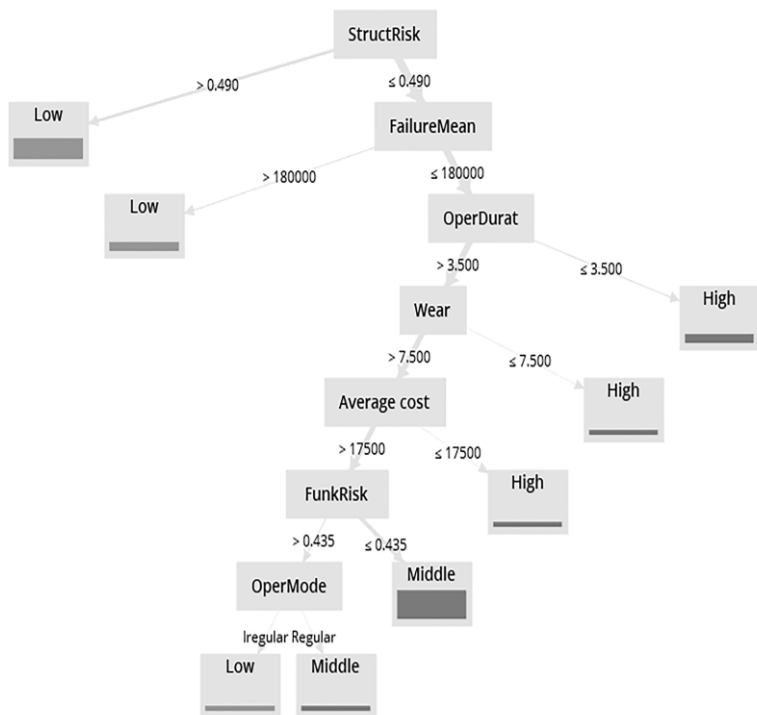


Рис.3.5. Структура модели DCT на базе использования индекса GR

Корнем дерева является атрибут структурного риска отказов. при значении ниже 0.49 модель классифицирует уровень работоспособности системы как низкий. Если R_{str} превышает значение 0.49, осуществляется

классификация по остальным атрибутам в порядке убывания их приоритетности. Следующим атрибутом модели DCT является регламентная наработка на отказ, превышение которым значения 180000 приводит к разбиению данных по длительность эксплуатации элемента (значение менее или равно 3.5 - высокий уровень работоспособности), степени физического износа (значение менее или равно 7.5 - высокий уровень работоспособности), среднерыночной стоимости (значение менее или равно 17500 - высокий уровень работоспособности). При дальнейшем разбиении дерева по атрибуту функционального риска класс работоспособности является средним (значение функционального риска отказов меньше или равно 0.435) или низким (режим эксплуатации является внештатным).

Для модели DCT на базе использования индекса IG (рис.3.6) характерным является отличие порядка разделения атрибутов, в частности, более высокий приоритет атрибута степени физического износа. Если параметр системы принимает значение более или равное 16, то дальнейшее разбиение осуществляется по атрибуту степени ремонтпригодности и структурному риску по значению 0.26. Если значение степени физического износа выше 16, то осуществляется разбиение дерева в соответствии со значениями функционального риска отказов (средний уровень работоспособности соответствует значению R_{func} менее или равному 0.32) и структурного риска отказов (низкий уровень работоспособности соответствует значению R_{str} более 0,305).

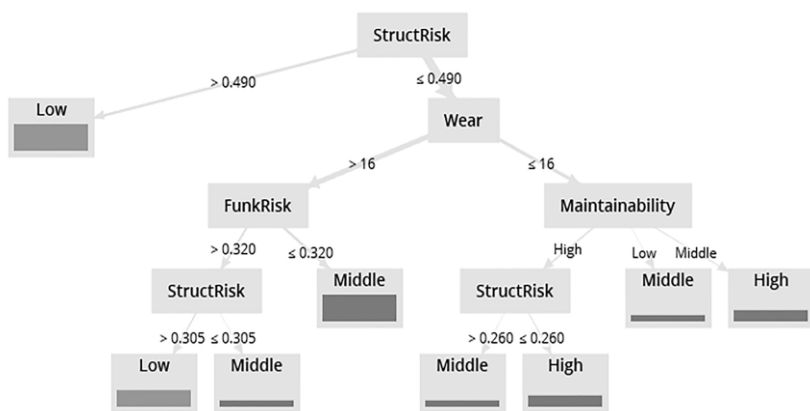


Рис.3.6. Структура модели DCT на базе использования индекса IG

Согласно модели, низкому уровню работоспособности СТС соответствует значения наиболее приоритетного параметра – структурного риска отказов в диапазоне (0.305;1], среднему [0.305;0.26) и высокому

[0.25;1]. Для модели DCT на базе использования индекса GI (рис.3.7) равными по приоритету после структурного риска отказов являются среднерыночная стоимость и степень физического износа. Структура модели DCT на базе использования стандартной точности приведена на рис.3.8. Более значимыми после структурного риска отказов являются функциональный риск отказов и степень физического износа. В моделях DCT структурируются и отображаются результаты решения задачи классификации данных по степени работоспособности СТС с разной степенью детализации и уровнем гибкости в интерпретации. В связи с этим необходимо проведение численной оценки используемых метрик для комплексного анализа результатов. Сводные результаты оценки метрик полученных моделей DCT по индексам GR, IG, GI и AC приведены в табл.3.1.

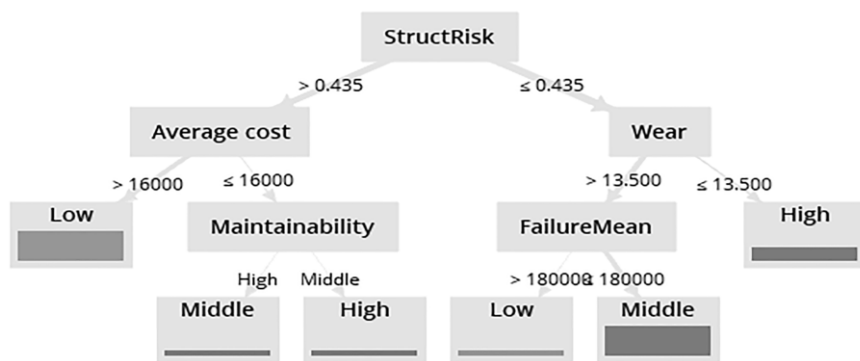


Рис.3.7. Структура модели DCT на базе использования индекса GI

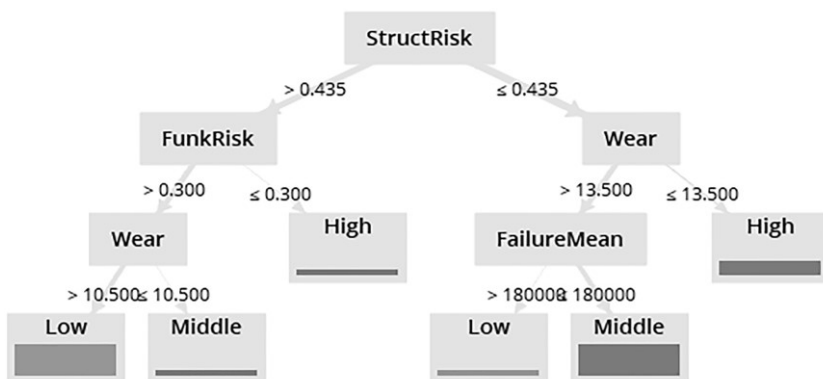


Рис.3.8. Структура модели DCT на базе использования стандартной точности

Таблица 3.1. Сводные результаты оценки метрик моделей DCT

		Используемые индексы			
		GR	IG	GI	AC
Значения метрик	ACC	98.01%	96.79%	91.24%	93%
	CE	1.99%	3.21%	8.76%	7%
	KPP	0.966	0.95	0.89	0.9
	WMR	98.48%	97.57%	92.91%	91.73%
	WMP	97.22%	95.70%	91.26%	89.95%

Классификация, выполненная на основе использования индексов GI, AC является менее точной из-за низких значений рассчитанных метрик. С целью дополнительного анализа уровня достоверности классификации данных моделями DCT составлена матрица ошибок по использованным индексам (табл. 3.2). Из анализа матрицы показатели точности и полноты классификации являются наиболее высокими для моделей, основанных на использовании индекса GA. Модели DCT, основанные на IG, GI и AC имеют более низкие показатели, что подтверждает их меньшую точность адекватного представления анализируемого набора данных. Т.к. атрибут PR является величиной, полученной экспертным путем, целесообразно проведение статического анализа результатов классификации с измененной целевой функцией (табл. 3.3).

Полученные средние значения находятся в диапазонах, близких к статистически определенным значениям в изначальной импортированной выборке данных, что является дополнительным подтверждением адекватности полученных результатов. Фрагмент полученных логических правил по выполненной модели DCT на основе индекса GA классификации данных приведен ниже. Полученный массив логических правил может быть использован для дополнения массивов метаданных и дальнейшего построения нейро-нечетких моделей оценки взаимосвязи между техническими параметрами элементов ТС и более глубокого поиска и выявления скрытых ассоциативных правил между ними.

```

StructRisk > 0.490: Low {High=0, Middle=0, Low=5}
StructRisk ≤ 0.490
| FailureMean > 180000: Low {High=0, Middle=0, Low=2}
| FailureMean ≤ 180000
| | OperDurat > 3.500
| | | Wear > 7.500
| | | | Average cost > 17500
| | | | | StructRisk > 0.435
    
```

						OperMode = Iregular: Low {High=0, Middle=0, Low=1}
						OperMode = Regular: Middle {High=0, Middle=1,
Low=0}						
						StructRisk ≤ 0.435: Middle {High=0, Middle=7, Low=0}
						Average cost ≤ 17500: High {High=1, Middle=0, Low=0}
						Wear ≤ 7.500: High {High=1, Middle=0, Low=0}
						OperDurat ≤ 3.500: High {High=2, Middle=0, Low=0}

Наибольшие значения точности классификации моделью данных АСС получены для GR и IG, 98.01% и 96.79% соответственно. Для данных индексов значения KPP, WMR и WMP превышают значение 0.95, что свидетельствует о высокой точности и достоверности решения задачи классификации. С точки зрения удобства представления метаинформации о данных и ее дальнейшем интерпретации более детализированной и гибкой является модель DCT, реализованная на базе GR.

Результующее распределение плотности атрибута R_{str} по допустимому и не допустимому TS ТС по усредненной выборке данных приведено на рис.3.9. Пик роста значений класса допустимого TS наблюдается в диапазоне 0.25 – 0.33 (плотность составляет около 2.3) и является менее широким по форме в сравнении с диапазоном значений класса не допустимого TS (0.31-0.41, значение плотности близко к 2). Это свидетельствует о превалировании исследуемых наборов данных с отрицательным исходом (TS системы является не допустимым и требует оперативного вмешательства). Точечная диаграмма рассеивания выявления корреляции между структурным риском отказов и техническим состоянием элементов СТС приведена на рис.3.10.

На диаграмме каждой записи анализируемого набора данных соответствует точка, декартовы координаты которой соответствуют классифицированным значениям структурного риска по оси абсцисс и TS СТС по оси ординат. Анализ построенной диаграммы рассеивания позволяет подтвердить ранее высказанное утверждение о превалировании случаев, когда TS является недопустимым. Визуализация данных позволяет дополнительно выявить небольшие выбросы значений на граничных (начальном и конечном) диапазонах, которые могут быть отсечены в процессе проведения дальнейшего анализа.

Полезным является сопоставление уровня корреляции между структурным и функциональным риском отказов по отношению к целевой переменной TS. Точечная диаграмма рассеивания выявления корреляции между функциональным риском и техническим состоянием элементов СТС приведена на рис.3.11. Из диаграммы следует однородность отображенных данных и низкая степень выбросов, обусловленных ошибками и погрешностями при их обработке.

Таблица 3.2. Матрица ошибок моделей DCT

GA			
	Истинно допустимое TS	Истинно не допустимое TS	Точность классификации
Классифицировано допустимое TS	10200	600	94.44%
Классифицировано не допустимое TS	0	19100	100%
Полнота лассификации	100%	96.95%	
IG			
	Истинно допустимое TS	Истинно не допустимое TS	Точность классификации
Классифицировано допустимое TS	17000	1600	91.40%
Классифицировано не допустимое TS	3	31300	95,84%
Полнота лассификации	95,84%	95.14%	
GI			
	Истинно допустимое TS	Истинно не допустимое TS	Точность классификации
Классифицировано допустимое TS	13600	1100	92.52%
Классифицировано не допустимое TS	0	25200	100%
Полнота лассификации	100%	92.82%	
AC			
	Истинно допустимое TS	Истинно не допустимое TS	Точность классификации
Классифицировано допустимое TS	6800	600	91.86%
Классифицировано не допустимое TS	0	12600	100%
Полнота лассификации	100%	95.45%	

Таблица 3.3. Результаты статистической оценки классификации моделью атрибутов

Атрибут	Параметр	Максимальное значение PR	Среднее значение PR	Минимальное значение PR
Rstr	Среднее значение	0.243	0.318	0.523
	Стандартное отклонение	0.179	0.136	0.13
Rfunc	Среднее значение	0.303	0.287	0.527
	Стандартное отклонение	0.076	0.148	0.17
OM	value=Regular	0.958	0.495	0.333
	value=Irregular	0.042	0.505	0.667
OD	Среднее значение	5	9.333	8.667
	Стандартное отклонение	3.464	4.885	6.088
MD	value=High	0.347	0.181	0.022
	value=Middle	0.633	0.489	0.649
	value=Low	0.02	0.33	0.33
W	Среднее значение	12	26.5	33.5
	Стандартное отклонение	3	12.406	16.622
MTBF	Среднее значение	35000	20500	126167
	Стандартное отклонение	35000	10728.5	120330
RN	Среднее значение	2.667	4.333	4.333
	Стандартное отклонение	0.577	2.944	1.966
EC	Среднее значение	37333.3	67166.7	40500
	Стандартное отклонение	19399.3	44024.6	17762.3
TS	value=Acceptable	0.749	0.413	0.186
	value=Unacceptable	0.113	0.873	0.291

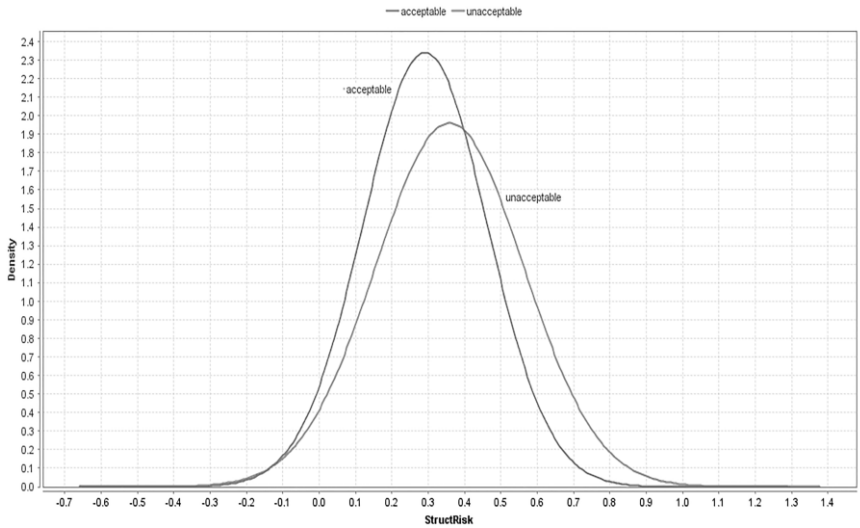


Рис.3.9. Распределение плотности атрибута Structure Risk

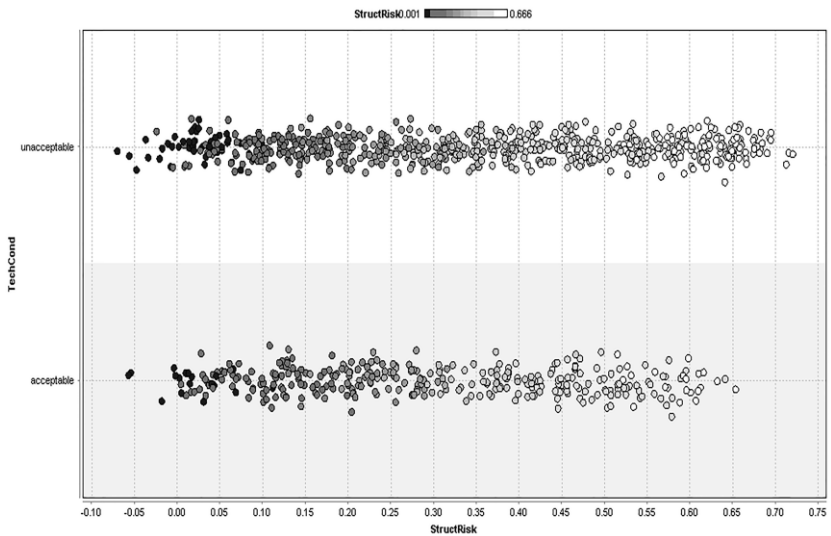


Рис.3.10. Точечная диаграмма рассеивания выявления корреляции между структурным риском и техническим состоянием элементов

Плотность распределения данных технического состояния СТС в зависимости от износа и выполненных ремонтов по элементам технической системы для оценки влияния на их техническое состояние в виде тепловой

карты приведена на рис. 3.12. Точками показаны значения допустимых и не допустимых технических состояний элементов СТС.

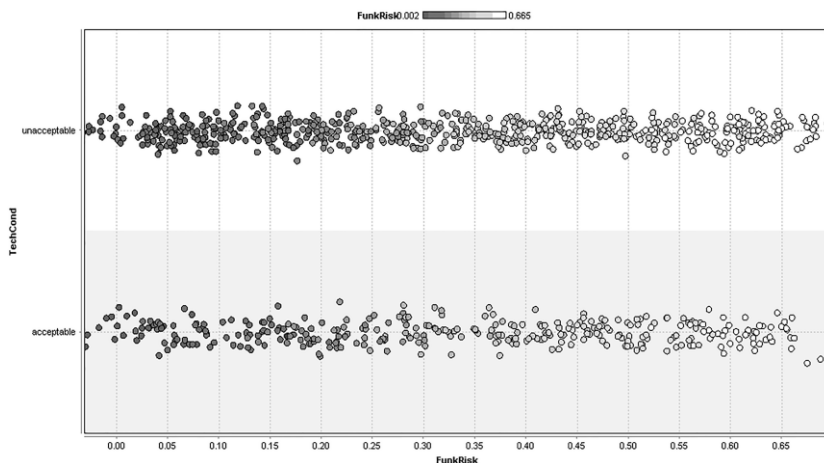


Рис.3.11. Точечная диаграмма рассеивания выявления корреляции между функциональным риском и техническим состоянием элементов

Анализ сформированных областей позволяет утверждать про более выраженную корреляцию между низкой работоспособностью и не допустимыми значениями технического состояния элементов СТС, и менее выраженную корреляцию в случае, когда работоспособность является средней и высокой. Это может быть использовано для формирования весовых коэффициентов превалирования одних параметров, характеризующих TS над другими в рамках дальнейшего дополнительного уточнения модели DCT с целью расширения представляемой метаинформации о данных для лучшей интерпретации и понимания аналитиком.

Из анализа моделей DCT и графических диаграмм следует, что более высокий уровень корреляции наблюдается между параметрами структурного риска отказов, степенью технического износа и регламентной наработкой на отказ. Значения данных параметров оказывают наиболее высокое влияние на техническое состояние и уровень работоспособности элементов СТС, что обуславливает критичность в их оперативном мониторинге и анализе для функционирования всего транспортного средства в целом. Полученная структура DCT в дальнейшем необходима для ускорения процесса анализа данных по сформированным массивам метаданных посредством снижения вычислительных затрат на обработку данных и предотвращения необходимости проведения операций по отправки и преобразованию дополнительных выборок.

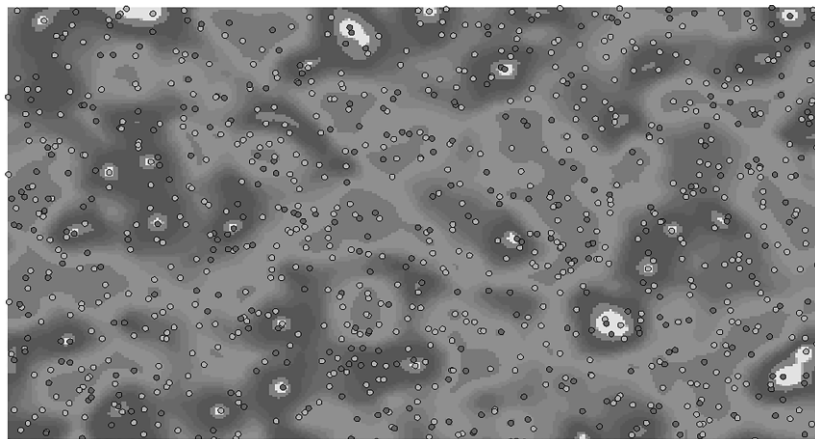


Рис.3.12. Фрагмент тепловой карты плотности распределения данных износа и выполненных ремонтов по элементам технической системы

Следует отметить достаточно высокий итоговый размер построенных моделей представления данных (около 30 мегабайт на 20000 записей), что может быть в дальнейшем уменьшено путем применения логических операций свертки по отдельным критериям, алгоритмов архивации и использования градиентного бустинга посредством составления композиций из других существующих алгоритмов машинного обучения. Анализ результатов исследования моделей DCT позволил установить, что наиболее подходящим является подход построения дерева на основе использования индекса GR. Полученная модель является на 8-10% более эффективной с точки зрения результатов по сравнению с другими построенными и исследованными моделями, что обуславливает ее приемлемость для решения задач структуризации Big Data и удобство для иерархической визуализации взаимосвязей между выделенными сегментами данных. Модель используется в качестве модуля СППР, осуществляющей оценку и прогнозирование технического состояния элементов СТС в различных условиях их эксплуатации.

При решении задач передачи и обработки Big Data является формализация задач на основе их программного решения. Решаемые задачи:

- разработка алгоритма перехвата и промежуточного анализа потока передаваемой информации ТС СТС к серверу хранения результатов;
- подсчет исходных метаданных в пакете;
- разработка алгоритма распределения пакетов, согласно считанным метаданным;

- разработка алгоритма архивирования данных, согласно нормам передачи, через спутниковые линии;
- построение модели передачи данных, основанной на минимизации размера передаваемого пакета;
- разработка алгоритма проведения анализа данных, необходимых для построения прогноза состояния ТС;
- прогнозирование состояния ТС, основанное на полученных данных из SCADA систем.

В качестве программной реализации задач передачи и обработки Big Data, необходимо создать модульное программное решение, позволяющее его использование, как части функционального модуля SCADA системы. Начальным этапом реализации модульного программного решения является формулирование программных требований, выполняемых средствами разработки программных продуктов. Для этого используются инструменты проектирования на основе CASE-средства.

Построение диаграммы вариантов использования, отражающей программное взаимодействие подсистем ТС в модульном программном решении приведено на рис. 3.13.

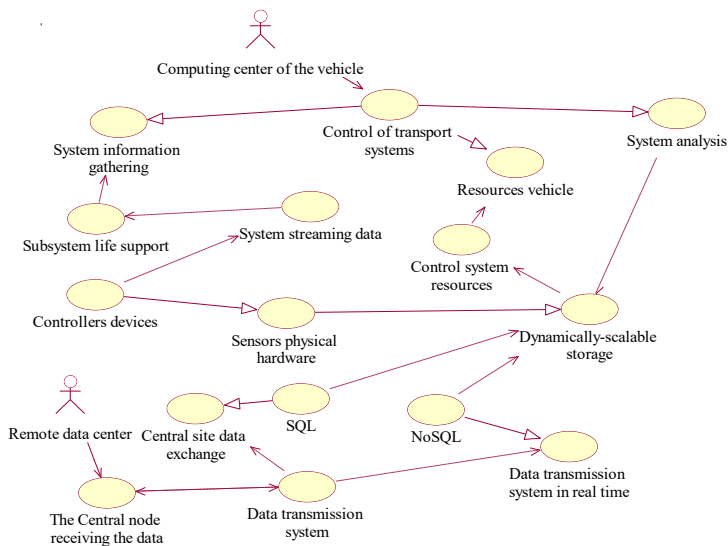


Рис. 3.13. Диаграмма взаимодействия подсистем ТС в модульном программном решении

Для определения последовательности использования модулей программного решения разработан обобщенный алгоритм обработки большого объема информации в реальном времени (рис. 3.14).

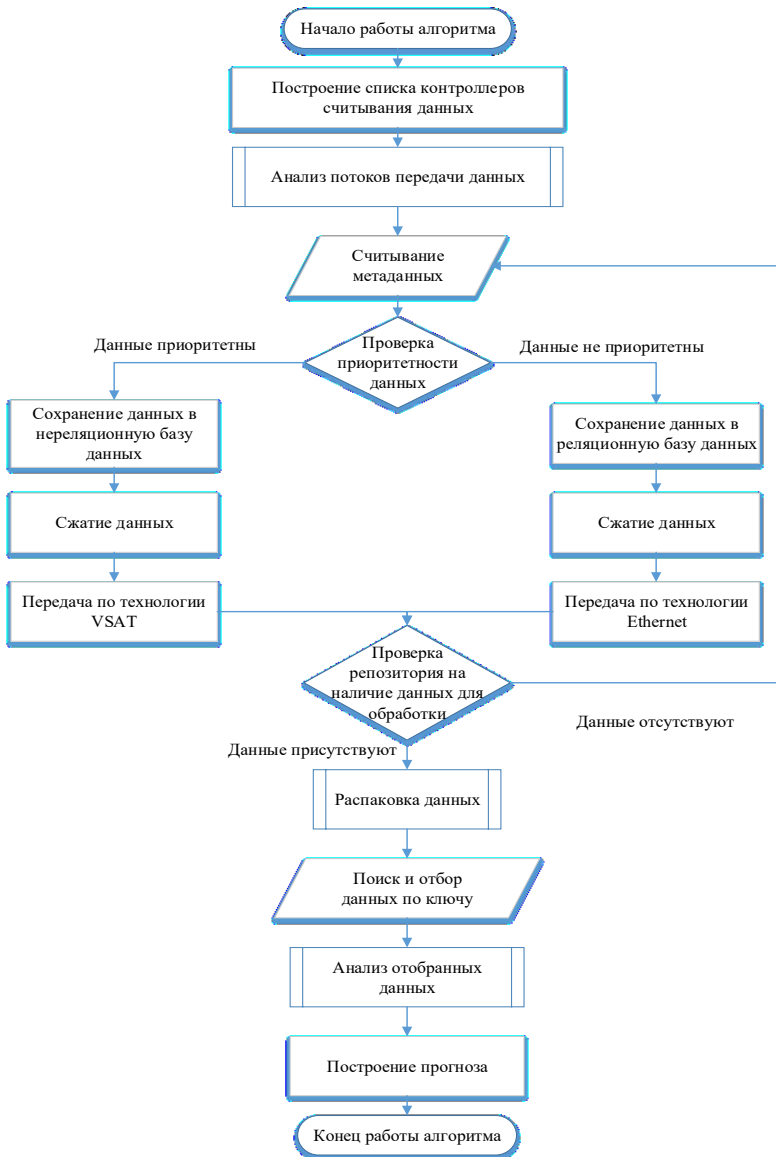


Рис. 3.14. Обобщенный алгоритм работы модульного программного обеспечения

Для данных, являющихся приоритетно важными необходимо предоставить отдельное хранилище, построенное на нереляционной архитектуре (NoSQL). Это позволит добиться максимальной скорости

записи информации, а также минимизировать сжатый архив информации для дальнейшей передачи по спутниковым каналам. В качестве NoSQL хранилища предлагается использовать «bigtable-подобную» базу данных, использующую семейства колонок в качестве хранилища информации. Использование «bigtable-подобной» БД полезно для взаимодействия с большим объемом информации, что делает модульную систему достаточно сложным средством обработки больших массивов данных. В качестве способа распределения метаданных предлагается применить прямую классификацию, позволяющую выполнять сортировку по типам датчиков сбора информации.

3.2. Методическое обеспечение информационной поддержки мониторинга и диагностики технического состояния сложных технических систем

Широко используемая для диагностирования СТС методологическая база основывается на подходах: поиска дефектов; проверки работоспособности; прогнозирования технического состояния. Оценка технического состояния СТС в нештатных режимах для решения задач поиска дефектов, определения работоспособности и прогнозирования требует наличия заданных значений показателей диагностирования. Каждая такая задача решается формальными методами (последовательными или комбинационными), предусматривающими формирование логических гипотез на основании анализа характера проявления отказов с последующей их проверкой. Поскольку СТС характеризуется множеством параметров, значения которых могут отклоняться по случайному закону, то наиболее эффективными методами их диагностирования являются методы, учитывающие неопределенности. Известны два основных подхода к учету неопределенностей: стохастический, использующий в своей основе вероятностное пространство случайных событий, и нечеткий, базирующийся на теории нечетких множеств. Преимущество стохастического подхода заключается в возможности его применения в условиях минимальной априорной информации о технологическом объекте, его структуре и поведении. Недостатком является применение больших объемов данных, которые невозможно получить в нештатных режимах. Достоинством диагностических методов нечеткой логики является возможность использования субъективных оценок экспертов, недостатком – ориентированность на решение задач для конкретных классов объектов [93]. В перечисленных методах предусмотрена возможность разработки оптимальных программ с автоматизацией процесса поиска, но недостаточно полно учитываются особенности эксплуатации СТС. Общими недостатками методов, учитывающих неопределенности, является не учет множества дефектов, появляющихся в процессе эксплуатации в

нештатных режимах работы СТС, а также невозможность построения ДМ, в полной мере отражающих реальные дефекты. Кроме того, использование методов требует относительно больших затрат времени и объема измерений, высокой квалификации обслуживающего персонала.

В этой связи создание информационной среды мониторинга и диагностирования объектов, позволяющей выполнить оценку технического состояния с заданными вероятностными показателями, а также разработка информационного обеспечения для систем диагностирования технических средств с учетом реализации новых ИТ является актуальной масштабной научно-технической задачей.

В настоящее время для оценки технического состояния СТС широко применяются методы, основанные на удаленном мониторинге. Использование таких методов позволяет обеспечить организационную и методическую основу для решения проблемы эксплуатации оборудования по техническому состоянию, а в перспективе – по уровню функциональной надежности [94-96].

Создание единой открытой платформы для систем удаленного мониторинга и диагностики машин и оборудования должно опираться на стандарты ISO в области «Condition monitoring and diagnostics of machines» [97- 100].

Методическое обеспечение организации удаленного мониторинга и диагностирования состояния СТС на примере СЭУ может основываться на использовании обобщенного алгоритма, приведенного на рис.3.15. В алгоритме предусмотрены решения задач, связанных с: формированием адекватной диагностической модели (ДМ), устанавливающей связи между ожидаемыми воздействиями и изменяющимися свойствами; определением на основании анализа ДМ совокупности диагностических признаков, их ранжированием и установлением предельно допустимых для работоспособного состояния объекта значений; определением условий работоспособности и признаков дефектов; построением алгоритмов и разработка программ определения работоспособности, поиска дефектов и прогнозирования изменения состояния СЭУ. Готовой частью методического обеспечения построения ДМ для СЭУ может служить «дерево отказов». При построении «дерева отказов» следует использовать принципы: блочно-модульной иерархии, адаптации и развития, информационного единства. Каждый модуль – это узел, выполняющий определенные функции. Например, для определения последствий отказа отдельных элементов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) предлагается разбивать главный двигатель (ГД) на составные части, используя опыт разбивки двигателя при анализе его надежности [101]. В результате такого расчленения ГД может быть представлен в виде иерархического графа «дерева отказов» (рис. 3.16). В «дереве отказов» все элементы распределены на семь уровней, восьмой (высший) уровень – это дизель.

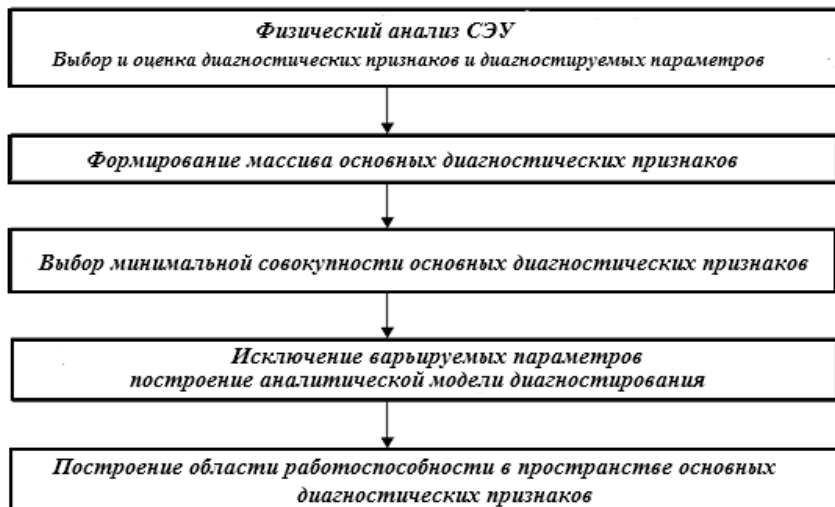


Рис. 3.15. Этапы построения диагностических моделей

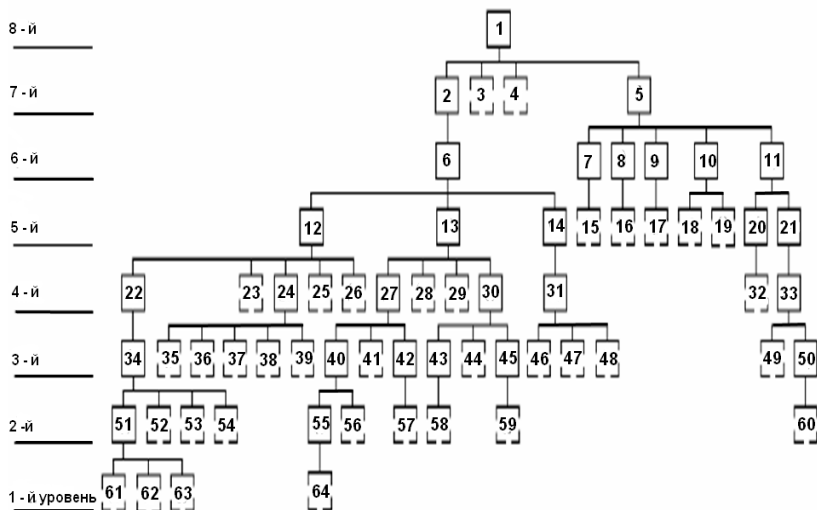


Рис. 3.16. Структура «дерева отказов»: 1– ГД; 2,...,64– узлы дизеля

На каждом уровне располагаются элементы, обладающие структурной важностью в сценарии нарушения условий работоспособности.

На низшем уровне находятся элементы, отказ которых не зависит от надежности других. Связи между элементами уровней «дерева» устанавливаются зависимостями исходя из логики соподчиненности, рассматриваемыми в вероятностной трактовке. Информационно связав элементы «дерева отказов» с диагностическими параметрами можно осуществлять прогноз ТС по текущим значениям и предыстории. Качество процессов удаленного мониторинга СЭУ во многом зависит от используемых технических средств диагностирования (ТСД). Разработка алгоритма процесса диагностирования предопределяет процесс разработки диагностического обеспечения с автоматизацией при реализации методики построения ДМ на ЭВМ. Одновременно задаются допуски на диагностические параметры, оказывающих влияние на погрешность измерений ТСД.

При разработке ТСД для решения задач удаленного мониторинга и управления ТС СЭУ необходимо использовать математические модели, а также информационное обеспечение математических моделей и процессов принятия решений в системе управления с программным обеспечением и базой данных, включающей результаты контроля и диагностики оборудования. Структура систем удаленного мониторинга корректируется с учетом реального состояния оборудования. В частности, может использоваться передача в систему стандартных оценок текущего и прогнозируемого состояния оборудования. На рис.3.17 представлен вариант структурной схемы ТСД, состоящей из блоков: коммутации и измерений (БКИ); памяти для хранения и использования информации (БП); обработки информации (БО); индикации (БИ); генерирования тестовых сигналов (БГТ); управления (БУ); регистрации (БР).

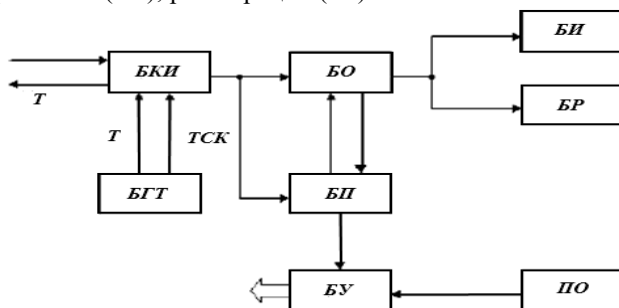


Рис. 3.17. Структурная схема технических средств диагностирования

Анализ процессов поддержания и восстановления технического состояния судового оборудования показал [101-103], что для управления их качеством необходимо использовать комбинированный подход,

сочетающий робастность производственной среды с предупреждающими и корректирующими действиями и обеспечивающий естественное разделение функций между ними. Структурная схема процесса управления техническим состоянием оборудования СЭУ, отражающая комбинированный подход, представлена на рис. 3.18.

На рис 3.18 приведены процессы: ИТС – изменения технического состояния; ООС – оперативной оценки состояния; ПТС – прогнозирования технического состояния; ПОР – принятия оперативного управленческого решения; ППР – принятия перспективного управленческого решения; ПТО – подготовки к техническому обслуживанию; ПРИ – подготовки к ремонту и испытаниям; ТО – технического обслуживания; РИ – ремонта и испытаний; ВКМ – влияния комплексов мероприятий на техническое состояние объектов).

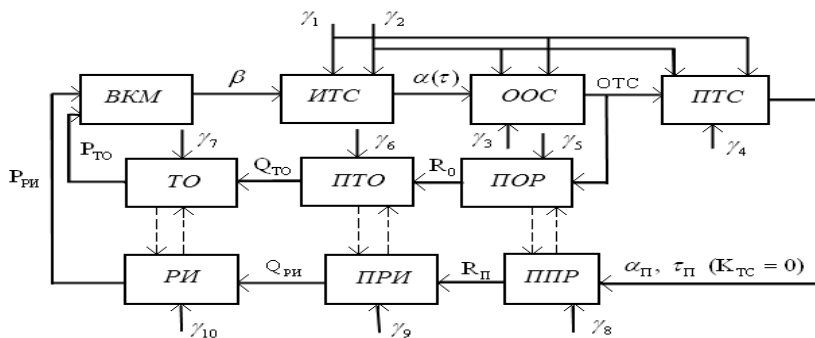


Рис. 3.18. Структура процесса управления техническим состоянием оборудования СЭУ

На рис. 3.19 $\alpha(\tau)$ – совокупность показателей технического состояния; OTC – оценки технического состояния; β – совокупность управляющих воздействий; $\alpha_{\text{п}}, \tau_{\text{п}} (K_{\text{тс}} = 0)$ – значения показателей состояния и наработки, при которых остаточный ресурс будет исчерпан (результат прогнозирования); $R_{\text{о}}$ – оперативное управленческое решение; $R_{\text{п}}$ – перспективное управленческое решение; сигналы: $Q_{\text{то}}$ – готовности к техническому обслуживанию; $Q_{\text{ри}}$ – готовности к ремонту и испытаниям; $R_{\text{то}}$ – окончания выполнения мероприятий по техническому обслуживанию; $R_{\text{ри}}$ – окончания выполнения ремонтных работ и проведения испытаний; γ_1 – условия эксплуатации объектов; γ_2 – режимы работы объекта; γ_3, γ_4 – нормативные базы оперативной оценки;

критерии: γ_5 – принятия оперативного управленческого решения; γ_6 – подготовки к техническому обслуживанию; γ_7 – качества технического обслуживания; γ_8 – принятия перспективного управленческого решения; γ_9 – подготовки к ремонту; γ_{10} – качества ремонта и испытаний.

Структура системы удаленного мониторинга может состоять из центра мониторинга, анализа и диагностики в специализированной организации и локальных систем мониторинга и диагностики, связанных с центром каналами связи. В центре диагностики устанавливаются удаленные терминалы (рис. 3.19). Информацию, получаемую в процессе удаленного мониторинга, можно разделить на информацию о технических параметрах исследуемых СЭУ и информацию об изменяемых воздействиях. Экспресс-анализ измерительной информации может выполняться в режимах on-line и off-line.

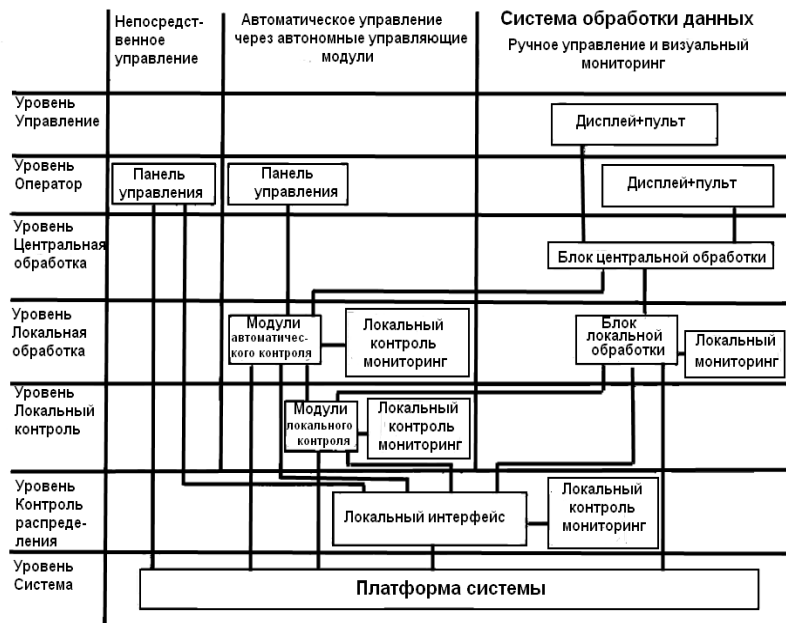


Рис. 3.19. Структура системы удаленного мониторинга

Программное обеспечение удаленного мониторинга состояния и диагностики СЭУ должно предусматривать:

- автоматическую диагностику и прогноз состояния оборудования и его узлов по результатам измерений вторичных процессов по

требованиям, предъявляемым программой в виде заданий на измерения;

- экспертную оценку состояния оборудования по совокупности алгоритмов, предлагаемых разработчиками программы, с учетом ее редактирования и дополнительных алгоритмов, предлагаемых пользователями программы для экспертной оценки состояния;

- возможность работы с системой удаленным экспертам по стандартным линиям связи и Интернету;

- предоставление текущей информации о состоянии оборудования и результатах его прогноза в информационные системы удаленного мониторинга состояния и диагностики в стандартизированной форме.

Необходимое алгоритмическое и программное обеспечение следует разрабатывать применительно к процедурам: локализации и поиска дефектов; контроля и оценки работоспособности оборудования; прогноза возможных дефектов и регулирования запаса работоспособности. В настоящее время создано программное обеспечение АСУ техническим обслуживанием и ремонтом судов. Наиболее распространенными являются программные комплексы AMOS for Windows и TRIM. Для наполнения указанных программных «оболочек» необходима формализация процессов, протекающих в звеньях системы управления техническим состоянием СЭУ.

Источниками информации для открытой корпоративной системы удаленного мониторинга СЭУ могут быть результаты:

- входного контроля нового оборудования и оборудования после ремонта в виде данных первичных измерений и/или результатов анализа параметров рабочих и/или вторичных процессов;

- периодически проводимых неразрушающих испытаний оборудования, включая результаты выборочного неразрушающего контроля;

- измерений и диагностики во время наладочных работ перед запуском оборудования в работу.

А также данные:

- по наработке оборудования, замечания обслуживающего персонала по результатам визуальных осмотров, обслуживаний и ремонтов;

- средств измерений систем управления оборудованием и решения, принимаемые системой аварийной сигнализации и защиты;

- периодических измерений средствами контроля основных параметров оборудования (переносных и стационарных средств мониторинга);

- периодических измерений и обследований, выполняемых в рамках экспертной диагностики оборудования.

Реализовать структуру системы удаленного мониторинга можно, например в открытой корпоративной системе дистанционного автоматического управления СЭУ с подсистемой контроля эксплуатационных параметров - ABB-Remote Control System - ABB Marine,

функционирующей совместно с системой контроля работы гребного винта, турбокомпрессора, генератора тока и дизельного двигателя - NORIS [104-106].

При оценках надежности СТС наиболее важным является учет влияния взаимосвязанных, взаимодействующих подсистем и их элементов на риск отказов систем в целом. Такой подход позволяет минимизировать время поиска возникшей неисправности в аварийной ситуации и выявить взаимозависимость всех компонентов СТС от конкретного ее критичного элемента.

Дистанционное диагностирование технического состояния СТС включают этапы [107]:

1. Выявление взаимосвязанности и взаимодействия компонентов в иерархии и топологии СТС с учетом используемого ресурса ЭВИ (энергия, вещество, информация);
2. Построение и исследование КИМ СТС;
3. Оценки ущерба и риска отказов СТС.

Задача дистанционного мониторинга и диагностики состояния СТС предусматривает распознавание его текущего состояния в условиях ограниченной информации и может быть представлена в виде составляющих рис.3.20.

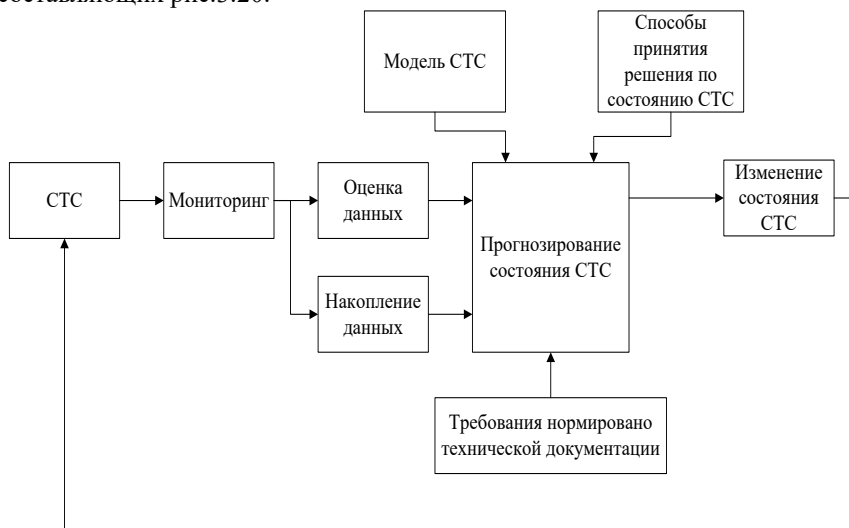


Рис.3.20. Структура задачи мониторинга СТС

Для исследования модели системы дистанционного мониторинга и диагностики (ДМД) СТС среди множества существующих методов моделирования надежности применима относительно развитая технология

когнитивного имитационного моделирования надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования СТС [108-112], позволяющая реализовать формализованное с разной степенью описание оборудования, учитывающее эволюцию технической системы во времени.

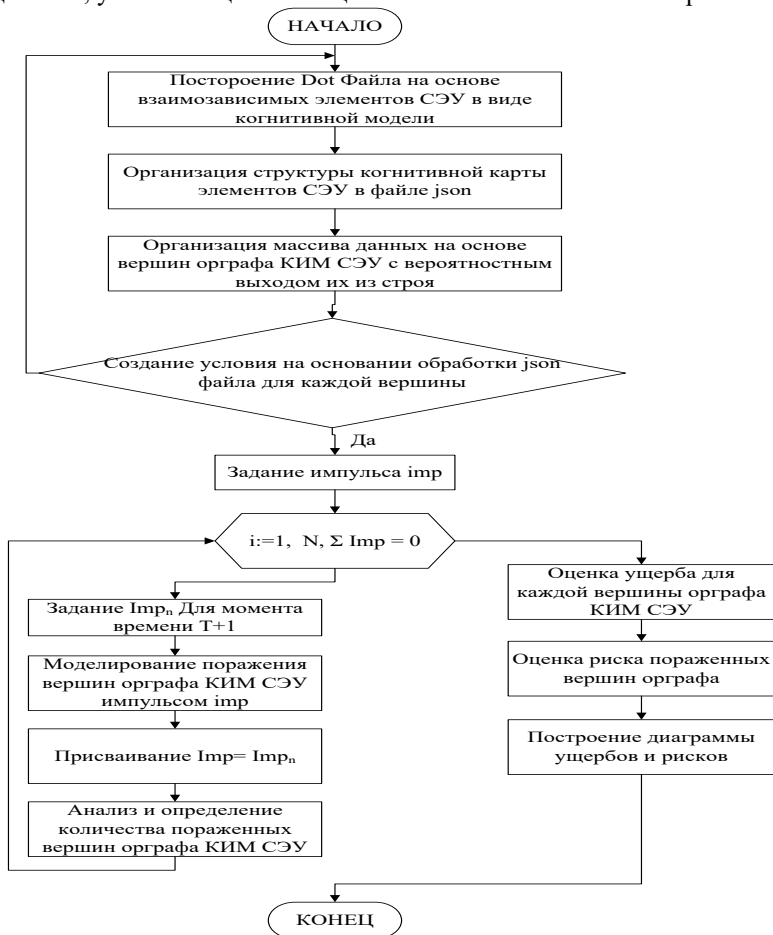


Рис. 3.21. Алгоритм реализации метода оценки ущерба и риска вершин

Технические риски отказов при КИМ определяются в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис.3.21. Орграф функционирования СЭУ и системы ДМД (рис.3.22) описывает их реальный состав. Связи вершин орграфа функционирования СЭУ с позиций обеспечения системы ДМД представлены матрицей функционирования на рис. 3.23.

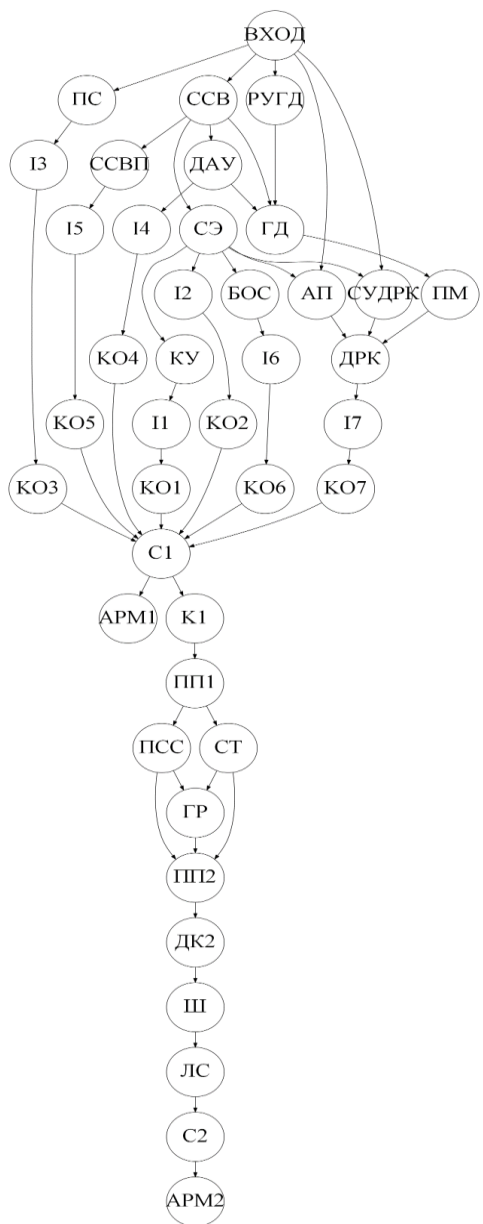


Рис. 3.22. Орграф функционирования СЭУ и системы ДМД

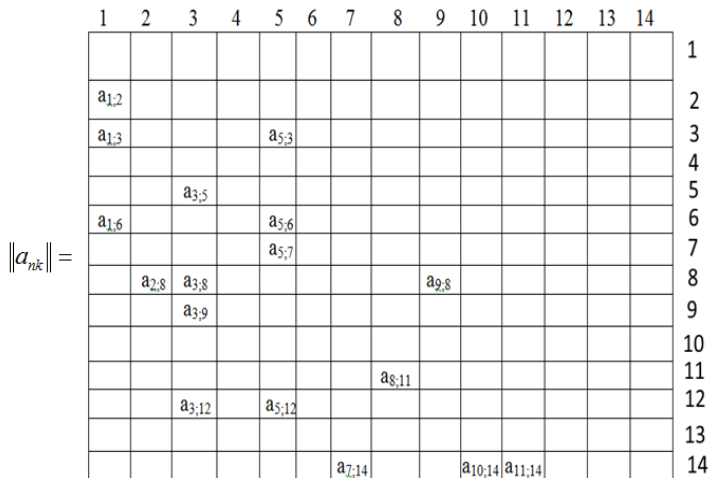


Рис. 3.23. Матрица функционирования СЭУ

На рис. 3.24 приведены зависимости ущерба (Y) наносимого СЭУ, вероятности (P) того, что ущерб нанесет весомые повреждения СЭУ при ДМД и риска (R) возникновения ущерба. Обобщенная модель ДМД СЭУ разработана на уровне подсистем СЭУ. При необходимости детального исследования модели СЭУ и системы ДМД модель может дополняться отдельными моделями (орграфами) подсистем СЭУ. В этом случае сохраняется разработанный принцип моделирования.

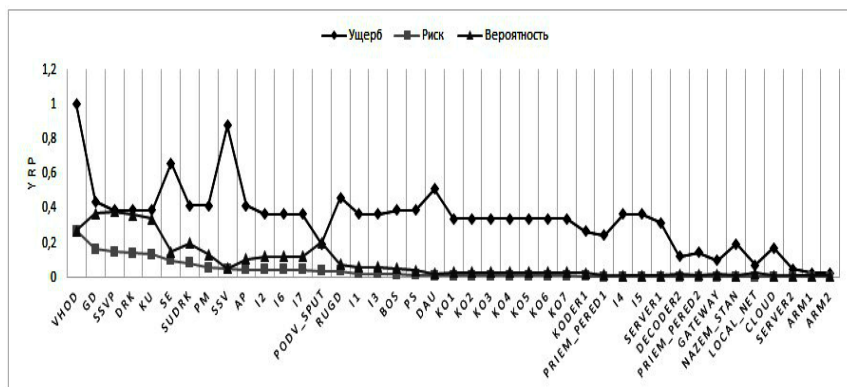


Рис. 3.24. Зависимости ущерба, вероятности и риска для функциональной схемы СЭУ

На рис. 3.25 представлены результаты диагностического контроля эксплуатационных параметров в системе мониторинга NORIS с дизельным двигателем В&W типа MANN 8L56: 1 - частота вращения вала главного двигателя (ГД); 2 - давление подачи воздуха, 3 – управление давлением воздуха, 4 - настройка угла винта. Полученные данные диагностического контроля эксплуатационных параметров свидетельствуют о нарушениях в работе ГД, проявляющихся в коротких устойчивых изменениях скорости вращения основного вала двигателя, отсутствии ротационной стабильности скорости вала двигателя. Выполненный анализ результатов обработки отказов ГД позволил сделать следующие основные выводы. Вероятности отказов позволяют выявить основные причины отказов. К таким причинам относятся усталостные изменения материала деталей, износ сопряженных узлов, повышенная вибрация, термические напряжения из-за значительных градиентов температур, из-за конструктивных недостатков.

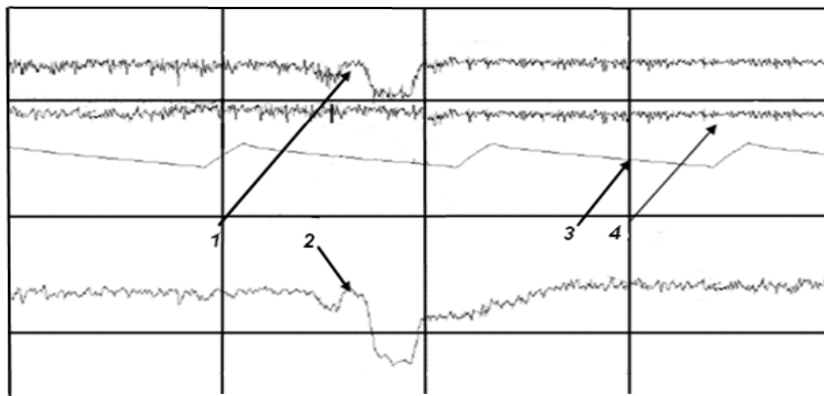


Рис. 3.25. Результаты контроля эксплуатационных параметров при мониторинге СЭУ

Разработанные методологические основы обеспечивают дистанционный мониторинг и диагностику состояния судовых СТС на основе оценки технических рисков систем в аварийных ситуациях с учетом взаимосвязанности и взаимодействия их компонентов, количественного и качественного информационно – энергетического взаимодействия. Технический риск систем, определяемый по предлагаемой методике для аварийной ситуации позволяет прогнозировать тенденцию изменения состояния СТС во времени. Предлагаемая методика оценки рисков судовых СТС позволяет: определить значимость действующих в системе взаимосвязей и взаимодействий компонентов систем; моделировать распространения различных уровней тяжести неблагоприятных внешних воздействий и поражающих факторов по структуре системы.

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Концепция анализа и оценки риска отказов сложной технической системы

Концепция анализа и оценки риска отказов СТС, их агрегатов и МС в условиях малопредсказуемых внешних воздействий, внутренних поражающих факторов и экстремальных аварийных ситуациях основывается на объединении разнородных СТС в единую модель. Такая модель призвана обеспечить оценку риска отказов с точки зрения значимости и критичности для функционирования всей системы в целом. При подобном подходе возможно масштабирование, выявление структурных и функциональных угроз, уязвимых мест в СТС. Оценка риска отказов СТС включает структурные и функциональные ее аспекты. Структурные аспекты оценки риска отказов СТС учитывают угрозы и риски, возникающие при взаимодействии агрегатов, МС в иерархии и топологии системы. Функциональные - учитывают угрозы и риск с точки зрения функционального состояния агрегатов, МС системы.

Комплексный показатель надежности элементов СТС - технический риск - комбинация вероятностей возникновения опасностей определенного класса (P_{wi}) и ущербов от аварий, нежелательных событий из-за технического несовершенства, нарушения правил эксплуатации технических систем (Y_{wi})

$$R \equiv [(P_1, Y_1), (P_2, Y_2), \dots, (P_{wi}, Y_{wi})] \quad (4.1)$$

Оценка вероятности выхода из строя вершины (ребра) КИМ СТС определяется на основе Байесовского метода анализа СТС [9]

$$P(C|D) = \frac{P(D|C) \cdot P(C)}{P(C)}, \quad (4.2)$$

где $P(C)$ - априорная вероятность гипотезы С выхода из строя вершины (ребра);

$P(C|D)$ - вероятность гипотезы С при наступлении события D (апостериорная вероятность);

$P(D|C)$ - вероятность наступления события D при истинности гипотезы С;

$P(D)$ - полная вероятность наступления события D.

Для оценки функциональной работоспособности и соответствующего ущерба СТС используется нормирующее воздействие (НВ) на вершины и ребра орграфа КИМ СТС. НВ определяется в

соответствии с критерием Бирнбаума [113]. НВ в терминах оценки функциональной работоспособности системы $F(t)$ и отдельного ребра (вершины) $f_{a(v)}(t)$ определяется следующим образом

$$\partial b_{a(v)}(i|t) = \frac{\partial F(t)}{\partial f_{a(v)i}(t)} \quad (4.3)$$

Оценка функциональной работоспособности СТС с помощью НВ осуществляется в три этапа. На первом этапе производится оценка работоспособности СТС в исправном состоянии. На втором этапе моделируется последовательный выход из строя отдельных элементов, МС КИМ СТС и определяется оценка частично неисправной системы для каждого структурного компонента (СК). На третьем этапе производятся количественные оценки функциональных ущербов элемента и МС. Количественная оценка функционального ущерба элемента СТС при F (номинальная работоспособность), F_i (работоспособность системы при неисправном i -м элементе (v_i)) определяется

$$Y_{fv_i} = F - F_i \quad (4.4)$$

Количественная оценка функционального ущерба МС при F_j – работоспособность системы при неисправной j -й МС (a_j)

$$Y_{fa_j} = F - F_j \quad (4.5)$$

Для КИМ СТС оценка риска отказа пораженной вершины (ребра) модели определяется произведением значений вероятностей выхода из строя вершины (ребра) КИМ СТС и соответствующей оценки функционального ущерба пораженных вершин (ребер) орграфа. Орграф СТС $G(V, A)$ с n вершинами (узлами) и m дугами (ориентированными ребрами). Множество вершин графа $V - (V = \{v_i\}, i = 1, n)$. Множество (упорядоченных) пар вершин v, w , называемых дугами (ориентированными ребрами) графа $A - (A = \{a_j\} = \{(v_i, w_j)\}, j = 1, m)$, вершину v называют началом, а w - концом дуги. Величина надежности агрегата СТС, соответствующего вершине v_i определяется

$$v_i(t) = P_{v_i}(t \leq T) \quad (4.6)$$

Если можно выделить конструктивные или функциональные агрегаты СТС, вершины графа соответствуют структурным агрегатам системы, ребра графа – МС. Если выделить агрегаты затруднительно – вершины графа соответствуют параметрам системы, а ребра графа – причинно-следственным связям между параметрами. В каждый узел может

входить или из узла может выходить несколько ребер. В этом случае говорят о множестве ребер, инцидентных данному узлу графа. Каждому ребру инцидентны два узла, расположенные на его концах.

Качественное отражение состояния агрегатов и МС СТС выражается функционалом зависимости между состоянием агрегатов или МС, а также определенным типом нагрузки внешних или внутренних воздействий.

Оценки в аварийных сценариях структурного и функционального риска отказов СТС с учетом взаимосвязанности и взаимодействия их элементов включают этапы:

1. Выявление взаимосвязанности и взаимодействия СК в иерархии и топологии СТС с учетом используемого ресурса ЭВИ (энергия, вещество, информация);

2. Построение и исследование КИМ СТС;

3. Оценка структурного и функционального ущербов СТС;

4. Оценка структурного и функционального рисков СТС.

Функционал состояний элементов СТС

$$v = [F_{v.n.}; F_{v.l.}; a_{z_i}; a_{z_j}; H_m^v(t); K_{V.d.b.}] \quad (4.7)$$

$$i = 1 \dots k, j = 1 \dots m, k + m = M,$$

где $F_{v.n.}$ – номинальная работоспособность элемента;

$F_{v.l.}$ – работоспособность элемента при ее частичной утрате;

a_{z_i}, a_{z_j} – входящие и исходящие воздействия для элемента МС;

i, j – порядковый номер входящего и исходящего воздействия для элемента МС;

k, m – общее количество входящих и исходящих воздействий для элемента МС;

$H_m^v(t)$ – передаточный коэффициент изменения амплитуды ПМИ

($H_m^v(t) = \frac{m_{imp_k}^v(t+1)}{m_{imp_k}^v(t)}, m_{imp_k}^v(t), m_{imp_k}^v(t+1)$ – значение амплитуды ПМИ в моменты времени t и $t+1$);

$K_{V.d.b.}$ – коэффициент степени поражения элемента.

Функционал состояний МС СТС

$$a_z = [F_{a.n.}; F_{a.l.}; v; w; H_m^a(t); K_{A.d.b.}] \quad (4.8)$$

где $F_{a.n.}$ – номинальная работоспособность МС;

$F_{a.l.}$ – работоспособность МС при ее частичной утрате;

z – тип ресурса ЭВИ;

$H_m^a(t)$ – передаточный коэффициент изменения амплитуды ПМИ

$$H_m^a(t) = \frac{m_{imp_k}^a(t+1)}{m_{imp_k}^a(t)}, m_{imp_k}^a(t), m_{imp_k}^a(t+1) - \text{значение амплитуды ПМИ}$$

в моменты времени t и $t+1$);

$K_{A.d.b.}$ – коэффициент степени поражения МС.

Для оценки функционального ущерба СТС используется нормирующее воздействие на вершины и ребра орграфа КИМ СТС.

При оценке структурного ущерба СТС принято, что исходному состоянию элемента (МС) соответствует 0, если ПМИ не проходит элемент (МС) и - 1, если ПМИ проходит элемент (МС). Обнуление значений состояний элементов (МС) перед каждой последующей итерацией движения

ПМИ по МС осуществляется при $1 - imp_j(t)$.

Воздействие ПМИ на вершину (ребро) орграфа КИМ СТС в дискретный момент времени t определяется

$$1 - imp_j(t) = \frac{w_{a(v_j)}(t)}{w_{a(v_j)}(t-1) \cdot K_{V.d.b.} \cdot K_{A.d.b.}},$$

где $imp_j(t)$ – импульсный вектор для ребра с номером J ;

$w_{a(v_j)}(t), w_{a(v_j)}(t-1)$ – значение веса ребра (вершины) в моменты времени $t, t-1$.

При прохождении через МС от вершины v_i к вершине w_j импульсы imp_j и imp_i связаны соотношением

$$imp_j(t+1) = imp_i(t) \cdot H_m^a(t). \quad (4.8)$$

При прохождении через вершину от i -й МС к J -й МС импульсы imp_j и imp_i связаны между собой следующим образом

$$imp_j(t+1) = imp_i(t) \cdot H_m^v(t). \quad (4.9)$$

Завершению распространения ПМИ (завершению моделирования) по орграфу соответствует равенство

$$S = \sum_{j=1}^M imp_j(t) = 0 \quad (4.10)$$

ПМИ генерируется в условно заданной пораженной вершине (ребре), движется к последующим вершинам (ребрам), последовательно выводя из строя взаимосвязанные СК КИМ. Степень поражения от ПМИ элемента (МС) СТС определяется коэффициентом степени поражения элемента (МС)

$$K_{V.d.b.} = \frac{w_v(t+1)}{w_v(t) \cdot (1 - m_{imp_k}^v(t))}, \quad (4.11)$$

$$K_{A.d.b.} = \frac{w_a(t+1)}{w_a(t) \cdot (1 - m_{imp_k}^a(t))}, \quad (4.12)$$

где $w_v(t)$, $(w_a(t))$, $w_v(t+1)$, $(w_a(t+1))$ - значение веса элемента (МС) в момент времени t до и $t+1$ после воздействия ПМИ.

Принята градация величин коэффициентов степени поражения по уровню поражающего влияния каждого элемента на структуру СТС: более 0.7 – максимальное аварийное; от 0.7 до 0.3 - предаварийное; менее 0.3 – неаварийное.

Значения структурных ущербов вследствие пораженной i -й вершины, j -го ребра орграфа для общего числа пораженных вершин (b), ребер (c) КИМ

$$Y_{s.(V_i)} = \frac{b}{N} \quad (4.13)$$

$$Y_{s.(A_j)} = \frac{c}{M}$$

Количественная оценка структурного ущерба от пораженной вершины (ребра) КИМ СТС определяется по ущербу при нарушении связности топологических структур СТС как отношение пораженных агрегатов (МС) к общему числу агрегатов (МС) СТС при единичном поражении агрегата (МС) и беспрепятственном распространении ПМИ по СТС. Количественная оценка функционального ущерба от пораженной вершины (ребра) КИМ СТС определяется по ущербу при нарушении функционирования агрегатов (МС) отношением работоспособности СТС при ее частичной утрате агрегатом (МС) к номинальной работоспособности СТС. Оценка риска отказа пораженной вершины (ребра) КИМ СТС определяется произведением значений вероятностей выхода из строя вершины (ребра) КИМ СТС и соответствующих оценок структурного и функционального ущербов пораженных вершин (ребер) орграфа.

Для оценки функционального ущерба СТС при движении НВ по

орграфу КИМ СТС формируется массив значений, каждой вершине v_i и каждому ребру a_j которым присвоено численное значение модуля НВ. Изначально все значения модуля НВ принимаются равными 1. При движении НВ по орграфу они изменяются пропорционально весовым значениям СК. На основании критерия Бирнбаума значение модуля НВ для выбранной вершины (ребра) орграфа КИМ СТС выражается как произведение значения модуля НВ для предшествующей ему вершины (ребра) на весовое значение выбранной вершины (ребра). Для вершины орграфа КИМ СТС, в которую входят сразу несколько ребер значения модулей НВ

$$m_i(t) = \sum_{j=1}^N m_j(t), \quad (4.14)$$

$$m_i(t) = s_i \cdot m_i(t-1) + s_j \cdot m_i(t-1), \quad (4.15)$$

где s_i, s_j - вес i -й вершины и j -го ребра;

$m_i(t), m_i(t-1)$ – модуль НВ, проходящего через вершину или ребро в моменты времени t и $t-1$.

Количественные оценки функциональных ущербов определяются для: неисправного элемента (v_i) как разница номинальной работоспособности СТС и работоспособности системы при неисправном элементе (v_i); неисправной МС (a_j) как разница номинальной работоспособности СТС и работоспособности системы при неисправной МС (a_j). Структурный риск отказа i -го элемента и j -й МС СТС определяются

$$R_{sv_i} = Y_{sv_i} \cdot p_{v_i}(t), \quad (4.16)$$

$$R_{sa_j} = Y_{sa_j} \cdot p_{a_j}(t), \quad (4.17)$$

где $p_{v_i}(t), p_{a_j}(t)$ - вероятности выхода из строя пораженного i -го элемента и j -й МС СТС.

Структурный риск отказов всех элементов и МС СТС

$$R_S^a = \sum_i^N R_{sv_i} \cdot p_{v_i}(t), \quad (4.18)$$

$$R_S^s = \sum_j^M R_{sa_j} \cdot p_{a_j}(t), \quad (4.19)$$

Оценка риска отказов при структурном ущербе от пораженной i -й

вершины КИМ СТС

$$R_{svi} = k_{svi} \cdot p_{vi}(t), \quad (4.20)$$

где k_{svi} - оценка структурного ущерба от пораженной i -й вершины КИМ СТС;

$p_{vi}(t)$ - вероятность выхода из строя пораженной i -й вершины КИМ СТС.

Оценка риска отказов при структурном ущербе от пораженного j -ого ребра КИМ

$$R_{saj} = k_{saj} \cdot p_{aj}(t),$$

где k_{saj} - оценка структурного ущерба от пораженного j – ого ребра КИМ СТС;

$p_{aj}(t)$ - вероятность выхода из строя пораженного j -ого ребра КИМ СТС.

Функциональный риск отказа i -го элемента и j -й МС СТС

$$R_{fvi} = Y_{fvi} \cdot p_{vi}(t), \quad (4.21)$$

$$R_{faj} = Y_{faj} \cdot p_{aj}(t)$$

Функциональный риск отказов всех элементов и МС

$$R_F^a = \sum_i^N R_{fvi} \cdot p_{vi}(t), \quad (4.22)$$

$$R_F^s = \sum_j^M R_{faj} \cdot p_{aj}(t)$$

Оценка риска отказа при функциональном ущербе от пораженной i -й вершины КИМ СТС

$$R_{fvi} = k_{fvi} \cdot p_{vi}(t), \quad (4.23)$$

где k_{fvi} - оценка функционального ущерба от пораженной i -й вершины КИМ СТС

Коэффициент риска отказа при функциональном ущербе от пораженного j – ого ребра КИМ СТС

$$R_{faj} = k_{faj} \cdot p_{aj}(t), \quad (4.24)$$

где k_{faj} - оценка функционального ущерба от пораженного j – ого ребра КИМ СТС

Вероятность выхода из строя элементов и МС определяется

$$P_{v_i} = \frac{n_{v_i}}{\tau}, \quad P_{a_j} = \frac{n_{a_j}}{\tau}, \quad (4.25)$$

где P_{v_i} - вероятность выхода из строя i -го элемента СТС;

P_{a_j} - вероятность выхода из строя j -й МС СТС;

n_{v_i} - количество выходов из строя i -го элемента СТС;

n_{a_j} - количество выходов из строя j -й МС СТС;

$\tau = 10^6$ час. - период проведения статистических испытаний

В качестве основы для определения значений вероятностей выходов из строя элементов и МС СТС можно использовать данные из [92]. Зависимости общего структурного и функционального риска отказов от вероятностей полного и частичного выхода из строя по всем элементам и МС систем обслуживания СТС определяются суммарными значениями риска отказов и суммарными значениями вероятностей выхода из строя элементов и МС СТС

$$P_V = \frac{\sum_i^N P_{v_i}}{N}, \quad P_A = \frac{\sum_j^M P_{a_j}}{M} \quad (4.26)$$

где P_V - сумма значений вероятности выхода из строя элементов СТС;

P_A - суммарное значение вероятности выхода из строя МС СТС;

N – количество элементов СТС;

M – количество МС СТС

Для ранжирования полученной оценки структурного и функционального риска отказов СТС в аварийных сценариях используется обобщенная функция желательности Харрингтона для оценки уровня риска отказов:

1. 0 - 0,2 - минимальный, последствия аварии минимальны, не оказывающие на эксплуатацию СТС существенного воздействия;
2. 0,2 - 0,37 - допустимый, последствия аварии незначительные, позволяющие эксплуатировать СТС без ремонта;
3. 0,37 - 0,63 - максимальный, последствия аварии позволяющие эксплуатировать СТС после выполнении ремонтных работ;
4. 0,63 - 1 - критический, последствия не позволяющие эксплуатировать СТС.

Исследование результатов воздействий ПМИ и НВ на КИМ СТС произведено в разработанном программном комплексе на основе использования кроссплатформенного языка Python. Для представления

исходных данных элементов, МС при моделировании аварийных сценариев в КИМ СТС использовался формат JSON. Визуализация графов осуществлена с помощью программного продукта Graphviz. Для анализа результатов исследований использовались MS Office и Open Office. Для апробации метода оценки структурного и функционального риска отказов СТС в аварийных сценариях в качестве примера исследована система, состоящая из 12 элементов и 26 МС (рис. 4.1), 17 из которых - носители энергии (обозначены сплошными линиями), 9 – носители вещества (обозначены пунктирными линиями). Процесс моделирования для оценок функциональных рисков отказов элементов и МС СТС осуществлялось в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис 4.2.

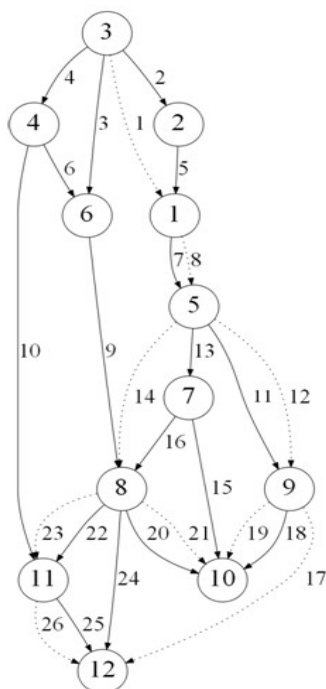


Рис. 4.1. Орграф КИМ СТС

Результаты расчетов значений оценки структурного и функционального риска для вершин и ребер КИМ СТС приведены на рис. 4.3 – 4.6. В ходе исследований подтверждено – если место приложения ПМИ и НВ не принадлежат элементам СТС сильной связности, то прохождение ПМИ и НВ в меньшей степени связано с риском отказов СТС. В исследуемой СТС компонентами сильной связности являются элементы 3, 8 и МС 2, 5, от работоспособности которых зависит риск смежных элементов

и МС. При поражении МС 2 возникает риск отказов при эксплуатации элементов 1, 5, 7- 12, а при поражении элемента 3 возникает риск отказов для всех СК СТС.

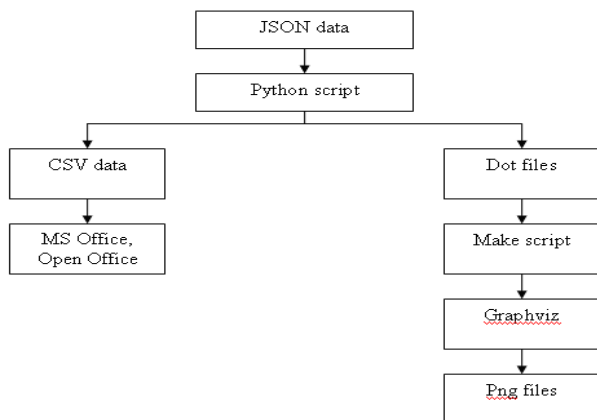


Рис. 4.2. Алгоритм процесса моделирования условий эксплуатации СТС

Установлено, что на риск отказов СТС в наибольшей степени влияют элементы 2, 3, 5, 8 и МС 2, 6, 9, 12, 16. В меньшей степени - влияет риск отказов при эксплуатации элементов 1, 7, 9, 11 и МС 4, 5, 7, 18, 24. Наиболее критические элементы 3, 5 и 8, МС 9 и 16.

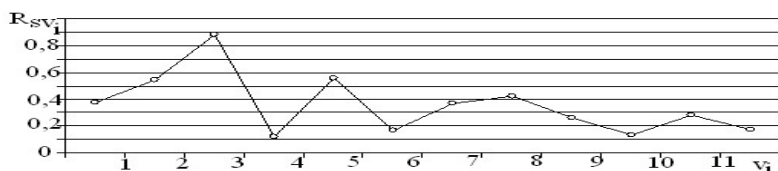


Рис. 4.3. Величины расчетного значения структурного риска R_{sv_i} по элементам v_i СТС

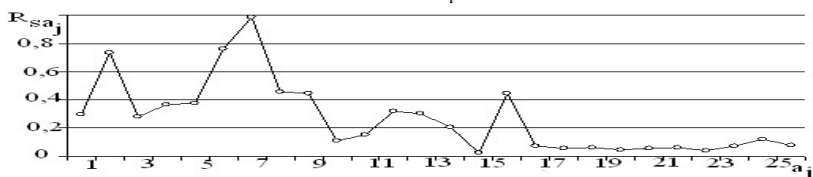


Рис. 4.4. Величина расчетного значения риска R_{sa_j} по межэлементным связям a_j СТС

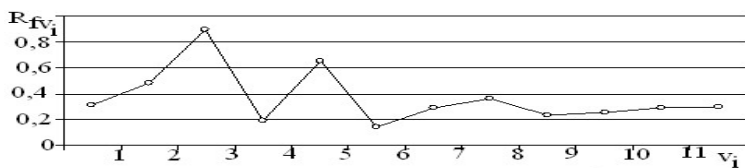


Рис. 4.5. Величина расчетного значения функционального риска R_{fv_i} по элементам v_i СТС

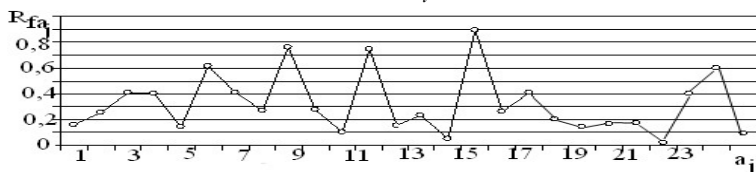


Рис. 4.6. Величина расчетного значения функционального риска R_{fa_j} по межэлементным связям a_j СТС

Разработанный метод, апробированный в результате когнитивно имитационного моделирования позволяет определять взаимосвязанные и взаимодействующие элементы, межэлементные связи, а также степень их влияния на оценку структурного и функционального риска отказов СТС, что в свою очередь позволяет автоматизировать процессы принятия решений в аварийных сценариях при эксплуатации СТС. Выявленные взаимосвязанности и взаимодействия структурных компонентов в иерархии и топологии СТС позволяют установить величину поражающего влияния каждого компонента системы в аварийных сценариях на структуру СТС. Процедуры метода легко формализуются и трансформируются в вычислительный алгоритм и модель для оценок структурного и функционального рисков, что важно для СТС с большим количеством элементов МС

4.2. Методика оценки живучести сложных технических систем

Совокупность функциональных комплексов технических систем (ФКТС), подсистем и технического оборудования, влияющих на безопасную эксплуатацию, например, судов во многом определяющих их живучесть.

Непредсказуемость изменения большинства факторов, влияющих на свойства ФКТС и их топологию, придает особое значение оценке живучести с учетом состояния элементов систем и действующих между ними взаимосвязей. В настоящий момент в теории живучести ФКТС отсутствует устоявшийся методологический подход, позволяющий решать задачу комплексной оценки живучести таких систем с точки зрения их структурной

уязвимости и функциональности, с учетом значимости существующих в системах межсистемных и межэлементных взаимосвязей. Таким образом, методическое обеспечение мероприятий по оценке и обеспечению живучести судовых СТС в целях повышения уровня безопасной эксплуатации судов и снижения их аварийности является актуальной научно-технической задачей.

Живучесть СТС является интегральным понятием [114–116], предполагающим рассмотрение структуры показателя успешности функционирования системы по назначению и состоящего из множества параметров со следующими характеристиками: степень готовности системы к решению поставленных задач; внутренняя топология и взаимодействие элементов системы; контекст использования системы и входящих в нее элементов как совокупно, так и по отдельности.

В оценке живучести СТС важную часть составляют не только и не столько локальные показатели, сколько интегральные показатели и показатели, отражающие функционирование отдельного элемента в контексте общей системы. Интегральная оценка живучести ФКТС требует модели объединяющей комплексы отдельных СТС в единую модель, отражающую их структурно-функциональную взаимосвязь и взаимодействие. Это позволяет получить, как интегральную оценку общей уязвимости системы в целом от поражающих факторов и неблагоприятных воздействий, приводящих к выходу из строя и/или потере работоспособности ее отдельных элементов, так и оценку отдельных элементов с точки зрения их важности и критичности для функционирования всей системы в целом [117].

Для составления когнитивной карты локальные показатели живучести, работоспособности и надежности, полученные по регламенту работы с ФКТС, формализуются и приводятся к единой системной немасштабной и безразмерной оценке. Критерии, характеризующие свойство живучести как системы в целом, так и ее отдельных компонентов, применительно к формулировкам и определениям, используемым в методике, принимаем следующими: больше 0.67 - удовлетворительная живучесть; в интервале от 0.67 до 0.23 – система ограничено эффективна; ниже 0.23 — система неработоспособна. Аналогично можно определить критерии для отдельных компонентов системы на уровне подсистем, отдельных узлов и элементов СТС.

Распространение ПМИ моделируется исходя из следующих соотношений. Пусть задан направленный граф $G = \{V, E\}$

$$V = v_i, v_i \in V, i = 1, 2, \dots, k; \quad (4.27)$$

$$E = e_i, e_i \in V, i = 1, 2, \dots, k,$$

где V – множество вершин системы, E – множество дуг системы, при этом v_i

обозначает вершину с номером i , v_j обозначает вершину с номером j , а e_{ij} – ребро графа, направленное от вершины v_i к вершине v_j .

В данном орграфе вершины обозначают те или иные компоненты (комплексы, системы, подсистемы, узлы), а направленные дуги — их взаимодействие по одному из типов взаимосвязи (передача вещества, информации, либо энергии).

Импульсное воздействие ПМИ определяется импульсным вектором Imp вида $\text{imp}_j(t), j \in 1, 2, \dots, k$ для дискретного времени $t = 0, 1, 2, 3, \dots$, задаваемое соотношением

$$1 - \text{imp}_j(t) = w_j(t) / w_j(t-1) \quad (4.28)$$

Это соотношение задает изменение весов орграфа, тем самым определяя динамику распространения внешних воздействий по системе.

Для воздействия $\text{imp} = 0$ — элемент не поражается вообще, а для воздействия с силой $\text{imp} = 1$ элемент выводится из строя со 100%-й вероятностью.

Таким образом

$$w_j(t) = (1 - \text{imp}_j(t)) w_j(t-1) \quad (4.29)$$

При распространении по системе импульс ослабляется при прохождении по дугам. Предполагается что импульс проходит по дуге за один период дискретного времени t таким образом, при прохождении от элемента v_i к v_j импульсы imp_i и imp_j будут связаны следующим соотношением

$$\text{imp}_j(t+1) = \text{imp}_i(t) e_{ij} \quad (4.30)$$

Распространение ДМИ, аналогично ПМИ определяется с помощью импульсного вектора вида: $\text{imp}_j(t), j \in 1, 2, \dots, k$ для дискретного времени $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ Вес узла j равен

$$v_j = \text{imp}(t) / \text{imp}(t-1) \quad (4.31)$$

Таким образом

$$\text{imp}(t) = \text{imp}(t-1) v_j \quad (4.32)$$

При распространении по системе импульс ослабляется при прохождении по узлам орграфа. Связи между узлами полагаются единичными, т.е. проходящий по ребру импульс проходит по дуге за один период дискретного времени t не ослабляется вообще. В случае, когда в узел попадает больше одного импульса одновременно, их значения суммируются.

Рассмотрим прохождение диагностирующего импульса imp через последовательно соединенные элементы с работоспособностью v_i и v_j в

моменты времени t (до узла v_i), $t+1$ (после узла v_i), $t+2$ (после прохождения узлов v_i и v_j). После прохождения первого узла

$$\begin{aligned} \text{imp}(t+1) &= \text{imp}(t)v_i, \\ \text{imp}(t+2) &= \text{imp}(t+1)v_j = \text{imp}(t)v_iv_j \end{aligned} \quad (4.33)$$

Для единичного диагностирующего импульса

$$\begin{aligned} \text{imp}_i(t) &= 1, \\ \text{imp}_i(t+2) &= \text{imp}_i(t)v_iv_j = v_iv_j \end{aligned} \quad (4.34)$$

Рассмотрим прохождение диагностирующего импульса imp через параллельно соединенные элементы с работоспособностью v_i и v_j в моменты времени t (до прохождения узлов v_i и v_j), $t+1$ (прохождения узлов v_i и v_j), $t+2$ (после прохождения точки соединения ребер графа). В этом случае к обоим узлам придет одинаковый импульс величины $\text{imp}(t)$, который при прохождении узлов разделится на два импульса imp

$$\begin{aligned} \text{imp}_i(t+1) &= \text{imp}(t)v_i, \\ \text{imp}_j(t+1) &= \text{imp}(t)v_j \end{aligned}$$

В точке соединения ребер получим сумму импульсов imp_i и imp_j

$$\text{imp}(t+2) = \text{imp}_i(t+1) + \text{imp}_j(t+1) = \text{imp}(t)v_i + \text{imp}(t)v_j = (v_i + v_j)\text{imp}(t) \quad (4.35)$$

Для единичного диагностирующего импульса

$$\begin{aligned} \text{imp}_i(t) &= 1, \\ \text{imp}_i(t+2) &= (v_i + v_j)\text{imp}_i(t) = v_iv_j \end{aligned} \quad (4.36)$$

Аналогичным образом, можно получить соотношения для более сложных последовательно-параллельных структур.

Рассмотрим импульсное воздействие на систему, элементы которой имеют живучесть и связи равные единице, с помощью ПМИ с вектором Imp вида

$$\text{Imp} = (\text{imp}_1 = 0, \text{imp}_2 = 0, \dots, \text{imp}_i = 1, \dots, \text{imp}_n = 0) \quad (4.37)$$

Такое воздействие моделирует поражение объекта номер i импульсом силы 1. В данной системе такое воздействие равносильно полному поражению элемента и его выходу из строя. В единичной системе, поражаемой единичным импульсом, связи между узлами орграфа также являются единичными, поэтому импульс будет распространяться по системе до тех пор, пока не выведет из строя все доступные элементы. Это «наихудший сценарий» для единичного поражающего воздействия. Следовательно, критичность элемента и уязвимость системы можно оценить по степени ущерба наносимого его выхода из строя для всей системы. В качестве примера такого воздействия рассмотрим орграф из 17 элементов (рис.4.7) $\langle V \rangle = V_i, i = 1, \dots, 17$. Последовательно воздействуем на каждую из его вершин единичным импульсом и проследим за распространением импульса по орграфу.

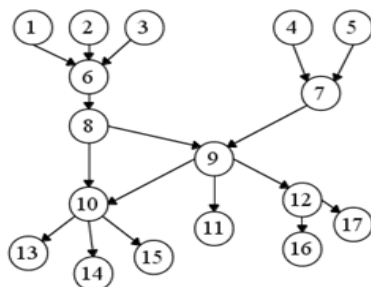


Рис.4.7. Направленный орграф из 17 элементов

Коэффициент структурной угрозы (КСУ) для данного узла это отношение пораженных элементов системы ко всем элементам системы, при единичном поражении данного элемента и беспрепятственном распространении импульса по системе. Таким образом, если после поражения элемента V_j распространяющимся импульсом будет поражено i элементов, а общее количество элементов в графе N , получим следующее выражение для коэффициента угрозы k_s

$$k_s(V_j) = \frac{i}{N} \quad (4.38)$$

Рассмотрим сценарий поражения единичным импульсом связей системы (предположив, что узлы имеют единичную проводимость). Аналогично предыдущему случаю импульс будет распространяться по системе до тех пор, пока не выведет из строя все доступные элементы. Критичность ребра (а вместе с ней и уязвимость системы) можно оценить по тому, насколько существенный ущерб наносит его выход из строя на систему в целом. Рассмотрим орграф из 17 элементов (рис. 4.8), для которого $\langle V \rangle = V_i, i = 1, \dots, 17, \langle E \rangle = e_{ij}, i = 1, \dots, 17, j = 1, \dots, 17$.

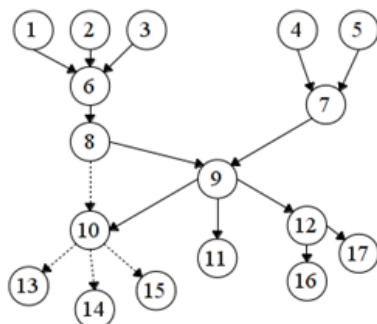


Рис.4.8. Поражение связи $E_{8,10}$ в орграфе

Последовательно воздействуем на каждое из его ребер единичным импульсом и проследим за распространением импульса по графу. Например,

на рис. 4.8 изображена конечная фаза распространения импульса при поражении связи $E_{8,10}$ (вышедшие из строя связи графа обозначены пунктиром). КСУ для данной связи это отношение пораженных связей системы ко всем связям системы, при единичном поражении данного элемента и беспрепятственном распространении импульса по системе. Если после поражения элемента E_{ij} распространяющимся импульсом будет поражено i_e связей, а общее количество связей в графе N_e , получим выражение для коэффициента угрозы k_{se}

$$k_{se}(E_{ij}) = \frac{i_e}{N_e} \quad (4.39)$$

Оценки структурной угрозы по узлам и по связям позволяют получить в первом приближении весовую оценку значимости узла или связи для обеспечения живучести системы в целом. Численно такая оценка тем больше, чем уязвимее элемент для системы. В терминах обеспечения живучести оценку можно выразить следующими градациями:

выше 0.7 — объект является структурно важным для системы и требует наибольшего внимания при техническом контроле и диагностики, а при снижении эксплуатационных параметров должен быть заменен на исправный в первую очередь;

от 0.7 до 0.3 — объект является структурно значимым для системы, однако обладает меньшим приоритетом в отношении обеспечения живучести системы;

от 0.3 и ниже — объект не является структурно важным для системы в целом и его выход из строя минимально сказывается на живучести системы в целом.

Таким образом, КСУ отражает первый уровень оценки угрозы системы, позволяя ранжировать элементы по степени структурной значимости и выделять наиболее угрожаемые из них.

Понятие функциональной уязвимости системы тесно связано с понятием работоспособности. В общем случае оценка работоспособности системы F выражает вероятность выполнения системы поставленной задачи за заданное время Δt

$$F_i = \frac{P_i^t}{P_0^t} = \frac{P(S_i | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \quad (4.40)$$

Рассмотрим базовую КИМ работоспособности в виде орграфа состоящего из двух последовательно соединенных элементов V_i и V_j , каждый из которых обладает работоспособностью f_i и f_j . Суммарная работоспособность системы, как вероятностная характеристика определяется следующими соотношениями

$$F_{ij} = \frac{P_{1ij}^t}{P_{0ij}^t} = \frac{P_{1i}^t P_{1j}^t}{P_{0i}^t P_{0j}^t} = f_i f_j \quad (4.41)$$

$$F_{ij} = f_i f_j$$

Рассмотрим оргграф состоящий из двух параллельно соединенных элементов V_i и V_j , каждый из которых по отдельности обладает работоспособностями f_i и f_j соответственно. Суммарная работоспособность такой системы, как вероятностная характеристика

$$F_{ij} = \frac{P_{1ij}^t}{P_{0ij}^t} = \frac{P_{1i}^t}{P_{0i}^t} + \frac{P_{1j}^t}{P_{0j}^t} = f_i + f_j \quad (4.42)$$

Из полученных соотношений следует, что изменение единичного диагностирующего импульса при прохождении по узлам оргграфа численно равно общей работоспособности системы. Следовательно, моделированием прохождения по системе единичного ДМИ можно оценить ее работоспособность по установленным критериям. Прохождение по системе единичного импульса позволяет оценить работоспособность оргграфа при условии, что он является «двухполюсным» - имеет один входной узел (источник), один выходной узел (приемник) и бесконтурным (в нем отсутствуют контуры обратной связи). При наличии в когнитивно-имитационной модели контуров производится процедура конденсации, описанная в [40], обеспечивающая моделирование оргграфа, как бесконтурного ациклического. При наличии в КИМ нескольких источников и приемников, с целью алгоритмического упрощения процедуры вводится понятие "суперисточника" и "суперприемника" – узлов особого рода. "Суперисточник" имеет единичную работоспособность ($f_{\text{super}} = 1$) и связан исходящими связями со всеми источниками. "Суперприемник" имеет единичную работоспособность и связан входящими связями со всеми источниками. При прохождении единичного диагностирующего импульса по оргграфу, достроенному до графа с "суперисточником", "суперприемником" и полностью исправным узлом v_i ($f_i = 1$) можно получить изменение импульса на пути от "суперисточника" до "суперприемника". Это позволяет оценить функциональную работоспособность системы F_1 при полностью работоспособном узле v_i . Выведа узел из строя ($f_i = 0$) и промоделировав прохождение единичного диагностирующего импульса, получим оценку функциональной работоспособности системы F_0 при неисправном узле v_i . Приняв в качестве оценки состояние системы F_1 для полностью исправного элемента f_i и F_0 при полностью неисправном элементе, получим для узла v_i

$$\Theta b\langle i|t \rangle = \frac{\partial F(t)}{\partial f_i(t)} = \frac{F_1}{F_0} \quad (4.43)$$

Последовательным проведением аналогичных исследований для каждого из узлов графа определяют значения критериев для всех узлов системы. Например, изменяя оргграф на рис.4.8 получим схему, изображенную на рис.4.9. Узел S_1 функционирует как "суперисточник", а

узел S_2 – "суперприемник". Прохождение диагностического импульса между узлами обеспечивает получение общей функциональной оценки системы – работоспособность.

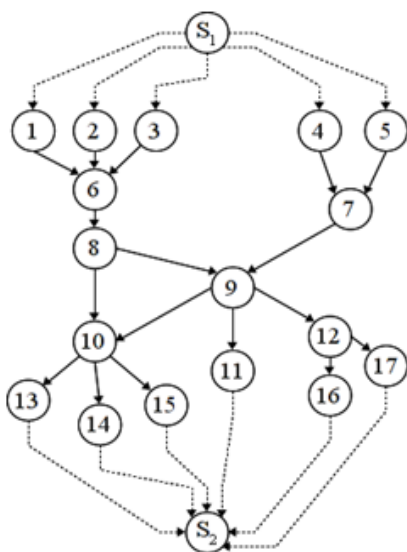


Рис.4.9. Орграф с "суперисточником" и "суперприемником"

Предлагаемая методика позволяет: получить комплексную оценку живучести технических систем с точки зрения их функциональности и структурной уязвимости; определить численную оценку угроз и риска отказов для ранжировки приоритета уязвимостей; определить значимость действующих в системе взаимосвязей; осуществить имитационное моделирование распространения внешних воздействий по структуре системы с использованием когнитивной карты.

Основной задачей разработанного метода является оценка влияния состояния отдельной МС на общую функциональную и структурную живучесть СТС, т.е. оценка функциональных и структурных угроз МС. По аналогии со структурной и функциональной угрозами агрегатов СТС используем для оценки степени угроз коэффициенты структурной и функциональной угроз, численно выражающие степень этих угроз на интервале (0-1). Для значения коэффициента «0» состояние МС не сказывается на живучести СТС, а для значения «1» живучесть СТС определяется состоянием МС.

Рассмотрим орграф (V, E) , моделирующий СТС, состоящую из набора узлов и соединяющих их дуг

$$V = (v_i), i = 1, \dots, n \quad (4.44)$$

$$E = (e_{ij}), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$$

где V – множество узлов системы;
 E – множество направленных дуг системы;
 v_i – узел с номером i ;
 e_{ij} – ребро графа, направленное от узла v_i к узлу v_j ;
 n – количество узлов в орграфе.

Узлы (вершины) орграфа моделируют состояние агрегатов, причем вес каждого узла v_i соответствует его функциональному состоянию. Направленные дуги (ребра) орграфа моделируют МС, причем вес каждой дуги v_{ij} соответствует ее функциональному состоянию, а направление дуги обозначается порядком индексов i и j . Таким образом, дуга e_{ij} направлена от i -того узла v_i к j -тому узлу v_j .

В простом случае, когда рассматриваются только дискретные состояния узлов и дуг (по бинарной шкале значений «исправен» — «не исправен») для момента дискретного времени $t = 0$, все значения весов узлов и дуг равны единице

$$v_i = 1, i = 1, \dots, n \quad (4.45)$$

$$e_{ij} = 1, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$$

Для оценки структурной угрозы и вычисления коэффициента структурной угрозы используется метод ПМИ, используемый решения задачи оценки структурных угроз МС. ПМИ моделирует поражение отдельного ребра и задается вектором

$$I(t) = (\text{imp}_{ij}(t)), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, t = t_1, \dots, t_d \quad (4.46)$$

где $\text{imp}_{ij}(t)$ – набор значений модулей ПМИ, соответствующих направленным дугам орграфа;

t – момент дискретного времени;
 t_1 – начальный момент дискретного времени;
 t_d – конечный момент дискретного времени.

В каждый из моментов дискретного времени t , вектор модулей ПМИ $I(t)$ задается таким образом, что для каждой дуги e_{ij} в момент дискретного времени t_z существует $\text{imp}_{ij}(t_z)$ равный нулю, если на момент t_z импульс не проходит по дуге, и 1, если импульс поражает дугу.

На начальном этапе исследований производится выбор поражаемой дуги e_{ab} (моделируется поражение МС между агрегатами с номерами a и b каким-либо внешним фактором). Далее создается вектор $I(t)$, в котором для момента дискретного времени $t=1$ модули ПМИ имеют следующие значения

$$\text{imp}_{ij}(t=1) = 1, \text{ для } i = a, j = b$$

$$\text{imp}_{ij}(t=1) = 0, \text{ для } i \neq a, j \neq b$$

МИ последовательно распространяется по орграфу, выводя из строя смежные узлы и дуги на каждом очередном шаге дискретного времени. При этом дуга и узел меняют свое значение с 1 («исправен») на 0 («не исправен»), а значения модулей вектора $I(t)$ отражают прохождение ПМИ по узлам на каждый дискретный момент времени, вдоль направленных ребер графа. Импульсное воздействие ПМИ на дугу орграфа определяется рекуррентным соотношением вида

$$\frac{e_{ij}(t_n)}{e_{ij}(t_{n-1})} = 1 - \text{imp}_{ij}(t_n), \quad (4.47)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$t = 0, 1, 2, 3, \dots$$

где $e_{ij}(t)$ – значение веса (передаточный коэффициент) дуги e_{ij} в дискретный момент времени t .

При прохождении по дуге e_{ij} модули значений ПМИ будут связаны следующим соотношением для двух дискретных моментов времени t и $t+1$

$$\text{imp}_{ij}(t+1) = \text{imp}_{ij}(t)e_{ij}(t) \quad (4.48)$$

Таким образом, при распространении по системе импульс ослабляется в зависимости от весов дуг орграфа СТС. В рассматриваемом случае веса дуг принимают бинарные значения (0 либо 1) в зависимости от исправности дуги. С целью моделирования промежуточных состояний частичной исправности МС алгоритм ПМИ предусматривает использование широкого диапазона весов.

После прохождения по дуге соответствующее значение модуля ПМИ меняется на нулевое — как отработавшее по данной дуге. Критерием окончания действия ПМИ является нулевое значение суммы модулей $I(t)$ в момент времени t_d

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{imp}_{ij}(t_d) = 0$$

Коэффициент структурной угрозы по связям (КСС) для заданной МС вычисляется как отношение пораженных связей системы ко всем связям системы, при поражении рассматриваемой МС и беспрепятственном распространении импульса по системе.

Пусть после поражения МС e_{ij} распространяющимся импульсом будет поражено i_s связей, а общее количество связей в графе N_s , получим следующее выражение для коэффициента угрозы k_s :

$$k_{ss}(e_{ij}) = \frac{i_s}{N_s}$$

где i_s – число пораженных ПМИ связей;

N_s – общее количество связей в графе;

$k_{ss}(e_{ij})$ – коэффициент структурной угрозы по связям для узла e_{ij}

Коэффициент структурной угрозы по агрегатам (КСА) для заданной МС вычисляется как отношение пораженных агрегатов системы ко всем агрегатам системы, при поражении рассматриваемой МС и беспрепятственном распространении импульса по системе.

Пусть после поражения МС e_{ij} распространяющимся импульсом будет поражено i_a узлов, моделирующих агрегаты СТС, а общее количество узлов в графе N_a . В результате получим следующее выражение для коэффициента угрозы k_s

$$k_{sa}(e_{ij}) = \frac{i_a}{N_a}$$

где i_a – число пораженных ПМИ агрегатов;

N_a – общее количество агрегатов в графе;

$k_{sa}(e_{ij})$ – коэффициент структурной угрозы по агрегатам для узла e_{ij}

Рассмотрим применение разработанного метода на примере СТС, состоящей из 21 агрегата, связанного сложными межагрегатными связями единого характера. На рис. 4.10 приведен оргграф обобщенной СТС, а на рис. 4.11 и 4.12 — конечные стадии поражения связей между узлами 1 и 5 и 2 и 6 соответственно. Вышедшие из строя связи графа обозначены пунктиром. Для случая поражения связи между агрегатами 1 и 5 установлено число пораженных связей $i_s = 5$, агрегатов $i_a = 5$. Для случая поражения связи между агрегатами 2 и 6 число пораженных связей и агрегатов составят $i_s = 5$ и $i_a = 5$, соответственно.

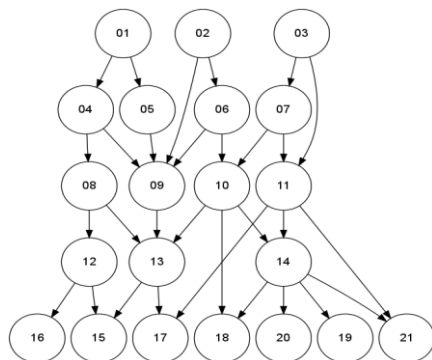


Рис. 4.10. Оргграф обобщенной СТС

Общее число связей и агрегатов в системе $N_s = 17$ и $N_a = 21$. В результате значения КСС и КСА для первого и второго случаев

$$k_{ss}(e_{1,5}) = \frac{i_s}{N_s} = \frac{5}{17} \approx 0.2941$$

$$k_{sa}(e_{1,5}) = \frac{i_a}{N_a} = \frac{5}{21} \approx 0.2381$$

$$k_{ss}(e_{2,6}) = \frac{i_s}{N_s} = \frac{12}{17} \approx 0.7059$$

$$k_{sa}(e_{2,6}) = \frac{i_a}{N_a} = \frac{11}{21} \approx 0.5238$$

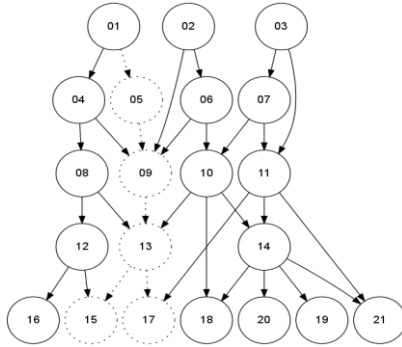


Рис. 4.11. Конечная стадия поражения МС между агрегатами 1 и 5

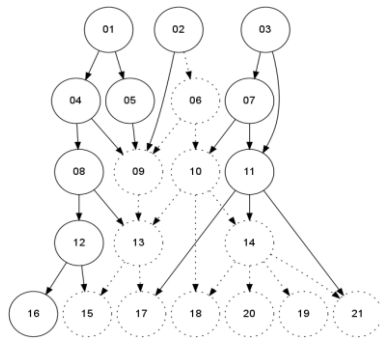


Рис. 4.12. Конечная стадия поражения МС между агрегатами 2 и 6

Из приведенных оценок следует то, что, не смотря на одинаковый уровень в иерархии СТС, связь между агрегатами 2 и 6 почти вдвое приоритетнее, чем связь между агрегатами 1 и 5.

Для реализации методики ПМИ для оценки структурных угроз МС был разработан алгоритм распространения ПМИ по связям СТС (рис. 4.13).

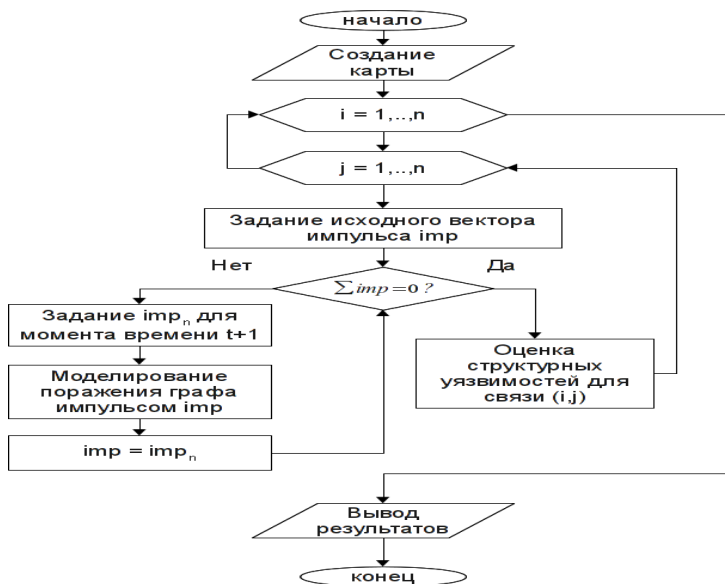


Рис.4.13. Алгоритм оценки структурных угроз МС CTC

Представление данных моделируемого графа осуществляется с помощью файла в формате JSON, в котором задаются исходные параметры моделируемой системы. В частности определения вида узлов и связей для CTC выглядят следующим образом

```

{
...
"v":
{
"01":{"04":1, "05":1},
"02":{"06":1, "09":1},
"03":{"07":1, "11":1},
"04":{"08":1, "09":1},
"05":{"09":1},
"06":{"09":1, "10":1},
"07":{"10":1, "11":1},
"08":{"12":1, "13":1},
"09":{"13":1},
"10":{"13":1, "14":1, "18":1},
"11":{"14":1, "21":1, "17":1},
"12":{"15":1, "16":1},
"13":{"15":1, "17":1},

```



```

"14":{"18":1, "19":1, "20":1, "21":1},
"15": {},
"16": {},
"17": {},
"18": {},
"19": {},
"20": {},
"21": {}
    },
...
}

```

Кроме узлов СТС и связей между ними в файле задаются исходные данные, названия и веса узлов, название моделируемой системы и прочие служебные параметры. Это позволяет гибко изменять модель СТС, не меняя основного исходного кода программы.

Основная программа организована по модульному принципу и включает в себя основную часть (модуль main()), вспомогательные функции и модуль моделирования ПМИ. Набор вспомогательных функций содержит следующие функции: MakeEdge – генерирует список дуг графа и их весов, GetJson – выполняет анализ JSON-файла и строит на его основе оргграф СТС; AddToCsvFile – используется для сбора информации в csv-файлы; Impuls – моделирует прохождение ПМИ по оргграфу для заданной МС.

«Изыюминкой» построения алгоритма является нумерация дуг оргграфа, которая осуществляется с помощью словарей (dictionary) языка Python, в которых в качестве ключа вхождения используется тип данных «кортеж» (tuple), состоящий из двух элементов — названий начального и конечного узла дуги. В частности, для оргграфа, приведенного на рис.4.8.

Такой массив выглядит следующим образом

```

{'01', '04'):1, ('01', '05'):1, ('02', '06'):1, ('02', '09'):1, ('03', '07'):1, ('03', '11'):1,
('04', '08'):1, ('04', '09'):1, ('05', '09'):1, ('06', '09'):1, ('06', '10'):1, ('07', '10'):1, ('07',
'11'):1, ('08', '12'):1, ('08', '13'):1, ('09', '13'):1, ('10', '13'):1, ('10', '14'):1, ('10',
'18'):1, ('11', '14'):1, ('11', '17'):1, ('11', '21'):1, ('12', '15'):1, ('12', '16'):1, ('13',
'15'):1, ('13', '17'):1, ('14', '18'):1, ('14', '19'):1, ('14', '20'):1, ('14', '21'):1}

```

Подобное представление облегчает формирование массива данных по дугам оргграфа и работу с ними, поскольку дает возможность организовывать списки дуг автоматизировано на основе исходной матрицы оргграфа, так же вести их обработку при моделировании прохождения ПМИ. В частности упомянутая выше подпрограмма MakeEdge получается компактной, как по быстродействию, так и по форме

```

def MakeEdge(v,Vs,e):
    for i in Vs:
        if len(v[i]) > 0:

```

```
ishod = v[i].keys()
ishod.sort()
for j in ishod:
    e[(i,j)] = v[i][j]
```

На вход этой программы подаются словари v и e , а также упорядоченный список вершин V_s . Изначально словарь e пуст, а словарь v содержит данные, полученные из json-файла. Если существует связь между узлом i и узлом j в процессе анализа орграфа в словарь e добавляется пара «ключ-значение» в формате $(i,j):1$. Т.е. обеспечивается возможность формировать списки связей для любой возможной конфигурации, заданной в исходном json-файле.

Таким образом, были разработаны принципы, критерии и методика оценки влияния состояния межагрегатных связей на живучесть СТС. Разработан и реализован алгоритм оценки структурной живучести на базе метода оценки влияния состояния межагрегатных связей, описаны программные особенности реализации метода. Полученные результаты станут основой в дальнейшей разработке метода оценки влияния МС на живучесть иерархических СТС, в которых возможно возникновение контуров и паттернов взаимодействия замкнутого характера и оценка СТС, в которых связи представлены не-бинарными параметрами.

При оценке живучести технических систем в целях обеспечения информационной поддержки принятия решений на стадии эксплуатации и упреждающих действий при аварийной ситуации со СТС необходима разработка СППР. Разработанная СППР основывается на КИМ оценки живучести СТС, сочетающей взаимодействующие между собой системы, подсистемы и отдельные технические узлы, рассматриваемые как объекты с индивидуальными характеристиками. Взаимодействие узлов определяется их входящими и исходящими параметрами. СППР оценивает общее состояние технических систем с использованием единой системы параметров узлов, а также значения характеристик узлов, их взаимодействие, основанное на значении и динамике входящих и исходящих параметров. Каждый узел подключается к системе, либо как виртуальный компонент библиотеки узлов (модель функционирующего узла судовой технической системы), либо как реальный компонент, получающий через информационный интерфейс на входе параметры диагностики технических систем и преобразующий их в системные параметры СППР. Интерфейсы используются как аппаратные, так и программные. Применение единой параметрической модели и системных интерфейсов для отдельных узлов позволяет включать в модель узлы самых различных систем и самой широкой номенклатуры.

Для обобщенной СТС общее количество узлов принято равным m . В качестве индивидуальных характеристик каждого узла выбраны: срок

службы (S_t); текущее состояние (S_n) и вектор состояний узла; вектора вероятности состояний и работоспособности узла; ресурсный вектор; матрица влияния узла; коэффициент доверия. Характеристики узла и его взаимодействие со смежными узлами системы в соответствии с КИМ СТС отражены на рис.4.14. Срок службы задается в момент создания системы, автоматически увеличивается по мере эксплуатации узла и изменяется в момент замены узла на новый. Каждый узел характеризуется n состояниями S_n , каждое из которых отражает эволюцию исправности узла.

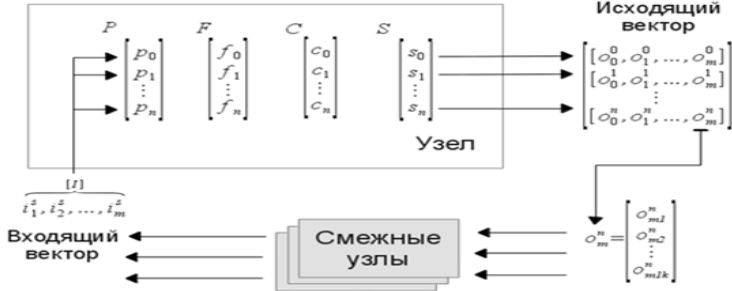


Рис. 4.14. Характеристики узла и его взаимодействие со смежными узлами технической системы

При этом за S_0 принимается полностью исправное состояние узла, а S_i , для $i=1, \dots, n$ отражают переход узла во все менее исправные состояния. В простейшем случае у узла два состояния: $n = 0$ – узел исправен и $n = 1$ – узел неисправен. Характеристика "состояние узла" S_t – отражает его состояние на текущий момент времени. Промежуточные значения для количества состояний $n > 2$ могут отражать как различные варианты неисправного состояния узла (поломка, перегрев, вибрация выше проектной и т.д. и т.п.), так и несколько стадий износа узла (в частности – различные состояния распределения). Параметры влияния рассматриваются, как безразмерные немасштабные величины в диапазоне от 0 до 1, где 0 отражает полное отсутствие связи (выход узла из строя не влияет на смежный узел), а 1 – прямую связь (выход из строя узла, влечет за собой однозначный выход из строя смежного узла).

Матрица влияния узла - комбинация входящего и исходящего векторов влияния, отражающего взаимодействие узла с другими узлами системы. Входящий вектор влияния отражает параметры влияния на данный узел других узлов системы и зависит от состояния узлов системы, связанных с данным узлом. Исходящий вектор влияния отражает параметры влияния данного узла на узлы системы связанные с данным узлом и изменяется по мере перехода системы в каждое из n состояний. Следовательно, исходящий

вектор O состоит из n матриц влияния. Каждая из матриц влияния представляет собой сочетание $m \times k$, где m – число узлов системы смежных данному узлу, k – число возможных состояний смежных узлов. Значением поля матрицы является модификатор вероятности смены состояния смежного узла. Соответственно, полная матрица исходящего влияния узла представляет собой $m \times k$ матрицу из n векторов влияния по m параметров в каждом из них. Вектор вероятности состояний узла P отражает вероятности перехода узла в одно из n состояний. Вероятность перехода узла в одно из n состояний является функцией текущего состояния узла S , его срока службы $T = t$, а так же входящего вектора влияния, моделирующего входящие параметры влияния других узлов системы. Вектор работоспособности узла F указывает на состояние узла в каждом из n состояний и отражает его способность выполнить поставленную задачу за время Δt

$$F_i = \frac{P_i^t}{P_o^t} = \frac{P(S_i | \Delta t)}{P(S_o | \Delta t)} \quad (4.49)$$

Приведенная характеристика является качественной, соответствующая отношению вероятности выполнения целевой работы в состоянии S_o к вероятности выполнения работы в S_i . В случае двух состояний узла такой вектор будет иметь всего два значения – $F_o=1$ (узел работоспособен) и $F_i=0$ (узел неработоспособен)

$$F_i = \frac{P(S_o | \Delta t)}{P(S_o | \Delta t)} = \frac{1}{1} = 1 \quad (4.50)$$

$$F_o = \frac{P(S_i | \Delta t)}{P(S_o | \Delta t)} = \frac{0}{1} = 0$$

Вектор ресурса восстановления отражает затраты на восстановление узла до состояния S_o . Он может иметь как временную (человеко-часы, активное время на восстановление при оптимальном количестве персонала), так и экономическую составляющую.

В каждый момент времени узел системы характеризуется несколькими обобщенными параметрами: состоянием, сроком службы, ожидаемой работоспособностью, ожидаемым ущербом, критичностью. Ожидаемая работоспособность является математическим ожиданием работоспособности узла и вычисляется по формуле

$$F_\Sigma = \sum_{i=0}^n f_i \cdot p_i \quad (4.51)$$

Ожидаемый ресурс восстановления узла является математическим ожиданием затрат ресурсов на восстановление узла и вычисляется

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n c_i \cdot p_i \quad (4.52)$$

Функционально-структурные связи модели, характеризуются: вектором исходящих связей – A , являющимся ассоциативным массивом; вектором входящих связей – I , являющимся ассоциативным массивом; местом объекта в иерархии системы – L , отражающим связь, характер и взаимодействие объекта с другими объектами иерархии, его воздействие на другие объекты и на весь комплекс СТС в целом. Веса связей выбираются на основе методов статистического прогнозирования или на основе экспертной оценки. В качестве критериев для формализации значений работоспособности и весов входящих, исходящих связей используются результаты исследований с применением метода экспертной оценки.

Кроме объектов, модель включает в себя также набор матриц взаимосвязей (МВ), каждая из которых отражает взаимосвязь между объектами системы для определенного типа связи. В самом общем случае при учете только статистического взаимодействия объектов СТС из всего массива МВ используется – главная матрица взаимосвязей, отражающая влияние и взаимосвязь по работоспособности элементов. Работа модели СТС базируется на концепции событий, воздействующих на объекты модели и каким-либо образом изменяющих их и их характеристики. Модель не требует, чтобы одновременно в оценке живучести участвовали все параметры, а благодаря объектно-ориентированному построению может включать в себя автоматический сбор информации, отражающей состояние системы. Представим индивидуальные характеристики объектов модели живучести СТС следующим образом. Вектор состояний объекта S_0, \dots, S_n характеризует объект n состояниями, каждое из которых отражает эволюцию исправности узла. В соответствии с [58] за S_0 принимается абсолютно исправное состояние узла, S_n - состояние неисправности узла, а набор состояний S_i для $i=1, \dots, n$ отражает переход узла ко все менее исправным состояниям. В простейшем случае у узла два состояния: $n=0$ – узел исправен и $n=1$ – узел неисправен.

Оценка вероятности смены состояния объекта P_i указывает на вероятность перехода объекта в состояние S_i на промежутке времени t .

Таким образом, для текущего состояния системы S_c можно записать

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = P(S_c \rightarrow S_0) \\ P_1 = P(S_c \rightarrow S_1) \\ \dots \\ P_n = P(S_c \rightarrow S_n) \end{array} \right\} \quad (4.53)$$

Вектор состояний P_0, \dots, P_n в (1) может быть использован для описания и прогнозирования поведения объекта на промежутке времени t . Время эксплуатации объекта T и время последнего тестирования объекта на

работоспособность T_i , как и в [41] используются при расчете амортизации объекта, а также при учете в диагностиках системы контроля ее компонентов. Оценка работоспособности объекта F в общем случае выражает вероятность выполнения объектом поставленной задачи за заданное время t и определяется

$$F_i = \frac{P_1^t}{P_0^t} = \frac{P(S_i | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \quad (4.54)$$

Тогда оценка работоспособности объекта (4.53) F для n возможных состояний объекта

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \frac{P_1^t}{P_0^t} = \frac{P(S_1 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \\ F_2 = \frac{P_2^t}{P_0^t} = \frac{P(S_2 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \\ \dots \\ F_n = \frac{P_n^t}{P_0^t} = \frac{P(S_n | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \end{array} \right\} \quad (4.55)$$

Оценка работоспособности (4.55) является качественной характеристикой, которая так же может быть получена на основе экспертной оценки, отражающей отношение вероятности выполнения целевой работы в состоянии S_0 к вероятности выполнения работы в S_i .

Ожидаемая работоспособность на участке времени t оценивается математическим ожиданием работоспособности объекта

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n f_i p_i, \quad (4.56)$$

где f_i – работоспособность объекта в состоянии i ,

p_i – вероятность перехода в состоянии i

В случае двух состояний объекта вектор (4) имеет значения – $F_0=1$ (объект работоспособен) и $F_1=0$ (объект неработоспособен)

$$F_0 = \frac{P(S_0 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} = \frac{1}{1} = 1$$

$$F_1 = \frac{P(S_1 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} = \frac{0}{1} = 0$$

Оценка ресурса C_i является оценкой затрат на восстановления объекта из текущего состояния до исправного состояния

$$C_i = W(C_i \rightarrow C_0) \quad (4.56)$$

Для полностью исправного объекта (4.56) имеет вид

$$C_0 = W(C_0 \rightarrow C_0) = 0$$

Единицами оценки могут быть как временные (человеко-часы), так и финансовые затраты. Общая оценка работ по объекту является

математическим ожиданием затрат ресурсов на восстановление объекта

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n c_i p_i, \quad (4.57)$$

где c_i – работоспособность узла в состоянии i Работа разработанной системы оценки живучести СТС возможна в нескольких режимах. В режиме интегральной оценки система указывает на возможные в разные моменты времени неисправности, оценивает их критичность и выдает рекомендации по восстановлению/замене узлов в зависимости от их влияния на систему и экономического эффекта. В режиме дифференциальной оценки система оценивает каждую из иерархий технических систем по категории "система – подсистема – узел" и выдает рекомендации аналогичные режиму интегральной оценки. В поисковом режиме система моделирует возможные неисправности и выход из строя узлов с различными целевыми функциями поиска. К целевым функциям относятся: поиск критических и уязвимых мест системы; оценка различных вариантов профилактики системы (в зависимости от критичности и экономического эффекта, который может выражаться как в ценовой, так и в ресурсозатратной форме); наихудшие сценарии возможных неисправностей и возможность "аварийных резонансов" (случаи когда выход из строя незначительных элементов может повлечь за собой каскадную цепь поломок и выходов из строя систем).

4.3. Модели оценки живучести сложных технических систем

4.3.1. Методологический подход при решениях задач по разработке моделей оценки живучести технических систем

С целью обеспечения гибкости виртуальной когнитивной модели судна для оценки живучести его технических систем разработана объектно-ориентированная модель, в которой каждый компонент представлен относительно автономным объектом. Каждый из объектов модели представляет собой структуру данных, в которой представлены индивидуальные характеристики элементов СТС, а так же данные, отражающие его функционально-структурные связи с другими элементами модели. Взаимодействие объектов в модели осуществляется с помощью обмена данными в момент события, отражающего происходящие изменения в одном или нескольких объектах. При моделировании технического комплекса его характеристики отражают обобщенное поведение и воздействия на смежные, связанные технические системы. Объект модели может находиться в двух («исправен», «неисправен») и более состояниях (промежуточные значения указывают на частичную исправность объекта и/или ее оценку в безразмерном масштабе).

К индивидуальным характеристикам объекта относятся:

- дескриптор объекта D , являющийся его идентификатором в системе;
- состояние S , представленное в виде вектора состояний объекта S_0, \dots, S_n (исправное, неисправное, промежуточное);
- оценка вероятности смены состояния объекта в ближайший промежуток времени $t — P_0, \dots, P_n$;
- время эксплуатации объекта T к текущему моменту времени, выраженное в календарных или в непосредственно рабочих часах;
- время последнего тестирования узла на работоспособность T_i ;
- оценка работоспособности узла F_0, \dots, F_n для каждого из его состояний S_0, \dots, S_n соответственно, представленного в виде вектора;
- вектор оценки ресурса C восстановления системы из текущего состояния до «нулевого» (исправного состояния).

На примере импульсного моделирования продемонстрируем работу системы поддержки принятия решений для возможных событий и сценариев. Моделирование импульсного воздействия проведено с помощью программы написанной на языке Python с использованием средств визуализации graphviz.

Одним из путей оценки живучести системы является моделирование воздействия на нее, приводящее к изменению весов вершин графа по импульсному правилу. Импульсное воздействие определяется импульсным вектором Imp вида: $imp_j(t), j=1,2,\dots,n$ для дискретного времени $t = 0,1,2,3,\dots$, которое задается соотношением вида

$$imp_j(t) = w_j(t) / w_j(t-1) \quad (4.58)$$

Это соотношение задает изменение весов орграфа и тем самым определяет динамику распространения внешних воздействий по системе. Единичное импульсное воздействие на систему с помощью вектора Imp вида

$$Imp(0) = (imp_1 = 1, imp_2 = 1, \dots, imp_i = I, \dots, imp_n = 1) \quad (4.59)$$

Такое воздействие моделирует поражение объекта номер i импульсом силы I . Рассмотрим упрощенную модель СТС, например электропитания рефрижераторного судна (рис.4.15), поражаемую единичным импульсным воздействием на один из ее элементов. Вектор воздействия $Imp()$ играет роль поражающего фактора. Система содержит три основные шины питания, основные коммутаторы ($S1-S9$), предохранители ($B1-B3$), главный щит электропитания (W), холодильные установки ($Ref.1, Ref.2$), основные и побочные потребители электроэнергии ($P1-P3$) и питается от двух дизельных генераторов ($G1,G2$), основного генератора ($S.Gen$). В зависимости от судовых энергопотребностей судна, режима маневрирования система электропитания потребляет энергию от: основного генератора; одного из дизельных генераторов; двух генераторов; основного генератора и дизельных генераторов раздельно; от портовых систем через коммутатор $S7$. Схема (рис.4.15) в обобщенном виде представлена на рис.4.16 орграфом.

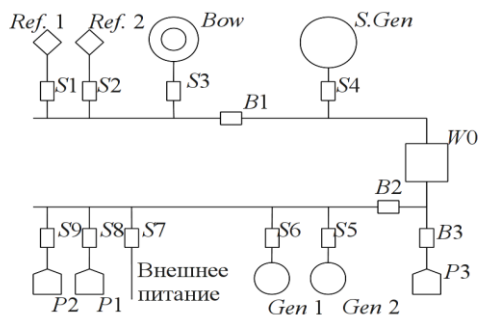


Рис. 4.15. Упрощенная схема системы электропитания рефрижераторного судна

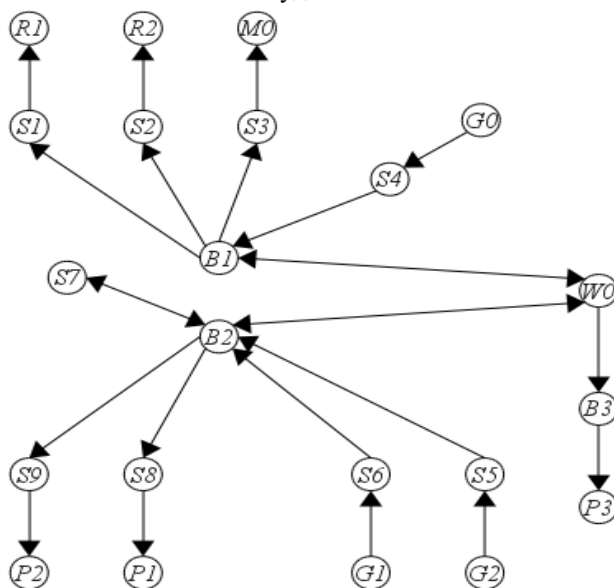


Рис. 4.16. Орграф системы электропитания ($R1-R2$ - рефрижераторные установки; MO - маневровый привод; $W0$ - главный электрощит)

Рассмотрим первый режим работы системы электропитания судовых систем от основного генератора $G0$ для случая возникновения импульсного действия на объект $B1$. Пусть изначально все элементы системы полностью исправны (находятся в состоянии S_0 и имеют работоспособность $F_0 = 1$). Для упрощения модели примем коэффициент

взаимодействия между объектами везде одинаковым и равным 1.6
 Состояние объектов системы после пошагового моделирования распространения импульса приведены в табл.4.1. Распространению импульса соответствует графическое отображение последовательностью диаграмм (рис.4.17-4.20). Частично пораженные узлы выделены пунктиром.

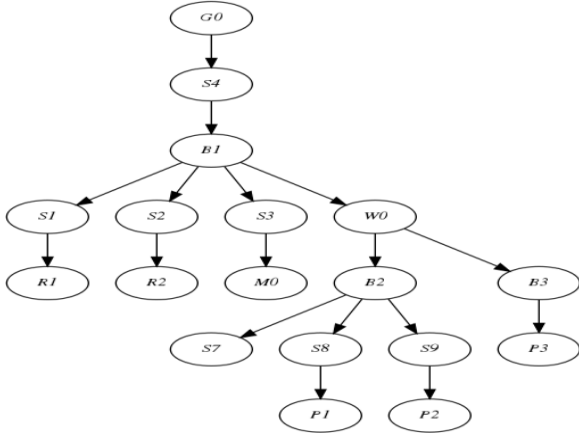


Рис.4.17. Орграф системы электропитания в режиме работы основного генератора

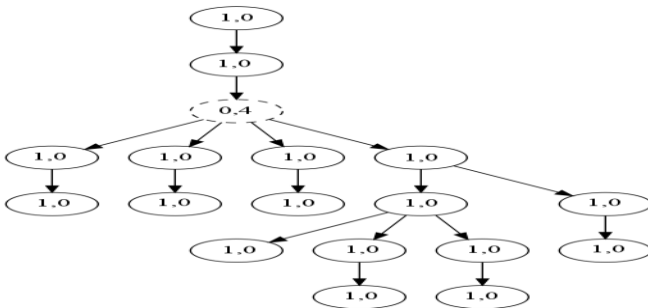


Рис.4.18. Орграф для момента времени T=1

Таблица 4.1. Импульсное поражение узла B1

T	B1	B2	B3	G0	M0	P1	P2	P3	R1	R2	S1	S2	S3	S4	S7	S8	S9	W0
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,52	0,52	0,52	1,00	1,00	1,00	1,00	0,52
3	0,40	0,68	0,68	1,00	0,68	1,00	1,00	1,00	0,68	0,68	0,52	0,52	0,52	1,00	1,00	1,00	1,00	0,52
4	0,40	0,68	0,68	1,00	0,68	1,00	1,00	0,88	0,68	0,68	0,52	0,52	0,52	1,00	0,88	0,88	0,88	0,52
5	0,40	0,68	0,68	1,00	0,68	1,00	1,00	0,88	0,68	0,68	0,52	0,52	0,52	1,00	0,88	0,88	0,88	0,52

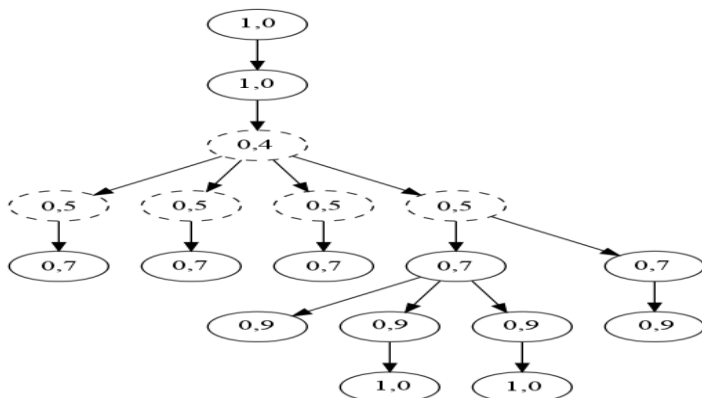


Рис. 4.19. Состояние графа на момент времени $T=5$

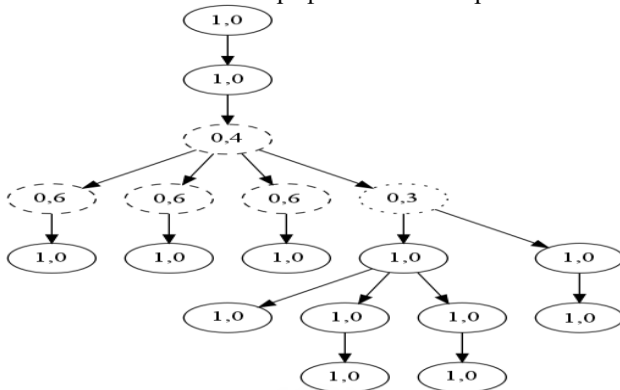


Рис. 4.20. Состояние графа при поражении узла $W0$ в момент времени $T=3$

Из табл. 4.1 и диаграмм рис. 4.18-4.20 можно проследить развитие процесса поражения системы энергоснабжения. Импульсная помеха вывела из строя объект $B1$ и распространилось на объекты $S1, S2, S3$ и $W0$ существенно повредив их (оценка работоспособности упала до 0,5), а так же опосредованно повлияла на работоспособность объектов $R1, R2, M0, B2, B3$. На следующем шаге – объекты $S7, S8, S9, P3$. Далее рассмотрим поражение частично исправной системы – системы, в которой узел $W0$ работоспособен только частично ($F_{W0} = 0.5$). Частичная неисправность узла $W0$ (рис.4.20) привела к его выходу из строя уже на начальной стадии распространения помехи по системе энергоснабжения. При исследовании поведения системы в конфигурации питания сети от вспомогательных генераторов $G1-G2$ при импульсном воздействии по узлу $B1$ были получены результаты, отраженные на диаграммах рис. 4.21,4.22.

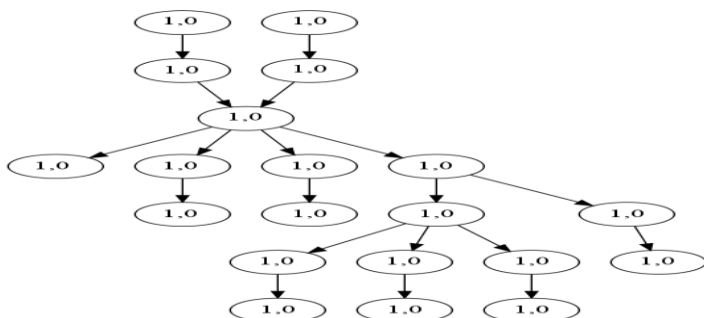


Рис.4.21. Начальная конфигурация системы в варианте 2

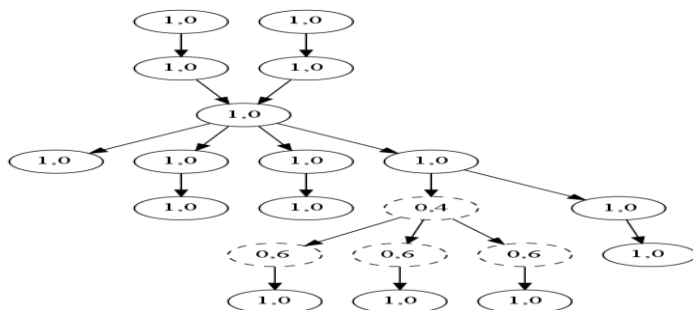


Рис. 4.22. Конечная конфигурация системы при поражении узла *B1*

Из диаграммы (рис.4.22) следует, что даже при частичной неисправности объекта *W0* поражающее влияние объекта *B1* на него не распространится. Таким образом, хотя объекты *W0*, *B1*-*B3* по-прежнему играют главную роль в системе электроснабжения, обеспечение живучести объектов *B1* и *B3* является менее приоритетным, чем объектов *W0* и *B2*. Аналогичным образом конфигурация системы и приоритеты ее объектов будут меняться в зависимости от режима работы системы электроснабжения, причем каждая новая конфигурация будет приводить к изменению приоритетов во взаимодействии объектов системы и общей реакции системы на поражающий фактор. Соответственно, должна изменяться оценка живучести СТС.

Из полученных результатов следует, что модель оценки живучести СТС обладает объектно-ориентированным характером. В когнитивной модели СТС необходимо избыточное резервирование полей данных – поскольку в различных конфигурациях системы могут возникать различные по характеру и функционально-структурному принципу связи. Полнота учета данных связей зависит от возможностей когнитивного анализа системы, однако даже на уровне относительно примитивных моделей можно добиться практически полезных результатов.

4.3.2. Когнитивное имитационное моделирование для оценки живучести сложных технических систем

Для реализации метода оценки живучести ФКТС разработаны алгоритмы моделирования ПМИ (рис.4.23) и ДМИ (рис.4.24).

Прохождение ПМИ по КИМ ФКТС позволяет с изменением характеристики агрегатов оценить структурную угрозу комплексу в результате поражения его агрегатов, однако ПМИ остается без изменений. Прохождение ДМИ с дополнением КИМ двумя виртуальными узлами - «суперисточником» и «суперприемником» позволяет оценить функциональную угрозу ФКТС без изменений характеристик агрегатов, но с изменением ДМИ.

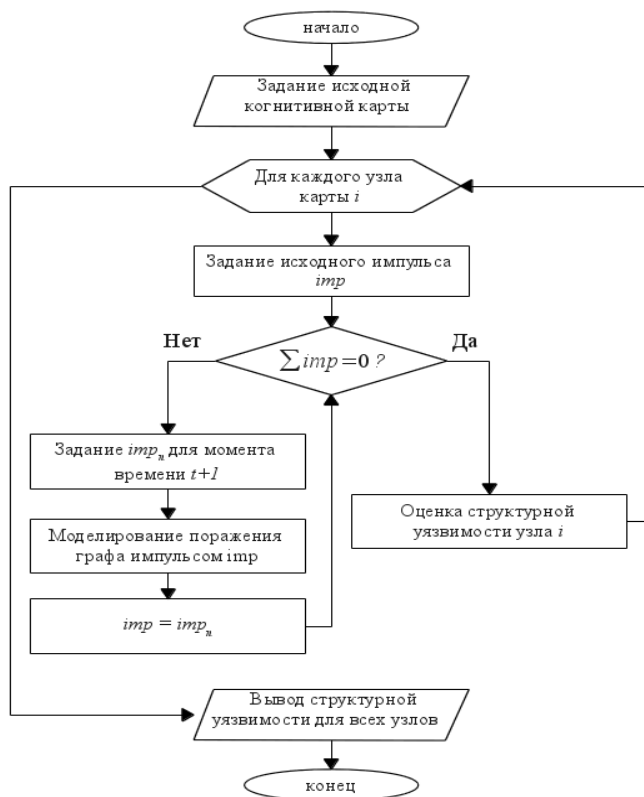


Рис. 4.23. Блок-схема алгоритма моделирования ПМИ

В целях реализации разработанного метода оценки живучести

ФКТС создан моделирующий программный комплекс. В качестве базового инструмента используется кросс-платформенный язык Python. Это позволило получить, как численные, так и графические результаты исследований для моделей ФКТС различного класса и сложности.

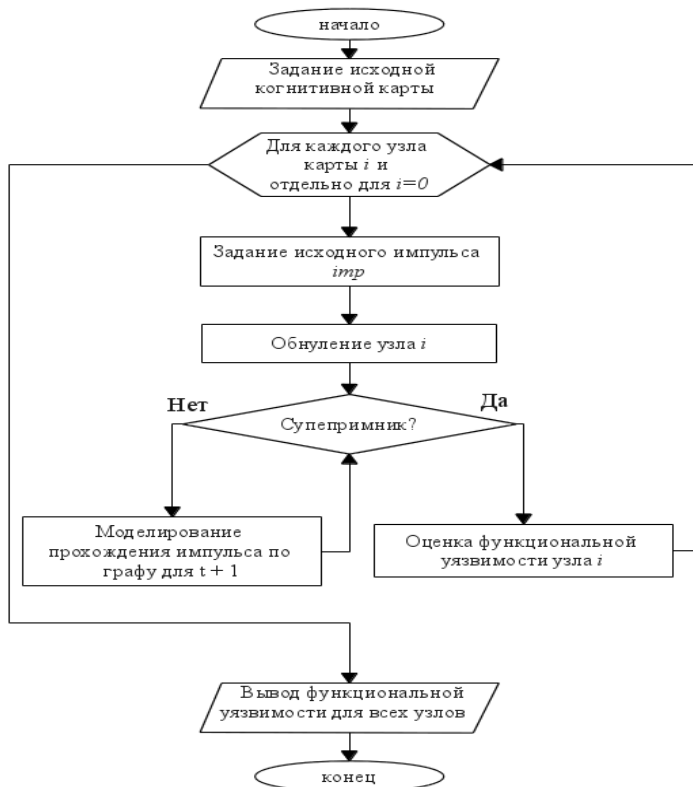


Рис. 4.24. Блок-схема алгоритма моделирования ДМИ

Метод КИМ разделяется на несколько этапов. Предварительно производится составление когнитивной карты, затем выполняется оценка структурных и функциональных угроз КИМ с помощью поражающих и диагностирующих имитационных моделирующих импульсов. На основе полученных оценок угроз вычисляется оценка риска отказов для ФКТС. В разработанном методе основой когнитивной модели является когнитивная карта, представленная в виде орграфа. В зависимости от уровня моделирования когнитивная карта с разной точностью и достоверностью отражает взаимодействие агрегатов системы в нескольких различных аспектах, в частности дуги орграфа могут рассматриваться как

взаимовлияние объектов системы, либо как связь агрегатов по ресурсу («энергия» – «информация» – «вещество»). При определении точных значений весов дуг и переменных объектов модели структурная модель превращается в функциональную. При составлении когнитивной карты локальные показатели живучести, работоспособности и надежности, полученные по регламенту работы ФКТС, формализуются и приводятся к единой системной немасштабной и безразмерной оценке. В когнитивной карте не детализируются характер и динамика взаимовлияния агрегатов, изменения ФКТС в целом в зависимости от ситуации и контекста, общая динамика системы. Учет всех перечисленных обстоятельств потребовал смену уровня рассмотрения модели, т.е. перехода от когнитивной карты к когнитивной модели ФКТС. Структурные уязвимости ФКТС оцениваются путем КИМ. Метод реализуется в алгоритме, при помощи которого генерируются наборы данных, описывающих заданные характеристики реальной системы. Оценки, получаемые в результате манипулирования параметрами когнитивной модели по определенным абстрактным правилам, соответствуют реальным процессам ФКТС. Исходная модель формулировалась в терминах формата JSON и передавалась на вход программы на Python. Результатом работы программы стал массив таблиц в csv-формате и файлов в формате языка dot, которые с помощью утилиты make пакетно передавались на вход программы graphviz. Результатом работы программы graphviz стал массив диаграмм в формате png. Анализ полученных результатов проводился средствами Calc Libre Office. Моделирование осуществлено на базе дистрибутива Debian GNU/Linux с использованием средств программной оболочки (makefiles, язык сценариев bash). Формат языконезависимый и может применяться практически с любым языком программирования. Для моделирования поражающего и моделирующего импульсов было создано два отдельных скрипта, каждый из которых содержит набор общих функций. Обе программы включают в себя основную часть, вспомогательные функции и модуль моделирования ПМИ или ДМИ — в зависимости от целевого назначения программы. Основная часть программ отвечает за координацию вызовов вспомогательных функций и моделирующих подпрограмм. Программы организованы таким образом, что могут быть вызваны как самостоятельно (в режиме «stand alone»), так и в составе более сложных программных комплексов (в виде подключаемых библиотек языка Python). Разработанный моделирующий программный комплекс обеспечивает получение, как численных, так и графических результатов КИМ ФКТС различного класса и сложности. Описанный метод позволяет по когнитивной карте с помощью имитационного моделирования определять угрозы и риски отказов - уязвимые и критичные места ФКТС, влияющие на его живучесть, а также обеспечивает получение численной оценки угроз и рисков для ранжирования приоритета уязвимостей комплекса.

4.3.3. Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем

Сложные технические системы, функционирование которых характеризуется взаимозависимостью и взаимодействием обладают повышенным риском отказов в работе. Для надежной работы таких СТС крайне важно оперативное принятие управляющих решений по прогнозированию и минимизации негативных последствий от аварийных ситуаций. В этих целях возможно использование системного подхода при оценке надежности функционирования СТС, учитывающего взаимозависимость и взаимодействие подобных систем. Основой системного подхода может стать разработка и использование когнитивных моделей, позволяющих выявить противоречия совместного функционирования СТС, осуществить их качественный анализ, разработать структурную схему причинно-следственных связей ключевых агрегатов исследуемой технической системы [45, 118–122]. Благодаря этому становится возможной разработка эффективной стратегии управления СТС. Первым этапом разработки когнитивной модели технологической взаимозависимости и взаимодействия СТС должна стать формулировка целей (предназначения) деятельности технических систем.

Для успешного проведения исследований, например, оборудование судна, представлено совокупностью систем, состоящих из взаимозависимых и взаимосвязанных наиболее значимых СТС: судовая энергетическая установка (СЭУ); система энергоснабжения судна (СЭС); судовые вспомогательные системы (СВС). При проведении исследований необходимо учесть воздействия внешней окружающей среды (ВС), как совокупность сложно прогнозируемых природных и неприродных факторов в аварийных экстремальных ситуациях. Основными структурными объектами СЭУ являются: главный двигатель (ГД), судовой движитель (СД), валопровод (ВП), а также вспомогательные механизмы (ВМ). СЭС состоит из источников электрической энергии (ИЭЭ) в виде генераторов постоянного и переменного тока, аккумуляторов, кабельных сетей (КБ), электrorаспределительных щитов (ЭРЩ), преобразователей электроэнергии (ПЭ). СВС представляют собой комплекс различных систем, основными из которых являются: трюмная (ТР); балластная (БС); пожаротушения – комплекс пожаротушения (КП); комфортного кондиционирования воздуха, технического кондиционирования воздуха, парового отопления – климатический комплекс (КК). Для выбранного состава СТС структурная схема взаимозависимости и взаимодействия систем имеет вид, представленный на рис. 4.25. В когнитивной модели СТС учтено взаимодействие и взаимосвязи агрегатов, находящихся в СЭУ, СЭС

и СВС (рис. 4.26). При разработке когнитивной модели использован язык DOT, служащий для описания и построения графов модели.

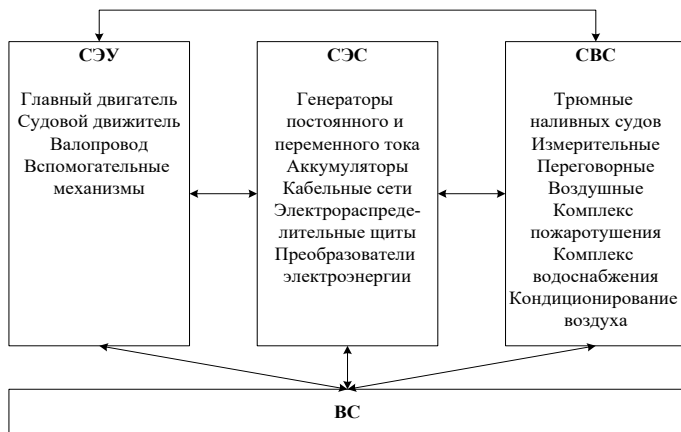


Рис 4.25. Структурная схема взаимозависимости и взаимосвязанности СТС

Интерпретация кода произведена с использованием программного продукта *Graphviz*. Моделирование осуществлено в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 4.27. Согласно когнитивной карте взаимозависимых и взаимосвязанных судовых технических средств (рис. 4.28), первоначальное воздействие на судно оказывается внешней средой. При проведении исследований импульс поражающего воздействия, связанный с факторами внешней среды, перемещается к ключевым элементам каждой из подсистем. Проходя по соответствующим связям через все агрегаты СКТС, поражающий импульс поступает на блок приемника (БПР), предназначенный для анализа состояния работоспособности каждой подсистемы комплекса.

При моделировании дополнительно использовался подход, заключающийся в аналитическом или экспертном выборе соответствующих вершин графа, на которые производится моделирующее воздействие, а также моментов времени, в которые данные воздействия проводятся. При этом учитывались различные характеристики (показатели) объекта исследования (табл. 4.2). Установленные в ходе исследований и расчеты значения коэффициента структурной уязвимости по агрегатам СКТС приведены на гистограмме рис. 4.29. На оси абсцисс показаны наименования всех объектов полученной информационной когнитивной модели, на оси ординат – диапазон значений, которые принимает коэффициент структурной уязвимости (от 0 до 1 с шагом 0,1).

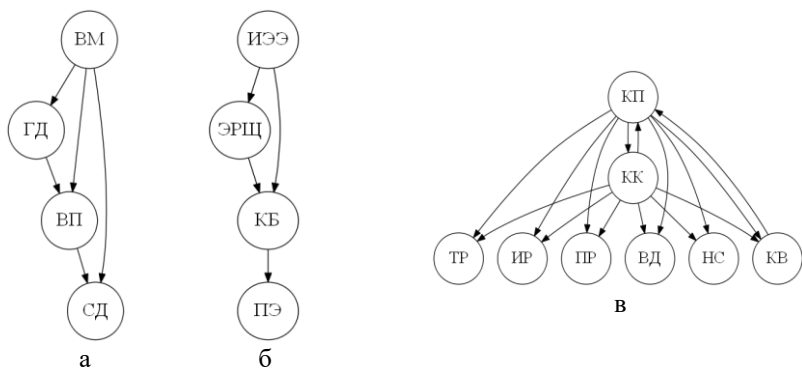


Рис 4.26. Взаимодействие и взаимосвязи агрегатов модели СКТС: а – взаимодействие объектов подсистемы СЭУ; б – взаимодействие объектов подсистемы СЭС; в – взаимодействие объектов подсистемы СВС

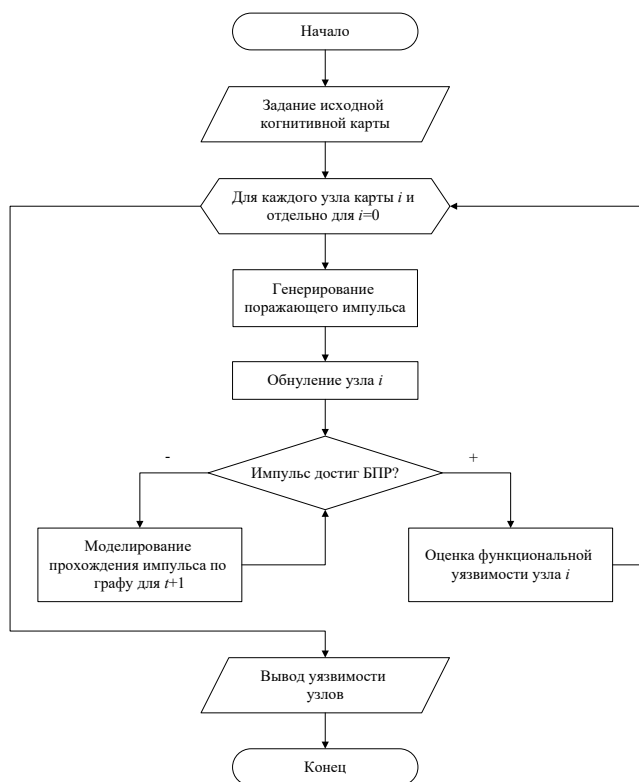


Рис. 4.27. Алгоритм оценки уязвимости узлов

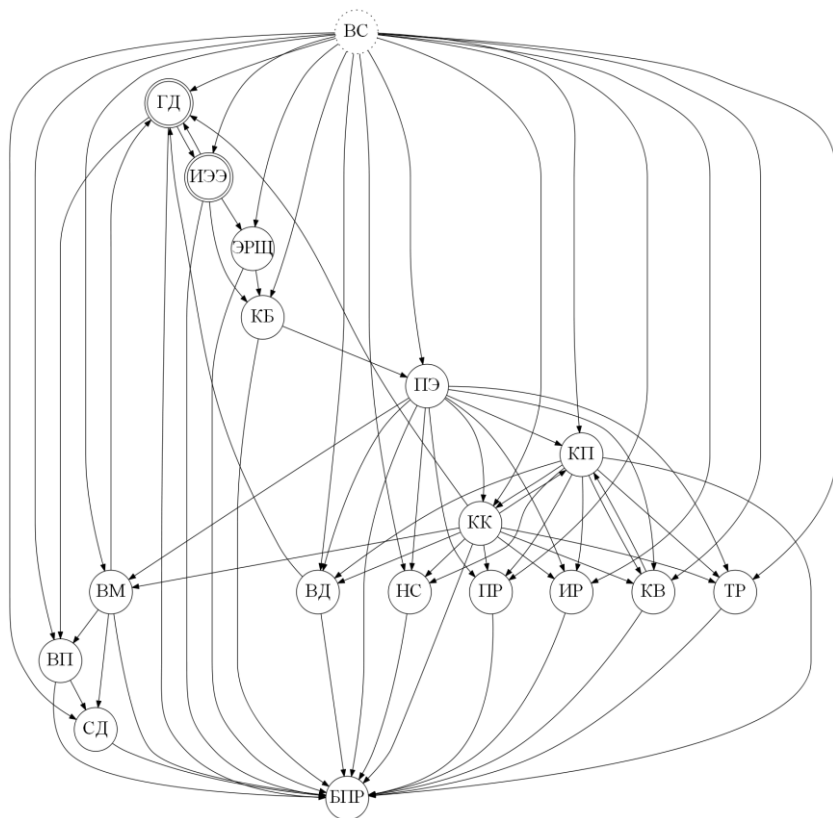


Рис. 4.28. Когнитивная карта взаимозависимости и взаимодействия СТС

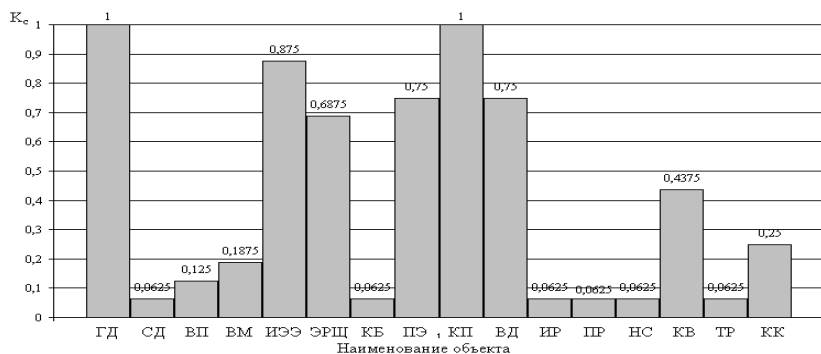


Рис. 4.29. Значения коэффициентов структурной уязвимости по агрегатам СТС

Таблица 4.2. Характеристики показателей модели

№	Название объекта	Блок объекта	Оценка
1	Главный двигатель	СЭУ	Качественная
2	Судовой движитель	СЭУ	Качественная
3	Валопровод	СЭУ	Качественная
4	Вспомогательные механизмы	СЭУ	Качественная
5	Источники электроэнергии	СЭС	Количественная
6	Линии электропередач	СЭС	Качественная
7	Электрораспределительные щиты	СЭС	Качественная
8	Преобразователи электроэнергии	СЭС	Количественная
9	Трюмные системы	СВС	Качественная
10	Системы наливных судов	СВС	Качественная
11	Измерительные системы	СВС	Качественная
12	Переговорные системы	СВС	Качественная
13	Воздушные системы	СВС	Качественная
14	Комплекс пожаротушения	СВС	Качественная
15	Комплекс водоснабжения	СВС	Количественная
16	Климатический комплекс	СВС	Количественная
17	Морское волнение	ВС	Качественная
18	Воздействие ветра	ВС	Качественная
19	Воздействие подвижных объектов	ВС	Качественная
20	Воздействие неподвижных объектов	ВС	Качественная
21	Штормовое воздействие	ВС	Качественная

Из результатов проведенных исследований следует, что наиболее уязвимыми в СТС являются главный двигатель (СЭУ), комплекс пожаротушения (СВС), источники электроэнергии (СЭС), что связано с высокой степенью их зависимости от других агрегатов СТС. Разработанная информационная когнитивная модель СТС является основой проектируемой СППР при оценке и обеспечении надежности функционирования СТС. Использование информационных когнитивных моделей СТС позволит автоматизировать и оптимизировать процесс оценки надежности сложных технических систем.

4.3.4. Нечеткие модели оценки риска сложных технических систем

При автоматизации принятия решений по оценке риска отказов СТС в аварийных сценариях эксплуатации систем возникают проблемы, связанные с неопределенностью, неполнотой и нечеткостью информации, сложностью учета и взаимодействия взаимосвязанных подсистем и их элементов, входящих в СТС. Исходя из этого целесообразно использовать

аппарат нечеткой логики, в том числе нечеткие модели оценки риска взаимосвязанных и взаимодействующих СТС. Для построения нечетких моделей могут быть использованы вероятности выхода из строя подсистем и их элементов, а также ущерб от последствий рискованного события при аварийных сценариях эксплуатации СТС. В целях разработки и исследование нечетких моделей оценки рисков отказов СТС и систем ДМД в аварийных сценариях с учетом взаимосвязанных и взаимодействующих их подсистем и элементов разработана иерархическая структура модели оценки рисков СТС и систем ДМД (рис.4.30), позволяющая преодолеть разноразмерность, а именно экспоненциальный характер зависимости количества входных параметров от количества задействованных правил. Иерархическая модель состоит из нечетких моделей подсистем и элементов СТС и системы ДМД меньших размерностей. Выходы модели верхнего уровня являются входами модели нижнего уровня, поэтому существенно уменьшается количество правил. На приведенной рис.4.30 структурной схеме иерархической модели FLU (Fuzzy Local Unit) – нечетко-логические модули. В качестве нечетких моделей используются модели Такаги-Сугено. Антецедент в такой модели характеризует нечеткие области в пространстве входных значений, в которых функции консеквента проходят валидацию.

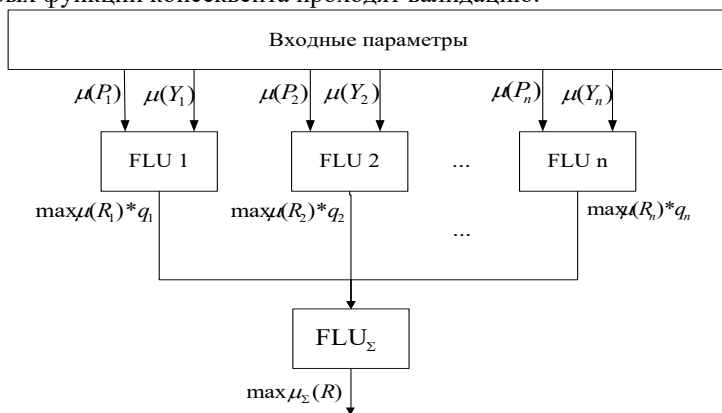


Рис. 4.30. Структурная схема иерархической модели подсистем и элементов СТС и системы ДМД

Риск исследуемого объекта можно представить в виде

$$R = \{ \langle P_i, Y_i, q_i \rangle, i = 1, 2, \dots, N, \} \quad (4.60)$$

где P_i - вероятность риска выхода из строя элемента СТС и системы ДМД;

Y_i - ущерб от последствий рискованного события;

q_i - вес i -го риска отказа, устанавливается для каждого риска в пределах $0 \dots 1$ при выполнении условий

$$\sum_{j=1}^{n_i} q_{ji} = 1 (i = 1, \overline{N}) \text{ и } \sum_{i=1}^N q_i = 1 \quad (4.61)$$

Суммарная количественная оценка риска СТС и системы ДМД с учетом оценки рисков подсистем и элементов определяется

$$R = \sum_{i=1}^N R_i \cdot q_i, \quad (4.62)$$

где R_i - количественная оценка i -го вида риска.

Нечеткое подмножество для выходной переменной с функцией принадлежности можно представить в виде

$$\mu_{\Sigma}(Y_R) = \mu_{x_i}(Y_{R_i}, q_i) = \max_{Y_R} [\mu_{x_{P_i}}(Y_R), \mu_{x_{Y_i}}(Y_R), \mu_{x_{q_i}}(Y_R)], \quad (4.63)$$

где $\mu_{\Sigma}(Y_R)$ - итоговое нечеткое подмножество для выходной переменной риска (Y_R);

$\mu_{x_i}(Y_{R_i}, q_i)$ - нечеткое множество, входящее в состав подмножества $\mu_{\Sigma}(Y_R)$;

$\mu_{x_{P_i}}(Y_R)$ - нечеткое множество вероятностей выхода из строя подсистем и элементов СТС;

$\mu_{x_{Y_i}}(Y_R)$ - нечеткое множество ущербов подсистем и элементов СТС;

$\mu_{x_{q_i}}(Y_R)$ - нечеткое множество весов рисков отказов подсистем и элементов СТС

Построение разработанных нечетких моделей оценки рисков подсистем и элементов, на примере СЭУ проводилось с помощью пакета прикладных программ Matlab, графических средств и инструментов пакета расширения Matlab – Fuzzy Logic Toolbox. Основа в расчетах функция распределения Гаусса в качестве функции принадлежности, реализуемая в Matlab в виде `gaussmf` для задания гладких симметричных функций принадлежности. На этапе фаззификации задаются входные переменные нечетких моделей оценки рисков в виде вероятностей выхода из строя и ущербов от последствий рисков событий элементов СЭУ. Используемые функции принадлежности лингвистических термов нечетких моделей масляной, топливной подсистем СЭУ, а также системы ДМД отобрано в табл. 4.3 и представлены на рис. 4.31.

Таблица 4.3. Лингвистические переменные и их функции принадлежности для подсистем СЭУ, системы ДМД

Название подсистемы	Название лингвистической переменной	Символьный вид переменной	Область определения функции принадлежности
Масляная подсистема	Ущерб	Незначительный	0,24 – 0,35
		Низкий	0,3 – 0,53
		Средний	0,5 – 0,73
		Высокий	0,69 – 0,92
		Критический	0,85 – 1
	Вероятность	Незначительная	0,17 – 0,35
		Низкая	0,3 – 0,52
		Средняя	0,47 – 0,74
		Высокая	0,7 – 0,9
		Критическая	0,85 – 0,98
Топливная подсистема	Ущерб	Незначительный	0,023 – 0,24
		Низкий	0,2 – 0,45
		Средний	0,4 – 0,7
		Высокий	0,65 – 0,9
		Критический	0,85 – 0,97
	Вероятность	Незначительная	0,0097 – 0,15
		Низкая	0,11 – 0,3
		Средняя	0,23 – 0,5
		Высокая	0,43 – 0,6
		Критическая	0,55 – 0,67
ДМД	Ущерб	Незначительный	0,012 – 0,05
		Низкий	0,04 – 0,08
		Средний	0,07 – 0,12
		Высокий	0,11 – 0,16
		Критический	0,15 – 0,18
	Вероятность	Незначительная	0,01 – 0,03
		Низкая	0,02 – 0,05
		Средняя	0,04 – 0,08
		Высокая	0,07 – 0,11
		Критическая	0,1 – 0,12

В предложенных нечетко-вероятностных подмоделях используются вероятностные нечеткие правила Такаги-Сугено нулевого порядка.

Нечеткие правила имеют следующую структуру

If ущерб от вероятность then риск,

где ущерб и вероятность – это лингвистическое значение антецедента, определяемое нечеткой функцией принадлежности, представляющее собой стохастическую переменную консеквента равную одному из значений диапазона от 0 до 1.

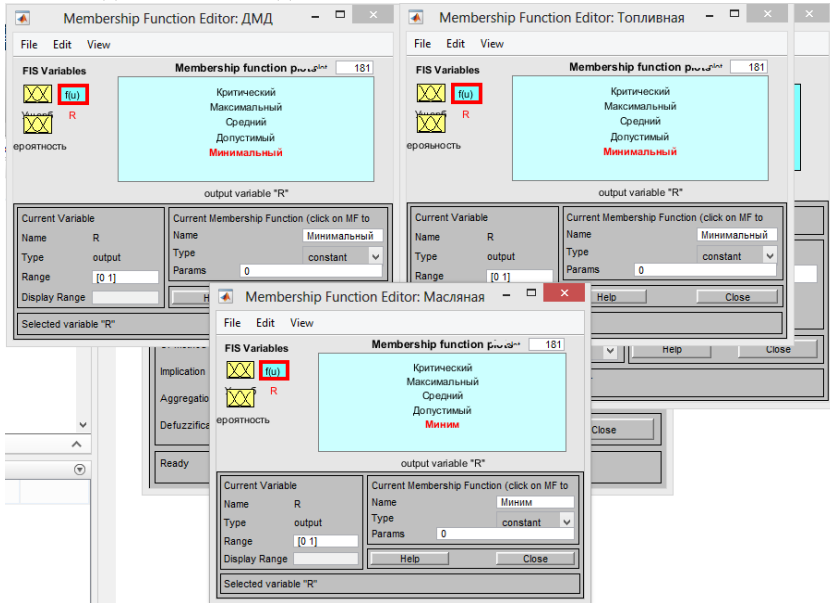


Рис.4.31. Функции допустимой принадлежности для лингвистического термина «риск» масляной, топливной подсистем СЭУ и системы ДМД

Выбор значения консеквента производится в соответствии с условными вероятностями. Использование формы «если-то» и функций принадлежности для соответствующих логических термов, обеспечило формирование базы правил используемой на основании нечетких продукций. База правил для суммарных рисков содержит 25 логических правил (табл. 4.4). Фрагмент базы логических правил нечеткой модели в виде нечетких продукций в RuleEditor приведен на рис. 4.32.

Разработанный алгоритм нечеткого логического вывода включает этапы: ввод правил программирования в виде продукционных правил ("ЕСЛИ,... ТО"); задание функции принадлежности входных переменных; получение первичного результата оценок входных переменных; фазификация оценок входных переменных; проверка истинности условий путем преобразований функций принадлежности; нахождение весовых коэффициентов по каждому из правил и функций

истинности; нахождение функции принадлежности для каждой из выходных переменных; дефаззификация выходных переменных.

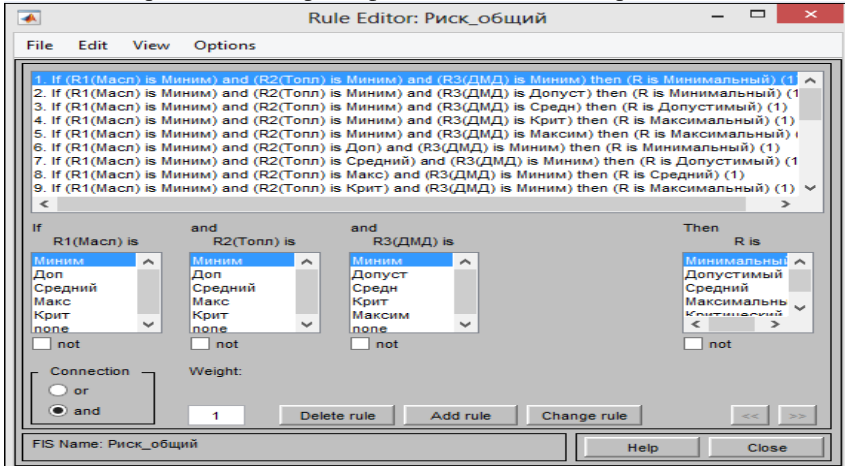


Рис. 4.32. Фрагмент базы логических правил нечетких моделей суммарной оценки рисков для масляной, топливной подсистем СЭУ и системы ДМД

Ввод продукционных правил осуществлялся на основании обобщенной функции желательности Харрингтона. В качестве функции принадлежности использовалась функция распределения Гаусса, реализованная в Matlab в виде `gaussmf` для задания гладких симметричных функций принадлежности. На этапе фаззификации задавались входные переменные нечетко-вероятностной модели оценок риска отказов СТС в виде вероятностей выхода из строя и ущербов их по элементам системы.

Дефаззификация проведена с помощью реализованного в Matlab метода центра тяжести – centroid согласно

$$\bar{y}_R = \frac{\int_{\min}^{\max} y_R \cdot \mu(y_R) dy_R}{\int_{\min}^{\max} \mu(y_R) dy_R}, \quad (4.63)$$

где \bar{y}_R - результат дефаззификации;

Y_R - переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной R ;

$\mu(y_R)$ - функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной R после этапа аккумуляции;

\min и \max – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной R .

Таблица 4.4. База правил нечетких продукций для суммарных рисков отказов

№	Риск масляной подсистемы	Риск топливной подсистемы	Риск ДМД	Общий риск
1	Минимальный	Минимальный	Минимальный	Минимальный
2	Минимальный	Минимальный	Допустимый	Минимальный
3	Минимальный	Минимальный	Средний	Допустимый
4	Минимальный	Минимальный	Максимальный	Допустимый
5	Минимальный	Минимальный	Критический	Максимальный
6	Минимальный	Допустимый	Минимальный	Минимальный
7	Минимальный	Средний	Минимальный	Допустимый
8	Минимальный	Максимальный	Минимальный	Средний
9	Минимальный	Критический	Минимальный	Максимальный
10	Минимальный	Максимальный	Минимальный	Минимальный
11	Средний	Минимальный	Минимальный	Допустимый
12	Максимальный	Минимальный	Минимальный	Средний
13	Критический	Минимальный	Минимальный	Максимальный
14	Допустимый	Допустимый	Допустимый	Допустимый
15	Допустимый	Средний	Средний	Средний
16	Допустимый	Максимальный	Максимальный	Максимальный
17	Допустимый	Критический	Критический	Критический
18	Средний	Минимальный	Минимальный	Допустимый
19	Средний	Допустимый	Допустимый	Допустимый
20	Средний	Средний	Средний	Средний
21	Средний	Максимальный	Максимальный	Максимальный
22	Средний	Критический	Критический	Критический
23	Максимальный	Максимальный	Максимальный	Критический
24	Максимальный	Критический	Критический	Критический
25	Критический	Критический	Критический	Критический

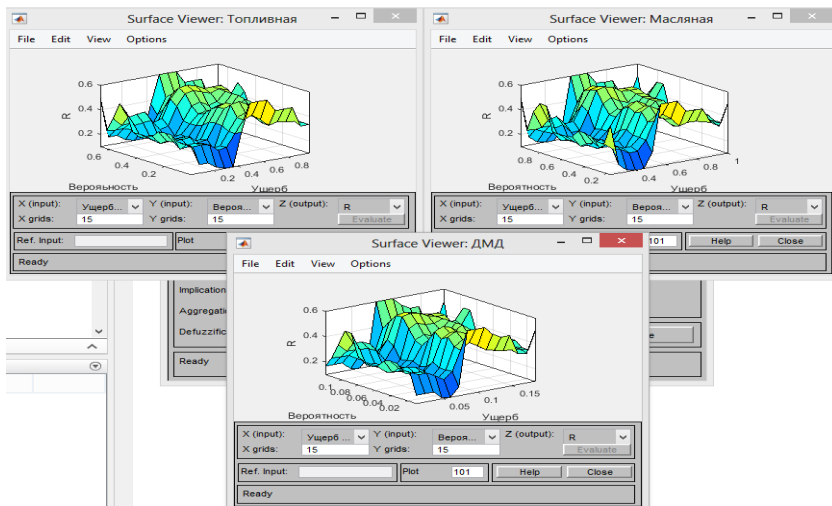


Рис.4.33. Трехмерная визуализация поверхностей нечетких моделей оценки рисков подсистем и элементов СТС, системы ДМД

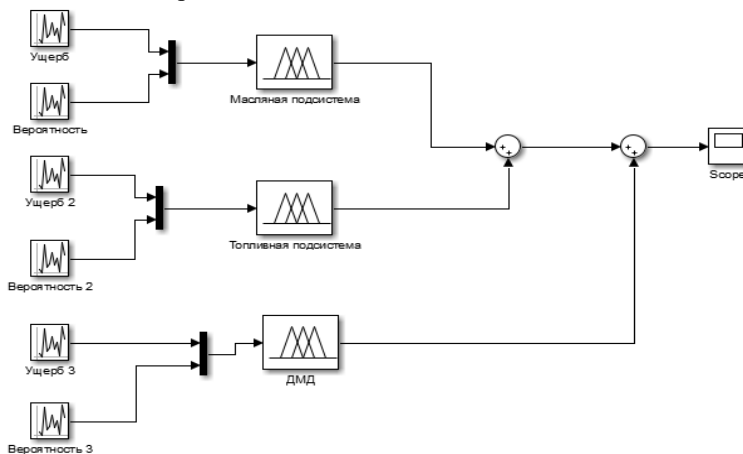


Рис. 4.34. Схема расчета суммарного риска отказов подсистем и элементов СТС, системы ДМД в Simulink Matlab

Моделированием получена трехмерная визуализация поверхностей моделей оценки риска отказов подсистем и элементов СТС, системы ДМД (рис. 4.33). Разработанные нечеткие модели позволяют получить значения рисков для каждой точки, принадлежащей трехмерной поверхности, а также отражает качественные переходы между значениями

обучения [60]. Это имеет значительное преимущество в ряде случаев, когда исследуемая СТС содержит несколько сотен или тысяч критериев и показателей, используемых при анализе и прогнозировании возможных сценариев потери работоспособности систем.

В качестве входной выборки данных для построения модели искусственной нейронной сети из базы статистических данных OREDA выбраны и рассчитаны следующие технические параметры компонентов СТС: структурный и функциональный ущерб, вероятность выхода из строя, наличие запчастей, степень ремонтпригодности, количество происшедших ремонтов, структурный и функциональный риск отказов, длительность эксплуатации, режим эксплуатации и среднерыночная стоимость. Данные параметры задаются в структурном виде посредством применения формата данных *.csv, в котором каждый столбец значения каждого отдельного параметра. Для расчетов эталонных значений риска отказов использовались предложенные в работах [44,124] методики, применяющие методы КИМ, поражающего моделирующего импульса и нормирующего воздействия. Базируясь на выборках входных данных, проведено обучение нейросети на протяжении 10000 эпох, каждый параметр содержит около 1000 значений. Для организации процесса моделирования нейронной сети разработаны программный скрипт и обобщенный алгоритм, структура которого приведена на рис.4.36.

Для построения модели нейронной сети пользователь инициирует запуск исполняемого файла разработанного программного скрипта, после чего осуществляется загрузка всех компонентов системы и визуализация главной формы. Следующим шагом является выполнение процедуры импорта соответствующих векторов входных данных по элементам и межэлементным связям по значениям выбранных параметров и векторов исходной переменной (итоговый риск). На базе этого происходит создание модели искусственной нейронной сети, с последующим заданием параметров ее тренировки, выбором активационной функции и алгоритма обучения. Последним этапом является конфигурирование настроек тренировки модели, непосредственного обучения нейронной сети, оценка полученных результатов ее работы в виде размеров полученных погрешностей и оценок, после чего обеспечивается возможность экспорта данных в бинарный mat-файл. В рамках разработанного интерфейса предусмотрен процесс пошаговой модификации выбираемых данных с возможностью обратного перехода. Разработка и обучение модели нейронной сети осуществлено на базе метода обратного распространения ошибки, линейной функции нормализации с применением активационной функции арктангенса. Структурный состав модели разработанной нейронной сети, состоящей из входного блока данных по выбранным критериям, 2 слоев, 20 нейронов и выходного блока данных по итоговым значениям рисков приведен на

рис.4.37. Реализация и обучение разработанной искусственной нейронной сети выполнена средствами системы Matlab, с помощью модуля Neural Network Toolbox.

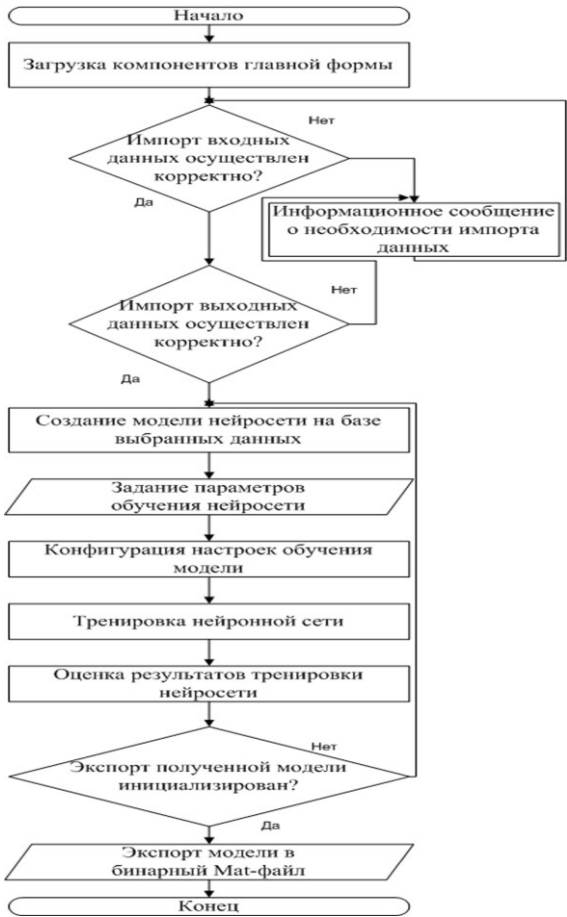


Рис.4.36. Обобщенный алгоритм создания модели нейронной сети

График отображения общего распределения данных модифицированной нейронной сети приведен на рис.4.38. По осям абсцисс и ординат отложены значения итоговых выборок данных обученной нейронной сети в диапазоне от 0 до 1. Эталонные значения векторов отложены в виде пунктирной линии, отдельные значения данных соответствующих параметров обозначено маркерами типа «круг», линия показывает корреляцию по всем исследуемым значением модели. Общая

оценка R превышает 0,8, что свидетельствует о достаточно высокой точности и адекватности построенной модели.

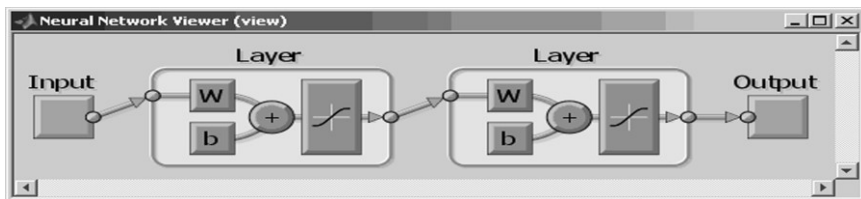


Рис.4.37. Структурный состав модели нейросети

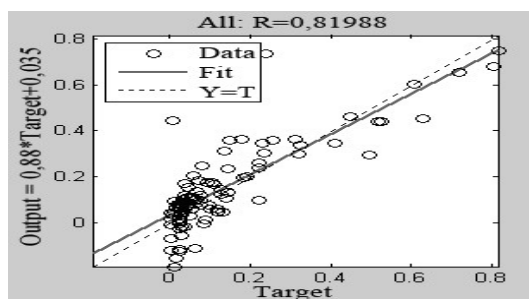


Рис. 4.38. График отображения общего распределения данных модифицированной нейросети

Проверка точности прогнозирования нейронной сети проведена на базе аналитического расчета и сравнения значений риска отказов по имеющимся в базе OREDA выборкам данных для ряда сценариев развития аварийных ситуаций СТС. Исследование разработанной модели искусственной нейронной сети для прогнозирования состояния СТС позволило установить, что достоверность прогнозирования риска отказов является высокой, относительная погрешность составила менее 3%.

Разработанная модель искусственной нейронной сети позволяет осуществлять прогнозирование риска отказов элементов и межэлементных связей СТС, с учетом специфики их комплексного взаимодействия и взаимовлияния в различных условиях эксплуатации, что подтверждается результатами моделирования. Разработанная модель может быть вынесена в унифицированный программный модуль с графическим интерфейсом с помощью программного средства Simulink и фрейворка Guide для автономного использования или интегрирована в качестве отдельной библиотеки для использования в системе поддержки принятия решений по управлению рисками технических систем.

4.4. Метод структурной оптимизации характеристик системы дистанционного мониторинга и диагностики сложных технических систем

При структурной оптимизации характеристик систем ДМД, например судовых СТС использовалась структурная схема (рис.4.39) мониторинга, передачи данных в системе ДМД (И – источники информации (устройства контроля параметров СТС в системе ДМД); K_{01} , K_{02} – контроллеры; C_1 , C_2 – серверы; К, ДК – кодер и декодер; КС – канал связи; Ш – шлюз; ЛС – локальная сеть; А – адресат).

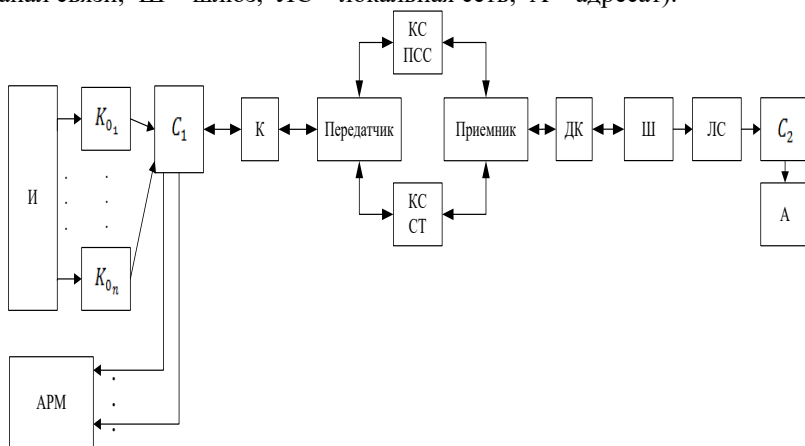


Рис. 4.39. Структурная схема системы ДМД судовых СТС

При постановке задачи структурной оптимизации характеристик систем ДМД судовых СТС в первую очередь необходимо определить набор независимых параметров, а также условий, определяющих допустимые значения, принимаемые переменными. Следующий шаг, получение целевой функции, как меры качества объекта оптимизации с заданными переменными. Третьим шагом является выбор метода и решение оптимизационной задачи. Передача информации осуществляется на основе использования одного из стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.15, WiMax, IEEE 802.22, EDGE, UMTS, LTE, параметры которых выбираются таким образом, что бы обеспечить определенный уровень качества. Накопленные данные мониторинга СТС в виде отчетов отправляются посредством подвижной спутниковой связи (ПСС) или через стационарную станцию (СТ) в береговой центр диагностики. Из практического опыта известно, что приемлемым интервалом подготовки отчетов является один час. Т.е. по истечении каждого часа производится формирование сводного отчета по накапливаемым в течение часа

данным. Сформированный отчет может быть отправлен немедленно или сохранен в буфере отчетов с последующей отправкой с другими отчетами посредством ПСС online casino dgfev или через СТ. Главной задачей является выбор момента отправки содержимого буфера отчетов. Решение задачи структурной оптимизации характеристик системы ДМД судовых СТС опирается на системный подход. Качество работы системы ДМД характеризуется совокупностью показателей (критериев) качества, влияющих на эффективность работы системы, основные из которых:

- оптимальное число типов устройств контроля технологических параметров СТС (S_{no});

- эффективность топологии СПД (F_0);
- пропускная способность СПД (B);
- быстродействие системы ДМД (T_{Σ});
- погрешность системы ДМД (σ);
- риски структуры системы ДМД (R_{Σ});
- эксплуатационные затраты на функционирование ДМД (C_{Σ});
- эффективность защиты информации в системе ДМД (Z_{Σ}).

Совокупность показателей качества системы можно записать в виде вектора

$$Q = \{S_n, F_0, T_{\Sigma}, B, \delta, R_{\Sigma}, C_{\Sigma}, Z_{\Sigma}\} \quad (4.64)$$

Величина Q является эффективностью или обобщенным показателем качества системы ДМД, для которой критерий качества – целевая функция системы. Целевая функция структурной параметрической оптимизации характеристик системы ДМД судовых СТС с набором переменных, влияющих на эффективность работы системы, вектор переменных, выраженных функций

$$\Psi = \max \varphi \{S_n, F_0, T_{\Sigma}, B, \delta, R_{\Sigma}, C_{\Sigma}, Z_{\Sigma}\} \quad (4.65)$$

Задача оптимизации заключается в обобщении максимальной эффективности системы ДМД при определенных состояниях ее показателей

$$\Psi = \max \left\{ \begin{array}{l} \varphi(S) = \min \varphi(S_n); \\ \varphi(F) = \max \varphi(F_0); \\ \varphi(T) = \max \varphi(T_{\Sigma}); \\ \varphi(B) = \max \varphi(B); \\ \varphi(\delta) = \min \varphi(\delta); \\ \varphi(R) = \min \varphi(R_{\Sigma}); \\ \varphi(C) = \min \varphi(C_{\Sigma}); \\ \varphi(Z) = \max \varphi(Z_{\Sigma}) \end{array} \right. \quad (4.66)$$

Целевая функция оптимизации числа типов устройств контроля технологических параметров СТС

$$\varphi(S) = \min \varphi(S_n),$$

$$S = \{S_n \in S | S_{\min_i} \angle S \angle S_{\max_i}, i = 1, n\}, \quad (4.67)$$

где S_n – общее число устройств контроля параметров в СТС;

n – число контролируемых параметров

Целевая функция оптимизации топологии системы передачи данных (СПД)

$$\varphi(F) = \max \varphi(F_o) = \max \varphi(R, N, D, B, C),$$

$$R = \{R_o \in R | 0 \angle R \angle R_o\} \quad N = \{N_o \in N | 0 \angle N \angle N_o\},$$

$$D = \{D_o \in D | D_{\min} \angle D \angle D_{\max}\}, \quad (4.68)$$

$$B = \{B_o \in B | B_{\min} \angle B \angle B_{\max}\},$$

$$C = \{C_o \in C | 0 \angle C \angle C_o\},$$

где R, N, D, B, C – показатели топологии структуры СПД;

R – избыточность структуры при превышении общего числа связей m над минимально необходимым их числом $n-1$;

N – неравномерность структуры, определяет квадратичное отклонение распределения связей структуры от равномерного их распределения;

D – диаметр структуры, определяет длину трактов передачи данных;

B – компактность структуры, характеризует близость ее элементов;

C – степень централизации структуры, отображает число связей проходящих через ее центральный элемент.

С учетом [128] приведя показатели R, N, D, B, C к безразмерной форме и к единому способу экстремизации, при их минимизации, получим нормированные частные критерии показатели эффективности топологии СПД R_0, N_0, D_0, B_0, C_0 . Агрегированный критерий эффективности топологии СПД может быть определен

$$F_0 = \frac{R_0 + N_0 + D_0 + B_0 + C_0}{5}, F_0 \in [0;1] \quad (4.69)$$

Быстродействие работы ДМД зависит от быстродействия функционирования в рамках реального времени устройств контроля технологических параметров СТС (T_{So}), СПД ($T_{СПД}$), а также задержек сигналов в элементах СПД (T_3). Целевая функция оптимизации быстродействия работы ДМД

$$\varphi(T) = \max \varphi(T_\Sigma) = \max \varphi\left(\sum_{k=1}^n T_{So_k}\right),$$

$$\varphi(T) = \max \varphi(T_{\Sigma}) = \max \varphi\left(\sum_{l=1}^p T_{KO_l}, T_{C1}, T_K, T_{ПД}, T_{KC}, T_{ПК}, T_{ДК}, T_{Ш}, T_{ЛС}, T_{C2}\right),$$

$$\varphi(T) = \max \varphi(T_{\Sigma}) = \max \varphi\left(\sum_{w=1}^m T_{3_w}\right),$$

$$T = \left\{ T_{So} \in T \mid T_{So_{\min}} \angle T_{So} \angle T_{So_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{KO} \in T \mid T_{KO_{\min}} \angle T_{KO} \angle T_{KO_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{C1} \in T \mid T_{C1_{\min}} \angle T_{C1} \angle T_{C1_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_K \in T \mid T_{K_{\min}} \angle T_K \angle T_{K_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{ПД} \in T \mid T_{ПД_{\min}} \angle T_{ПД} \angle T_{ПД_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{KC} \in T \mid T_{KC_{\min}} \angle T_{KC} \angle T_{KC_{\max}} \right\}, \quad (4.70)$$

$$T = \left\{ T_{ПК} \in T \mid T_{ПК_{\min}} \angle T_{ПК} \angle T_{ПК_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{ДК} \in T \mid T_{ДК_{\min}} \angle T_{ДК} \angle T_{ДК_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{Ш} \in T \mid T_{Ш_{\min}} \angle T_{Ш} \angle T_{Ш_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{ЛС} \in T \mid T_{ЛС_{\min}} \angle T_{ЛС} \angle T_{ЛС_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{C2} \in T \mid T_{C2_{\min}} \angle T_{C2} \angle T_{C2_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_3 \in T \mid T_{3_{\min}} \angle T_3 \angle T_{3_{\max}} \right\},$$

$$\varphi(T_{ЛС}) = \max \varphi(B_{ЛС}, f), \quad \varphi(T_{Ш}) = \max \varphi(B_{Ш}, f),$$

$$\varphi(T_{KC}) = \max \varphi(B_{KC}, f),$$

$$\varphi(T_K) = \max \varphi(n, T_L),$$

$$\varphi(B) = \max \varphi(B_{ЛС}, B_{Ш}, B_{KC}),$$

$$B = \left\{ B_{ЛС} \in B \mid B_{ЛС_{\min}} \angle B_{ЛС} \angle B_{ЛС_{\max}} \right\},$$

$$B = \left\{ B_{Ш} \in B \mid B_{Ш_{\min}} \angle B_{Ш} \angle B_{Ш_{\max}} \right\},$$

$$B = \left\{ B_{KC} \in B \mid B_{KC_{\min}} \angle B_{KC} \angle B_{KC_{\max}} \right\},$$

$$T = \left\{ T_L \in T \mid T_{L_{\min}} \angle T_L \angle T_{L_{\max}} \right\},$$

где T_{KO} – быстродействие работы контроллера;

T_{C1}, T_{C2} – быстродействие работы сервера;

$T_K, T_{ДК}$ – быстродействие работы кодера, декодера в СПД;

$T_{ПД}$ – быстродействие работы передатчика;

$T_{ПК}$ – быстродействие работы приемника;

$T_{ЛС}$ – быстродействие обработки сетевых потоков в принимающей локальной сети СПД;

$T_{Ш}$ – быстродействие обработки сетевых пакетов в принимающем транзитном шлюзе СПД;

$B_{ЛС}$ – пропускная способность принимающей локальной сети;

$B_{Ш}$ – пропускная способность принимающего транспортного шлюза;

$B_{КС}$ пропускная способность канала связи.

Пропускная способность СПД определяется максимальными пропускными способностями КС системы ДМД, принимающей локальной сети и принимающего транспортного шлюза СПД.

Целевая функция оптимизации пропускной способности системы ДМД

$$\begin{aligned} \varphi(B) &= \max \varphi(W_o, S/N_o), \\ W &= \{W_o \in W | W_{\min} \angle W_o \angle W_{\max}\}, \\ S/N &= \{S/N_o \in S/NB | S/N_{\min} \angle S/N_o \angle S/N_{\max}\}, \end{aligned} \quad (4.71)$$

где W – ширина полосы пропускания канала;

S/N_o – соотношение сигнал/шум в приемнике адресата

Погрешность системы ДМД состоит из погрешностей первичных преобразователей параметров устройств контроля технологических параметров (δ_{S_n}), погрешностей, возникающих из-за потери данных СПД ($\delta_{СПД}$).

Целевая функция погрешности системы ДМД

$$\begin{aligned} \varphi(\delta) &= \min \varphi(\delta_{S_n}, \delta_{СПД}), \\ \delta &= [\delta_{S_n} \in 0;1], \quad \delta = [\delta_{СПД} \in 0;1] \end{aligned} \quad (4.72)$$

Риски структуры ДМД определяются рисками устройств контроля параметров СТС ($R_{S_{n0}}$), а также средним риском СПД ($R_{СПД}$).

Целевая функция рисков структур системы ДМД

$$\begin{aligned} \varphi(R) &= \min \varphi(R_{\Sigma}) = \min \varphi(R_{S_{n0}}, R_{СПД}), \\ \varphi(R) &= \min \varphi(R_{S_{n0}}) = \min \varphi(p_{S_{n0}}, H_{S_{n0}}), \end{aligned} \quad (4.73)$$

$$\varphi(R) = \min \varphi(R_{СПД}) = \min \varphi(R_i, P(S_i)),$$

где $P_{S_{n0}}$ – вероятность выхода из строя устройств контроля параметров СТС;

$H_{S_{n0}}$ – ущерб от выхода из строя устройств контроля параметров СТС.

R_i – условный риск при передаче данных;

$P(S_i)$ – условная вероятность ошибки при передаче данных

Целевая функция эксплуатационных затрат на функционирование ДМД

$$\begin{aligned} \varphi(C) &= \min(C_{\Sigma}) = \min \varphi(C_{S_{n0}}, C_{СПД}), \\ \varphi(C) &= \min \begin{cases} \varphi(C_{S_{n0}}); \\ \varphi(C_{СПД}) \end{cases} \end{aligned} \quad (4.74)$$

В общем случае критерий эксплуатационных затрат на функционирование ДМД может быть определен исходя из матрицы, каждый элемент которой состоит из стоимости эксплуатации системы ДМД.

Для оценки качества защиты информации могут быть использованы модернизированные стандарты ISO/IEC 27005:2008, ISO/IEC 17799 и ISO/IEC 15408, OCTAVE, CoBIT, BS7799-2 и т.д].

Целевая функция эффективности защиты информации в системе ДМД имеет вид

$$\varphi(Z) = \max \varphi(Z_{\Sigma}) = \max \varphi(R_{ВЗЛ}, N_f, T_a)$$

где $R_{ВЗЛ}$ – мультипликативный критерий риска от вероятности взлома СПД;

N_f – количество функций, характеризующих функциональность СПД;

T_a - среднее время доступа к объектам защиты СПД

Задача оптимизации заключается в обеспечении максимального уровня защищенности при минимальном риске от вероятности взлома СПД, т.е.

$$\varphi(Z_{\Sigma}) = \max \begin{cases} \min \varphi(R_{ВЗЛ}); \\ \max \varphi(N_f); \\ \min \varphi(T_a) \end{cases} \quad (4.75)$$

В целях перехода от многокритериального характера решения оптимизацией задачи к однокритериальному, введем ограничения

$$\varphi(Z_{\Sigma}) = \min \varphi(R_{B3Л})$$

$$N_f \geq N_{f0};$$

при

$$T_a \leq T_{a0}$$

где N_{f0} и T_{a0} – заданные ограничения на функциональность и производительность СПД.

В целях структурной многопараметрической и многокритериальной оптимизации характеристик системы дистанционного мониторинга и диагностики судовых сложных технических систем разработана структура программного обеспечения функционирования системы ДМД (рис.4.40).

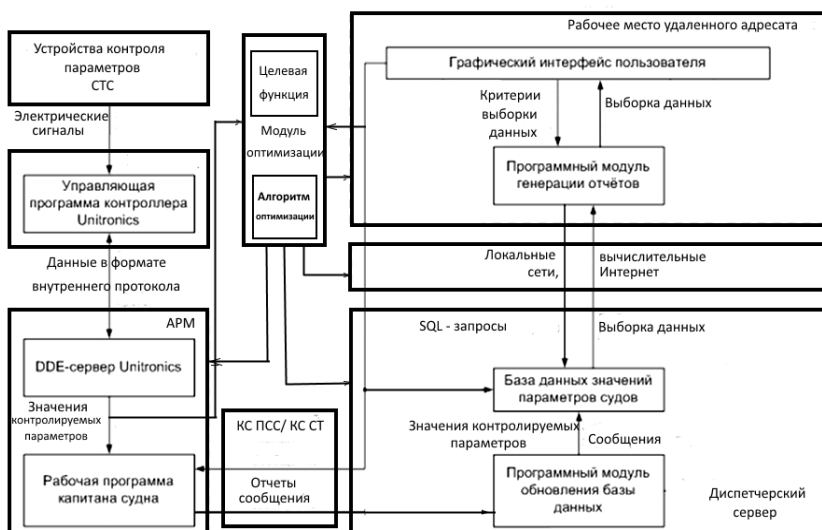


Рис. 4.40. Обобщенная структура программного обеспечения системы ДМД

Использование алгоритмов IOSO 3.0, базирующейся на технологии построения поверхности отклика, позволяет решить задачу структурной многопараметрической и многокритериальной оптимизации характеристик ДМД СТС. Решением задачи оптимизации определяются альтернативные решения, соответствующие принципу оптимальности Парето и удовлетворяющие введенным ограничениям. Интеграционная платформа IOSO реализуется через входные и выходные файлы моделей, которые могут быть в xml-формате или обычном текстовом виде. Для интеграции с известными пакетами инженерного анализа

При настройке проекта осуществляется интеграция всех необходимых программных модулей в единый расчетный блок. На этом этапе задаются особенности запуска различных программных модулей; входные, выходные и передаваемые файлы; определяется входные, выходные и передаваемые параметры. IOSO позволяет легко осуществлять настройку входных и выходных параметров, как показано на рис. 4.42. Наличие множества противоречивых требований, предъявляемых к СТС, приводит к тому, что результатом оптимизационного исследования является множество альтернативных оптимальных технических решений. В программе реализован алгоритм оптимизации, не относящийся ни к градиентным методам нелинейного программирования, ни к генетическим. В отличие от генетических алгоритмов, программа характеризуется тем, что имеет высокую скорость сходимости (минимальное потребное количество обращений к модели пользователя).

Для решения задачи оптимизации технологических параметров на примере СЭУ в качестве объекта исследования выбрана установка на базе дизеля DEUTZ TBD. При постановке задачи оптимизации характеристик систем ДЭУ определен набор независимых параметров, а также условий, определяющих допустимые значения, принимаемые переменными. Следующий шаг, получение целевой функции, как меры качества объекта оптимизации с заданными переменными. Третьим шагом является выбор метода и решение оптимизационной задачи.

Решение задачи оптимизации характеристик ДЭУ опирается на системный подход. Качество работы ДЭУ характеризуется совокупностью показателей (критериев) качества, влияющих на эффективность работы системы, основные из которых:

- долевые мощности главного двигателя (P_1), вспомогательного дизель-генератора (P_2), аварийного дизель-генератора (P_3), валогенератора (P_4);

- долевой часовой расход топлива главным двигателем (B_1), вспомогательным дизель-генератором (B_2), аварийным дизель-генератором (B_3);

- долевой удельный расход топлива главным двигателем в ходовом режиме (b_1);

- число работающих в ходовом режиме главных двигателей (n_1), вспомогательных дизель-генераторов (n_2), аварийных дизель-генераторов (n_3), валогенераторов (n_4);

- низшая удельная теплота сгорания топлива, используемого: главным двигателем (Q_1), вспомогательным дизель-генератором (Q_2), аварийным дизель-генератором (Q_3), валогенератором (Q_4).

Совокупность показателей качества системы записана в виде вектора

$$\Xi = \{P_k, B_k, b_1, n_k, Q_k\} \quad (4.76)$$

Величина Ξ является энергоэффективностью или обобщенным показателем качества ДЭУ, для которой критерий качества – целевая функция системы. Целевая функция параметрической оптимизации характеристик системы ДЭУ с набором переменных, влияющих на эффективность работы системы, вектор переменных, выраженный функцией

$$\Psi = \min \varphi \left(\sum_{i=1}^k n_i \cdot P_i \cdot B_i \cdot Q_i + n_4 \cdot P_4 \cdot b_1 \cdot Q_4 \right), \quad (4.77)$$

$$(i = \overline{1, k}), k=3$$

Варьируемые величины при расчете Ψ :

- долевая мощность главного двигателя, вспомогательного дизель-генератора, аварийного дизель-генератора, валогенератора;
- долевой часовой расход топлива главного двигателя, вспомогательного дизель-генератора, аварийного дизель-генератора;
- долевой удельный расход топлива главного двигателя в ходовом режиме

Задача оптимизации заключается в обобщении минимальных энергозатрат ДЭУ при определенных состояниях ее показателей

$$\Psi = \min \begin{cases} \varphi(P_1) = \min \varphi(P_1); \\ \varphi(P_2) = \min \varphi(P_{2_k}); \\ \varphi(P_3) = \min \varphi(P_{3_k}); \\ \varphi(P_4) = \min \varphi(P_{4_k}); \\ \varphi(B_1) = \min \varphi(B_{1_k}); \\ \varphi(B_2) = \min \varphi(B_{2_k}); \\ \varphi(B_3) = \min \varphi(B_{3_k}); \\ \varphi(b_1) = \min \varphi(b_{1_k}) \end{cases} \quad (4.78)$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности главного двигателя

$$\varphi(P_1) = \min \varphi(P_{1_k}), \quad (4.79)$$

$$P_1 = \{P_{1_k} \in P_1 \mid P_{1_{\min_i}} < P_1 < P_{1_{\max_i}}, i = \overline{1, k}\}$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности вспомогательного дизель-генератора

$$\varphi(P_2) = \min \varphi(P_{2_k}), \quad (4.80)$$

$$P_2 = \{P_{2_k} \in P_2 \mid P_{2_{\min_i}} < P_2 < P_{2_{\max_i}}, i = \overline{1, k}\}$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности аварийного дизель-генератора

$$\varphi(P_3) = \min \varphi(P_{3k}), \quad (4.81)$$

$$P_3 = \{P_{3k} \in P_3 \mid P_{3\min_i} < P_3 < P_{3\max_i}, i = \overline{1, k}\} \quad (4.82)$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности валогенератора

$$\varphi(P_4) = \min \varphi(P_{4k}), \quad (4.83)$$

$$P_4 = \{P_{4k} \in P_4 \mid P_{4\min_i} < P_4 < P_{4\max_i}, i = \overline{1, k}\}$$

Целевая функция оптимизации долевого часового расхода топлива главным двигателем

$$\varphi(B_1) = \min \varphi(B_{1k}), \quad (4.84)$$

$$B_1 = \{B_{1k} \in B_1 \mid B_{1\min_i} < B_1 < B_{1\max_i}, i = \overline{1, k}\}$$

Целевая функция оптимизации долевого часового расхода топлива вспомогательным дизель-генератором

$$\varphi(B_2) = \min \varphi(B_{2k}), \quad (4.85)$$

$$B_2 = \{B_{2k} \in B_2 \mid B_{2\min_i} < B_2 < B_{2\max_i}, i = \overline{1, k}\}$$

Целевая функция оптимизации долевого часового расхода топлива аварийным дизель-генератором

$$\varphi(B_3) = \min \varphi(B_{3k}), \quad (4.86)$$

$$B_3 = \{B_{3k} \in B_3 \mid B_{3\min_i} < B_3 < B_{3\max_i}, i = \overline{1, k}\}$$

Целевая функция оптимизации долевого удельного расхода топлива главным двигателем в ходовом режиме

$$\varphi(b_1) = \min \varphi(b_{1k}), \quad (4.87)$$

$$b_1 = \{b_{1k} \in b_1 \mid b_{1\min_i} < b_1 < b_{1\max_i}, i = \overline{1, k}\}$$

В целях нахождения минимума целевой функции с приемлемой точностью осуществлено масштабирование ее показателей качества.

В табл. 4.5.4.6 приведены показатели качества оптимизируемой ДЭУ в ходовом режиме работы, а также их численные значения с учетом наложенных ограничений.

Для оптимизации энергозатрат ДЭУ разработаны алгоритмы, реализуемые в программе IOSO. В платформе IOSO реализована возможность «парсинга» (разбора) значений во входных и выходных файлах моделей, что обеспечивает создание взаимосвязи моделей по параметрам, не используя дополнительных процедур трансфера и преобразования форматов. В результате решения задачи оптимизации

определяется множество альтернативных решений, соответствующих принципу оптимальности Парето и удовлетворяющих поставленным ограничениям.

Таблица 4.5. Показатели качества ДЭУ

Название устройства	Кол-во, шт	Мощность, кВт	Долевой часовой расход топлива, кг/с	Теплота сгорания топлива, кДж / кг	Долевой удельный расход топлива, кг/кВт ч
Главный двигатель	1	3850,00	2,50	41200,00	0,02
Вспомогательный дизель-генератор	1 или 2	400,00	0,33	4200,00	---
Аварийный дизель-генератор	1	350,00	0,08	4200,00	---
Валогенератор	1	400,00	0,08	4200,00	---

Таблица 4.6. Диапазоны численных значений показателей качества ДЭУ

Показатель качества	Ограничения	
	мин	макс
P_1	20000	38500
P_2	2000	4000
P_3	1500	3500
P_4	2000	4000
B_1	15000	25000
B_2	2000	3300
B_3	500	830
b_1	500	830

При настройке проекта в IOSO осуществляется интеграция всех необходимых программных модулей в единый расчетный блок. На этом

этапе задаются: особенности запуска программных модулей; входные, выходные и передаваемые файлы; осуществляется настройка входных, выходных параметров, а также задание их диапазонов. При проведении моделирования было выполнено 1020 итераций. В результате использования алгоритма оптимизации IOSO удалось получить Парето-оптимальные решения, отличающиеся высокой точностью.

На рис.4.43 приведены Парето-оптимальные решения задачи оптимизации, определяющие множество альтернативных решений для ДЭУ в целом. В результате оптимизации целевой функции в IOSO удалось получить оптимальные решения задачи повышения эффективности эксплуатации СТС при минимизации энергозатрат.



Рис. 4.43. Интерфейс параметрической оптимизации ДЭУ

При постановке и решении задачи оптимизации технологических параметров СТС определен набор независимых параметров, условий, определяющих допустимые их значения, получена целевая функция и выбран метод решения оптимизационной задачи на базе системного подхода. Модели многокритериальной и многопараметрической оптимизации технологических параметров СТС могут быть использованы для предоставления информации об ожидаемых энергетических затратах.

4.5. Информатизация прогнозирования риска отказов сложных технических систем

Для оценки и прогнозирования значения вероятности и риска отказов функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и их элементов СТС по априорным и апостериорным данным, а также поддержки принятия решений при поиске дефектов в отказавших элементах системы разработана модель, основанная на динамических байесовских сетях доверия (ДБСД) [21, 22].

Использование ДБСД позволяет с большой точностью определять элементы СТС наиболее приближенные к критическому состоянию и выходу их из строя. Поставленная задача решается использованием постоянной системы опроса всех элементов системы на различных ее уровнях за конкретный период времени. Это позволяет с помощью ДБСД моделировать аварийные ситуации и определять критические значения риска отказов элементов СТС. Появляется возможность устанавливать период времени, связанного с разработанным алгоритмом опроса элементов системы, за который проводятся динамические оценки и прогнозирование значения вероятности отказа, риска СТС. Построение и исследование ДБСД проведено с использованием программного продукта GiNe [129]. Применение среды GiNe позволяет осуществить динамическую диагностику каждого элемента ДБСД, Произвести регрессионный анализ влияния каждого родительского элемента сети на ее соответствующий дочерний элемент. Осуществить графическое отображение результатов прогностического анализа поведения групп элементов СТС. Произвести расчеты значения вероятности и риска отказа, а также наступления критического состояния для функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и их элементов СТС. Появляется возможность устанавливать период времени, связанного с разработанным алгоритмом опроса элементов системы, за который проводятся динамические оценки и прогнозирование значения вероятности и риска отказа СТС. Построение и исследование ДБСД проведено с использованием программного продукта GiNe [129]. В качестве примера при разработке и исследовании моделей оценки риска отказов по текущей информации о вероятностях отказов функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и элементов в СТС выбрана СЭУ. Структура ДБСД СЭУ представлена на рис. 4.44. Используемые условные обозначения на рис.4.44 приведены в табл.4.7. Структура ДБСД СЭУ это многоуровневая система расположения элементов, состоящая из 14 элементов системы, 7 уровней с добавлением промежуточных узлов P1 и P2, обеспечивающих реализацию многоуровневой структуры сети. Для элементов структуры ДБСД СЭУ верхнего уровня задаются условные вероятности отказа с учетом влияния элементов системы низкого иерархического уровня на элементы высокого иерархического уровня.

Целевая функция оценки работоспособности элементов СЭУ посредством ДБСД имеет вид

$$F(P_b) = \{G, M\}, \quad (4.88)$$

где G – ациклический направленный граф сети;

M – множество элементов СЭУ, составляющих сеть.

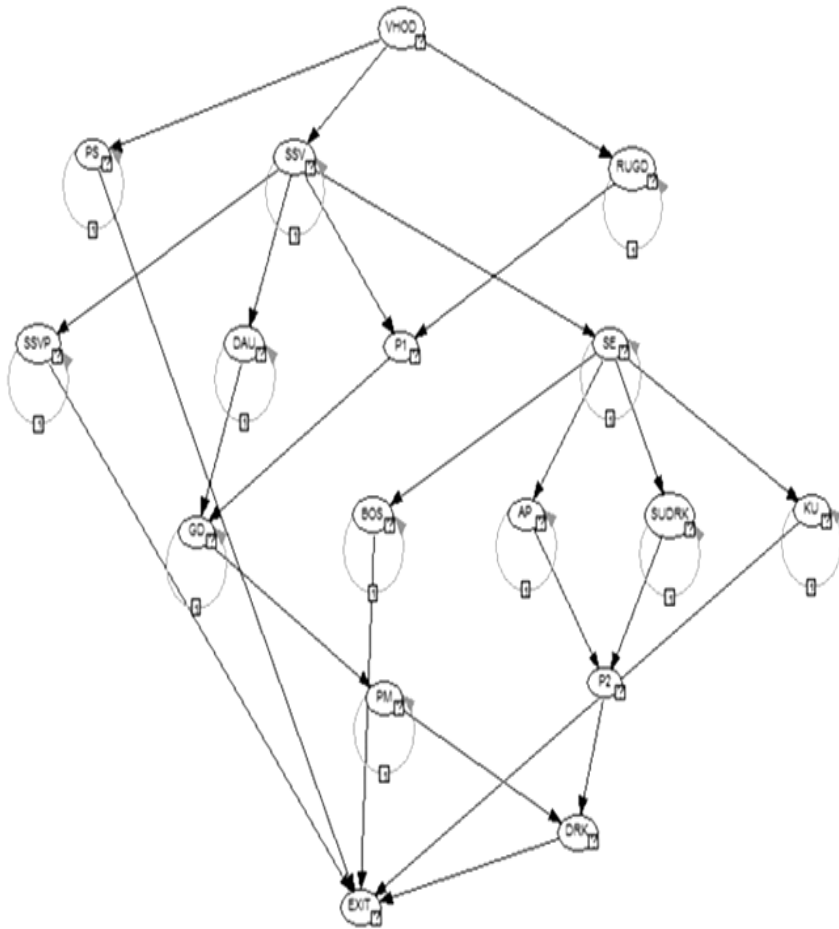


Рис.4.44.1 Структура ДБСД СЭУ

Вершинами графа являются функционально-взаимосвязанные и взаимодействующие элементы СЭУ, которые с учетом иерархии сети и в соответствии с [67,70] определяются

$$v = \{v_i^j | \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}, \quad (4.89)$$

где v – наименование элемента СЭУ;

i – номер блока в сети;

n – число блоков в сети;

j – номер уровня в сети;

m – число уровней в сети.

Таблица 4.7. Условные обозначения элементов СЭУ в ДБСД

Наименование элемента	Условное обозначение
Входной элемент	ВХОД, VHOD
Ручное управление главным двигателем	РУГД, RUGD
Система сжатого воздуха	ССВ, SSV
Система управления движительно-рулевым комплексом (ДРК)	СУДРК, SUDRK
Котельная установка	КУ, KU
Судовая электростанция	СЭ, SE
Противопожарная система	ПС, PS
Главный двигатель	ГД, GD
Система дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) главного двигателя	ДАУ, DAU
Балластно-осушительная система	БОС, BOS
Передача мощности от главного двигателя к движителю	ПМ, PM
Аварийный привод ДРК	АП, AP
Движительно-рулевой комплекс	ДРК, DRK
Система санитарной водоподготовки	ССВП, CCVP
Входной элемент	ВХОД, VHOD
Ручное управление главным двигателем	РУГД, RUGD
Система сжатого воздуха	ССВ, SSV
Система управления движительно-рулевым комплексом (ДРК)	СУДРК, SUDRK
Котельная установка	КУ, KU
Судовая электростанция	СЭ, SE
Противопожарная система	ПС, PS
Главный двигатель	ГД, GD
Система дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) главного двигателя	ДАУ, DAU
Балластно-осушительная система	БОС, BOS
Передача мощности от главного двигателя к движителю	ПМ, PM
Аварийный привод ДРК	АП, AP
Движительно-рулевой комплекс	ДРК, DRK
Система санитарной водоподготовки	ССВП, CCVP

Вероятности отказа при прогнозировании надежности (работоспособности) элементов СЭУ изменяются в соответствии с экспоненциальным законом распределения и использованием

логистической регрессии, способствующей предсказанию вероятности возникновения некоторого события по значениям множества признаков. Для этого вводится зависимая переменная, принимающая лишь одно из двух значений. Как правило, это числа 0 (событие не произошло) и 1 (событие произошло), и множество независимых переменных (также называемых признаками, предикторами или регрессорами), на основе значений которых вычисляется вероятность принятия того или иного значения зависимой переменной. При моделировании ДБСД СЭУ (рис.4.44) для различных значений вероятности (риска) отказа входного элемента определены значения вероятности (риска) отказа функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и их элементов за 20000 часов эксплуатации СЭУ (рис.4.45,4.46).

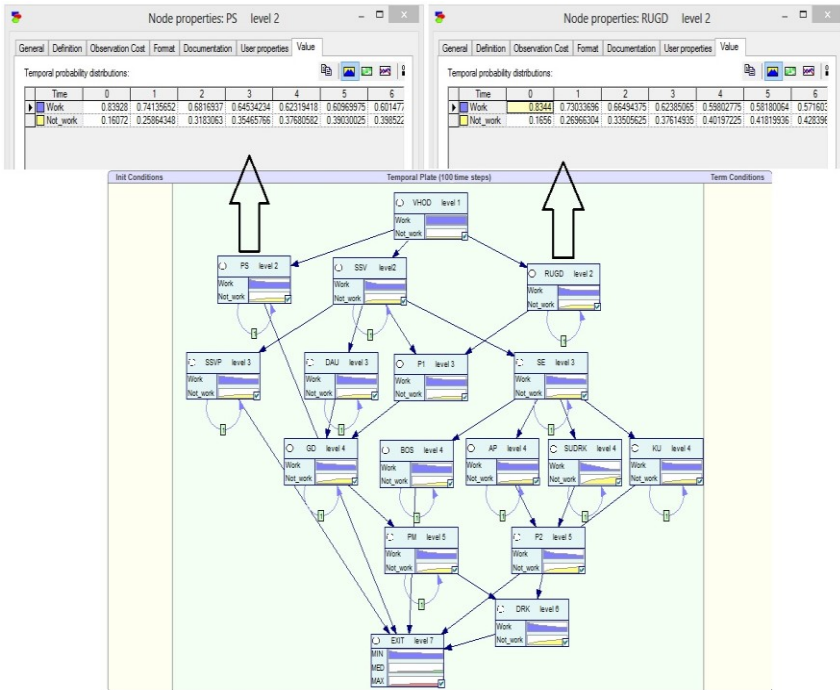


Рис.4.44.2 Динамическая байесовская сеть доверия СЭУ в среде GeNIe при риске отказа входного элемента 0.2

Из результатов проведенных исследований следует, что при росте риска отказа входного элемента от 0.09 к 0.2 растут значения рисков отказа всех дочерних, нижестоящих элементов ДБСД СЭУ в

соответствии с данными, приведенными в табл.4.8. Из полученных результатов оценки вероятности и риска отказов функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и их элементов СЭУ определено время их отказа (табл. 4.9). Целевым назначением применения ДБСД при оценках, как вероятности отказа, так риска отказа является апостериорный вывод. Он заключается в том, что при поступлении новой информации об отказах приравниваются к нулю несовместимые со свидетельством априорная вероятность (риск) отказа.

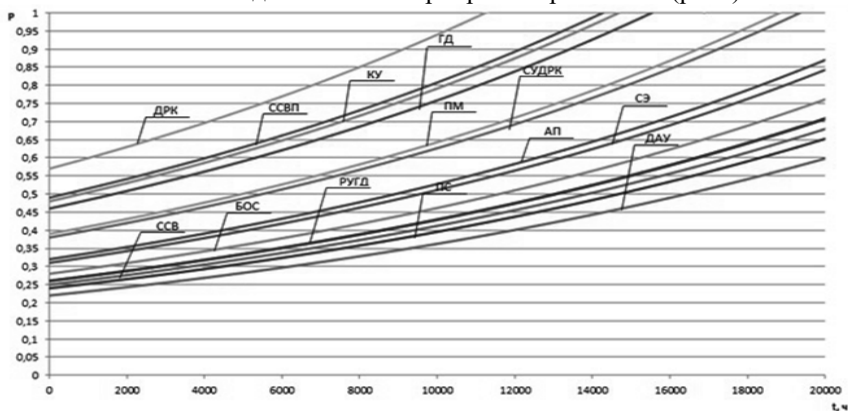


Рис.4.45. Вероятность отказа элементов СЭУ при вероятности отказа на входе системы 0,2

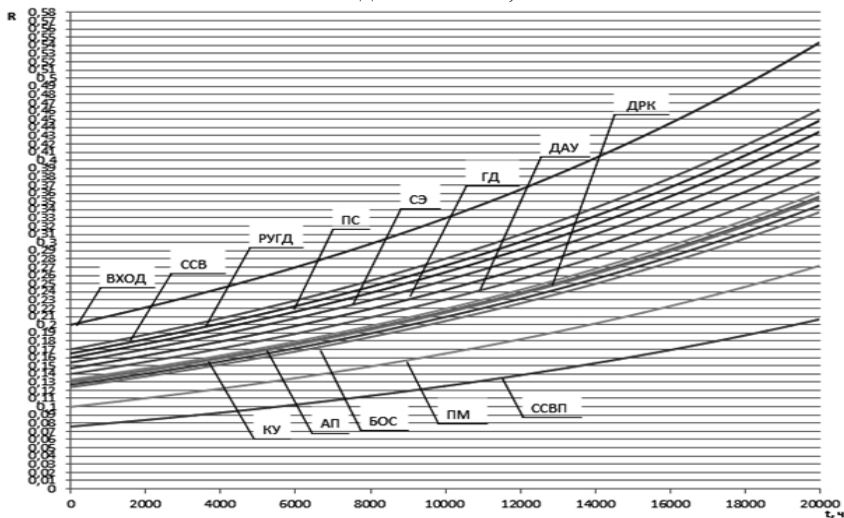


Рис.4.46. Риск отказа элементов СЭУ при риске отказа на входе системы 0,2

Таблица 4.8. Значения рисков отказа дочерних элементов ДБСД СЭУ

№	Наименование элемента	Риск отказа на входном элементе 0,09	Риск отказа на входном элементе 0,2
1	ПС	0,07	0,16
2	ССВ	0,08	0,17
3	РУГД	0,07	0,16
4	ССВ	0,07	0,14
5	ДАУ	0,07	0,13
6	СЭ	0,08	0,15
7	ГД	0,08	0,14
8	БОС	0,07	0,12
9	АП	0,07	0,12
10	СУДРК	0,07	0,13
11	КУ	0,07	0,13
12	ПМ	0,06	0,1
13	ДРК	0,08	0,13

Таблица 4.9. Время отказа элементов СЭУ

Элемент отказа	Время отказа, ч
ДРК	10898
ССВП	14270
КУ	14683
ГД	15534
СУДРК	19355

Затем нормируются оставшиеся вероятности (риски) отказа с учетом априорных вероятностей (рисков) для того, чтобы они их сумма равнялась единице [130]. Т.е. априорные данные динамически пересчитываются и формируют апостериорную оценку вероятности (риска), которая является априорной информацией, для обработки новой информации. Апостериорный вывод основан на процедурах анализа данных, получаемых вследствие использования ДБСД. При реализации такого подхода в исследованиях, моделированием по априорным и апостериорным данным определены подсистемы СЭУ, наибольшим образом влияющих на работоспособность всей системы за различные промежутки времени. Установлено, что к таким подсистемам относятся: ССВ, СУДРК, КУ, СЭ, ГД, ПМ, ДРК, для которых некоторые результаты исследований приведены на рис.4.47, 4.48. Использование результатов исследований разработанных моделей в целях ретроспективного анализа

аварийных ситуаций на СТС позволяет решить задачу определения их причин. Особую актуально это, когда анализ аварии, выявление ее первопричины и принятие соответствующих мер позволяет исключить или уменьшить вероятность повторения неблагоприятных событий, а значит, выполнить поставленную задачу, повысить надежность эксплуатации функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и их элементов структурно СТС.

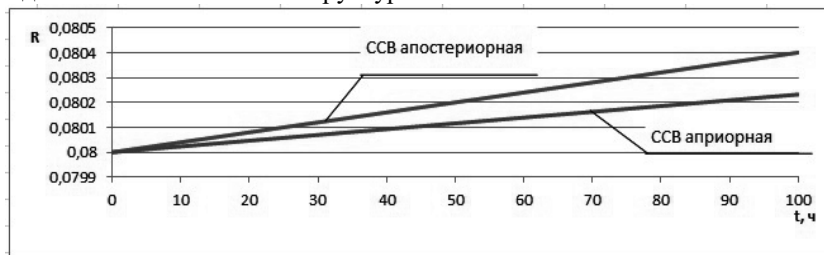


Рис.4.47. Априорная и апостериорная оценки риска отказа ССВ СЭУ при поступлении информации об отказах

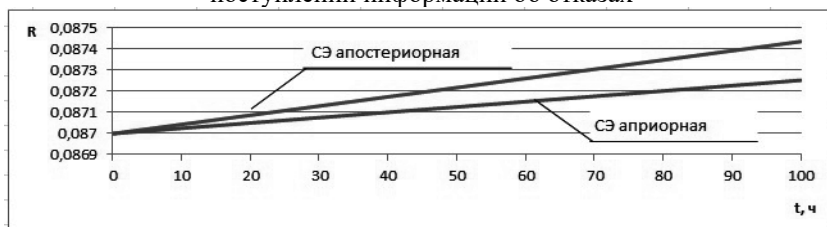


Рис.4.48. Априорная и апостериорная оценки риска отказа СЭ СЭУ при поступлении информации об отказах

Процедура построения сценария поведения СТС при развитии аварии является итерационным процессом. В соответствии с предлагаемым методом последовательность количественной оценки и прогнозирования риска отказов ФВВП СТС включает этапы: определение ФВВП СТС в иерархии и топологии систем с учетом используемого ресурса ЭВИ; оценки риска отказов элементов систем от пораженных компонентов систем; прогнозирование риска отказов элементов систем от пораженных компонентов СТС; поддержка принятия решений (ППР) при поиске причин отказов элементов СТС. В основу метода оценки и прогнозирования технического состояния ФВВП СТС положена технология КИМ оценки риска отказов систем в сочетании с нечетким моделированием, позволяющая реализовать формализованное описание состояния оборудования с учетом эволюции систем во времени.

Когнитивная модель представлена в виде функционального графа

$$\Phi_n \langle G, X, F, Q \rangle, \quad (4.90)$$

где $G = \langle V, E \rangle$, G -знаковый орграф: $V = \{v_i\}$, $i=1,2,\dots,k$ - множество вершин когнитивной карты; $E = \{e_{ij}\}$ - множество дуг, соединяющих вершины v_i и v_j ;

$X = \{x_i\}$ - множество параметров вершин;

$F = f\{v_i, v_j, e_{ij}\}$ - функция связи между вершинами;

Q - пространство параметров вершин.

При разработке когнитивной модели (4.90) часть ее построена по статистическим данным об объекте, другая часть – на основании обработки экспертных и теоретических данных. Этапы КИМ включают: исследование причинно-следственных связей (путей и циклов когнитивной модели) ФВВП СТС с учетом используемого ресурса ЭВИ; анализ структуры модели, отображающей механизм функционирования исследуемых СТС; исследование возможного развития процессов в системе путем импульсного моделирования; оценки вероятностей потерь работоспособности, ущербов и риска отказа СТС. При построении КИМ учитывается тип передаваемого ресурса ЭВИ от элемента-источника к элементу-приемнику. Для оценки вероятностей потерь работоспособности, ущерба и риска отказов элементов СТС в КИМ используются поражающие моделирующие импульсы для дискретных моментов времени [71]. В качестве объекта моделирования СЭУ.

Моделирование действия поражающих импульсов на систему производилось на базе дистрибутива операционной системы Debian GNU/Linux 8.0 (stable). Реализация основного алгоритма модели выполнена средствами высокоуровневого языка программирования Python, исходные данные моделей представлены в формате JSON, результаты - в виде протоколов в формате CSV и диаграмм на языке DOT системы graphviz. В качестве IDE использовался редактор Vim. Автоматизация работы системы осуществлялась на базе инструментов GNU make, визуализация - с помощью ПО graphviz. Форматы файлов представления данных (CSV/JSON) универсальные, платформу- и языконезависимыми, хорошо обрабатываются большинством программных средств сериализации данных и нетребовательны к вычислительным ресурсам и каналам передачи данных.

Сценарии прохождения диагностирующих импульсов по системе представляются, как в графическом виде, так и в виде CSV-сценариев (вместе с данными расчетов). При этом генерируется как отдельный файл протокола пошагового прохождения импульса, так и итоговый CSV-файл с общей сводкой протоколов и расчетом числовых характеристик рисков отказов для различных конфигураций системы. В CSV-файле указывается численное значение импульса в каждом из узлов в каждый из моментов

дискретного времени. Отдельно генерируются файлы с указанием рассчитанных характеристик по каждому из узлов СТС. Полученные CSV-файлы могут быть использованы как в аналитическом программном обеспечении (табличные редакторы - Libre Office, Excel Microsoft Office, более сложные системы визуализации - gnuplot, R, Seaborn), так и в системах поддержки принятия решений для автоматической обработки и оценивания рисков (например, для систем, использующих sklearn, Dataiku Data Science Studio, и других). Благодаря использованию сочетания форматов JSON/CSV/DOT система позволяет работать с конфигурацией и анализом СТС в двух плоскостях - визуальной и автоматической, а также в их комбинации. При визуальном методе на этапе создания модели системы файл конфигурации редактируется вручную. Предварительный анализ характеристик может контролироваться визуально - согласно диаграммам прохождения импульсов. Автоматические методы используют CSV-файлы для численного анализа характеристик системы, выработки и анализа решений.

В основу метода ППР при поиске причин отказов элементов ФВВП СТС положены критерии, определяемые нормативной документацией, экспертными оценками: максимальная вероятность потери работоспособности; минимальный ущерб от отказа элементов подсистем; максимальная оценка последствий возникновения риска отказов; максимальная длительность эксплуатации элементов подсистем СТС.

Для ППР по оценкам риска отказов ФВВП судовых СТС по априорным и апостериорным данным, а также при поиске отказавших элементов систем в целях повышения эффективности их эксплуатации предлагается метод, основанный на динамических байесовских сетях доверия (ДБСД) [22]. Задача решается использованием системы опроса всех элементов системы на различных ее уровнях за конкретный период времени. Построение и исследование ДБСД вероятности потери работоспособности, оценки риска отказов элементов ФВВП СТС осуществлено с использованием программного продукта GiNe [129].

Целевая функция оценки работоспособности элементов СТС и системы МДП посредством ДБСД имеет вид

$$F(P_b) = \{G, M\}, \quad (4.91)$$

где G – ациклический направленный граф сети;

M – множество элементов СЭУ, составляющих ДБСД.

Вершинами графа являются ФВВП СТС, которые с учетом иерархии сети определяются

$$v = \{v_i^j \mid \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}, \quad (4.92)$$

где v – наименование элемента СТС;

i – номер блока в сети;
 n – число блоков в сети;
 j – номер уровня в сети;
 m – число уровней в сети.

Структура исследуемой ДБСД масляной подсистемы СЭУ представлена на рис.4.49.

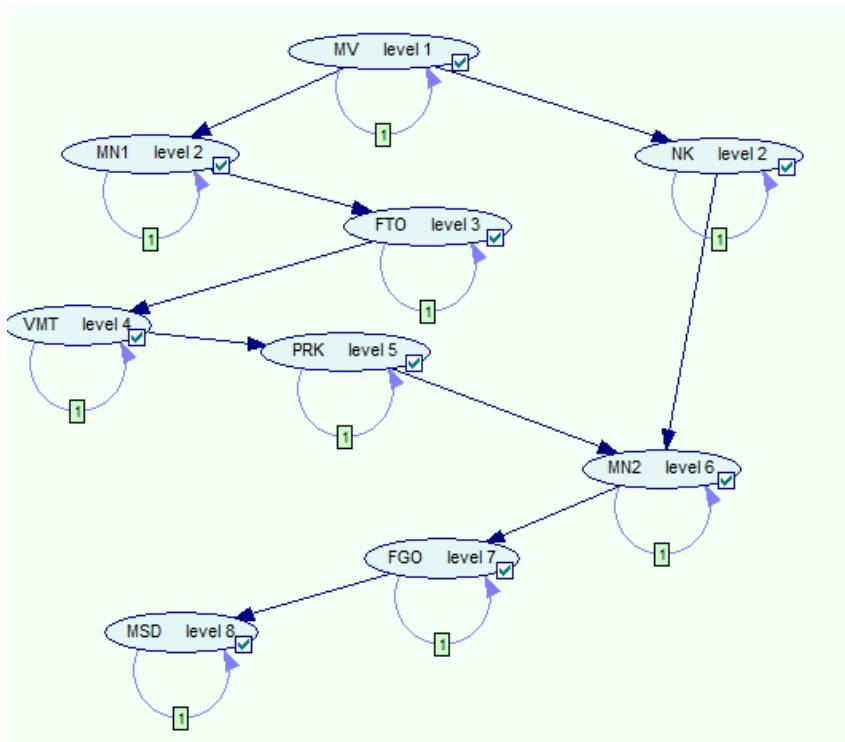


Рис.4.49. Структура ДБСД масляной подсистемы СЭУ (fto - фильтр тонкой очистки масла, mn1- первый насос масла. fgo-фильтр грубой очистки масла, mv- масляная ванна, vmt - водомасляный теплообменник. mn2 - второй насос масла, nk-невозвратный клапан, prk- предохранительный клапан, msd-масляная система дизеля).

Вероятности потери работоспособности при прогнозировании работоспособности элементов СЭУ изменяются в соответствии с экспоненциальным законом распределения с использованием логистической регрессии, способствующей предсказанию вероятности возникновения некоторого события по значениям множества признаков.

Реализация модели ППР осуществлена в соответствии с алгоритмом ППР по оценкам риска отказов таких подсистем и заключается в построении ДБСД СТС с использованием баз данных (рис.4.50): конструкторской и регламентной документации; экспертных оценок по поддержке принятия решений для типичных сценариев возникновения риска отказов; критериев по поддержке принятия решений; статистики диагностируемых данных по статическим и динамическим характеристикам элементов подсистем СТС.

При анализе данных для каждого сценария отказа формируется выборка требуемого набора данных. Полученные данные интерпретируются и обрабатываются в блоках приобретения знаний, ППР и управления правилами. Затем обновляются и модифицируются базы знаний, данных и правил. На основе обновленной информации происходит анализ рекомендуемых решений и осуществляется выбор предпочтительных альтернатив из общего набора решений, после чего принимается решение по устранению причин отказов.

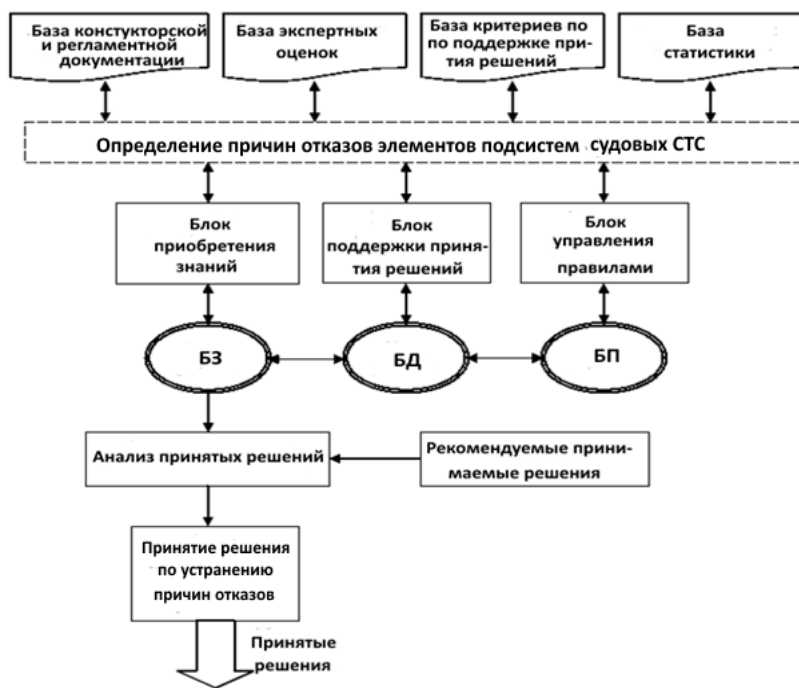


Рис. 4.50. Структурная схема ППР при поиске причин отказов по оценке риска отказов СТС

Для выявления возможной причины выхода из строя масляной подсистемы СЭУ проведены исследования в соответствии со схемой поиска отказа ее работы, приведенной на рис. 4.51.

В предположении, что неисправность F_i имеет вероятность появления p_i и показатель критичности S_i , эффективность диагностирования DSE можно определить по формуле [132]

$$DSE = \frac{\sum_{D_F} S_i p_i}{\sum_F S_i p_i}, \quad (4.93)$$

где F - множество возможных неисправностей, полученное в результате анализа видов и последствий отказов;

D_F - множество диагностируемых неисправностей (подмножество F);

$\sum_{D_F} S_i p_i$ - сумма подмножеств произведений показателей критичности и вероятности отказа элементов СЭУ;

$\sum_F S_i p_i$ - сумма произведений показателей критичности и вероятности отказа множества элементов масляной подсистемы СЭУ.

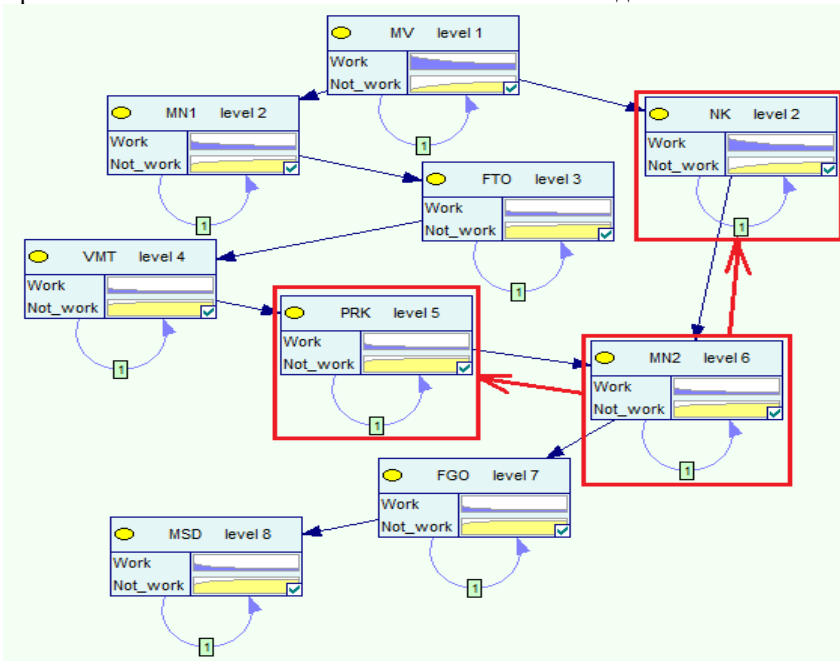


Рис. 4.51. Схема поиска причины отказа масляной подсистемы

Показатель критичности S_i -й неисправности рассчитывают по формуле

$$S_i = FR \cdot CF \cdot SF \cdot SDF, \quad (4.94)$$

где FR - частота отказов (число отказов в час);

CF - стоимостной коэффициент, принимающий целочисленные значения в диапазоне от 1 до 3 (низкий, средний, высокий) и определяемый затратами на требуемое техническое обслуживание, потерями от возможного простоя;

SF - коэффициент опасности, принимающий целочисленные значения в диапазоне от 1 до 3 (низкий, средний, высокий);

SDF - коэффициент вторичных повреждений, принимающий целочисленные значения в диапазоне от 1 до 3.

Для упрощения математического описания обобщенная модель СЭУ разработана на уровне подсистем СЭУ, механизмов и устройств. При необходимости детального исследования модели СЭУ модель может дополняться отдельными моделями (орграфами) подсистем СЭУ. В этом случае сохраняется разработанный принцип моделирования.

Ранжирование результатов исследований оценок риска отказов для вершин орграфа КИМ масляной подсистемы СЭУ на рис.4.52.

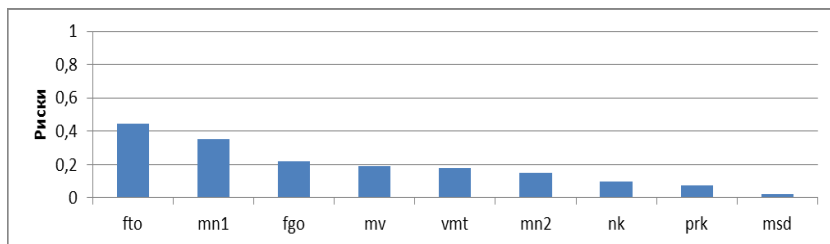


Рис.4.52. Ранжирование результатов оценки риска отказов масляной подсистемы СЭУ (fto - фильтр тонкой очистки масла, mn1- первый насос масла, fgo-фильтр грубой очистки масла, mv- масляная ванна, vmt - водомасляный теплообменник, mn2 - второй насос масла, nk- невозвратный клапан, prk- предохранительный клапан msd-масляная система дизеля)

Оценка риска отказов подсистемы проводилась для двух массивов значений с наибольшей вероятностью выходов из строя. Из результатов расчетов структурных повреждений элементов подсистемы следует, что наиболее уязвимым элементом подсистемы СЭУ является фильтр тонкой очистки масла (риск отказа- 0,44). К менее уязвимому элементу СЭУ относится масляная система дизеля (0,02).

При моделировании ДБСД СЭУ для различных значений вероятности (риска) отказа входного элемента определены значения риска отказов функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих элементов масляной подсистемы за 20000 часов эксплуатации СЭУ (рис. 4.53). Из результатов проведенных исследований следует, что при росте риска отказа входного элемента подсистемы от 0.09 до 0.2 растут значения риска отказов всех дочерних элементов ДБСД СЭУ. Целевым назначением применения ДБСД при оценках, как вероятности потери работоспособности, так риска отказов элементов подсистем СТС является апостериорный вывод, основанный на процедурах анализа данных, получаемых вследствие использования ДБСД. Моделированием по априорным и апостериорным данным определены элементы масляной подсистемы СЭУ наиболее влияющие на работоспособность дизеля и работу всей системы. Установлено, что к такому элементу относится предохранительный клапан (рис.4.54).

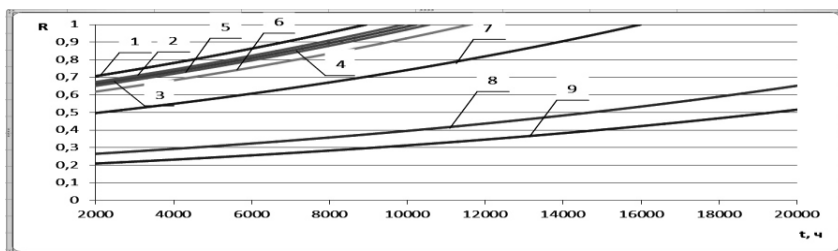


Рис.4.53. Риск отказа элементов масляной подсистемы при риске отказа элемента на входе системы 0,26 (1 - водомасляный теплообменник, 2 - фильтр тонкой очистки масла, 3-фильтр грубой очистки масла, 4- предохранительный клапан, 5 - второй насос масла, 6 -масляная система дизеля, 7-первый масляный насос, 8-невозвратный клапан, 9-масляная ванна)

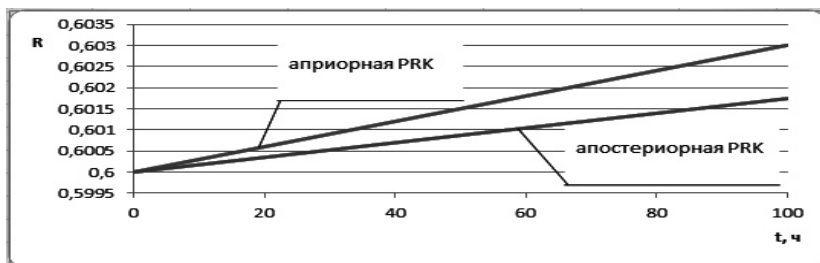


Рис.4.54. Априорная и апостериорная оценки риска отказа предохранительного клапана масляной подсистемы при поступлении информации об отказах

Если по истечении 20000 час. эксплуатации подсистема MN2 находится в работоспособном состоянии, тогда проводится исследование на работоспособность подсистем PRK, NK прямо взаимосвязанных с работоспособностью MN2, выход из строя которых может привести к отказу всей масляной подсистемы. После технического обслуживания подсистемы MN2, в ДБСД выполняется пересчет оценок риска отказов подсистем. Т.к. PRK непосредственно влияет на MN2 и имеет риск отказа (0,6). Следовательно, необходимо выполнить проверку этой подсистемы. Отказ PRK будет являться вероятностной причиной отказа подсистемы MN2. После технического обслуживания PRK обновленные данные по техническому состоянию подсистемы поступят в ДБСД, и произойдет пересчет оценок риска отказов подсистем. Если после технического обслуживания подсистем MN2 и PRK, а также пересчета оценки риска отказов для этих систем, то необходимо выполнить проверку подсистемы NK, значение отказа которой составляет (0,24). В дальнейшем выполняется поиск следующих подсистем в структуре схемы поиска причин отказов подсистем, оценки риска отказов которых максимальны. Осуществляется проверка подсистем и всех связанных с ними подсистем на других уровнях схемы ДБСД. На каждом этапе выполняемых действий данные в ДБСД обновляются.

Из результатов исследований следует, что наибольший рост суммарного уровня риска отказов подсистем и элементов СТС наблюдается при значениях вероятности потери работоспособности в диапазоне 0,455... 1. При значениях ущерба, например для СЭУ равного 0,234 и вероятности потери работоспособности равной 0,5, значение риска отказа составило 0,157.

Исследование имитационных и нечетких моделей оценки риска отказа при эксплуатации ФВВП судовых СТС показывает, что даже относительно небольшое количество рассматриваемых элементов подсистем порождают многочисленные возможные сценарии и варианты развития экстремальной ситуации при поражении какого-либо из элементов. При дополнении моделей показателями реальной критичности и пространственной компоновки подсистем масштабы моделей возрастают в несколько раз. Укрупнение масштаба исследуемых подсистем приводит к дальнейшему увеличению состояний подсистем.

Выполненные исследования позволяют получить алгоритмическое и методическое обеспечение принятия обоснованных решений на этапе эксплуатации СЭУ с учетом влияния случайных воздействий. Используемый алгоритм поиска неисправностей в системе СЭУ обеспечивает: нахождения критических в техническом отношении подсистем на всех уровнях системы СЭУ, обслуживание которых необходимо выполнить незамедлительно; оптимизацию времени поиска неисправностей.

4.6. Применение кластерного анализа данных для выделения меры схожести факторов влияния на работоспособность сложных технических систем

Необходимость обеспечения средств оперативной обработки больших объемов данных нуждается в проектировании масштабируемых распределенных хранилищ данных, организующих оптимальную реляционную структуру хранения информации и осуществляющих поддержку возможностей многомерного интеллектуального анализа данных [90]. Решение подобных задач возможно путем разработки модуля кластерного анализа данных (КАД) с целью выявления скрытых закономерностей в больших объемах данных по факторам, оказывающим влияние на работоспособность СТС [133,134]. Современные технологии кластеризация осуществляют разбиение входных данных на отдельные группы, каждая из которых имеет определенные признаки [135]. Их использование наиболее эффективно в случаях необходимости выделения определенных правил, корреляции и тенденции в больших наборах данных, что является актуальным в рамках рассматриваемой нами задачи [136,137]. Задачами исследования являются: разработка концептуальной модели взаимодействия модулей СППР управления работоспособностью СТС с модулем КАД; разработка карты домена понятий проектируемого модуля КАД; разработка ER-модели базы данных для проведения КАД, применение иерархического метода КАД для выделения взаимосвязанности кластеров.

Для объединения функций получения и предобработки входных данных, идентификации неисправностей в системе, оценки сценариев снижения степени работоспособности СТС и формирования управляющих решений для предотвращения возникновения аварийных ситуаций необходимым является формирование централизованной и масштабируемой СППР. В предлагаемой концепции построения такой СППР (рис.4.55), наряду с блоками, реализующими приведенные выше функции, целесообразно размещение отдельного блока интеллектуального анализа данных (ИАД). Блок включает в свой состав следующие функциональные модули: КАД, многомерного анализа данных (OLAP) и обработки результатов в форме графической реализации с интерфейсом пользователя (EDV). Использование этих модулей позволяет обеспечить комплексный подход к формированию перечня альтернатив для лица принимающего решения по предотвращению отказов СТС. Во-первых, это достигается благодаря асинхронному созданию необходимых SQL-запросов в БД на выборку, вставку, обновление и удаление (SUID) данных КАД и OLAP-модулями. Во-вторых, полученные, посредством функционирования этих модулей, результаты ИАД формализуются и

сохраняются в базу знаний в виде отдельных продукционных правил и векторов кластеров.

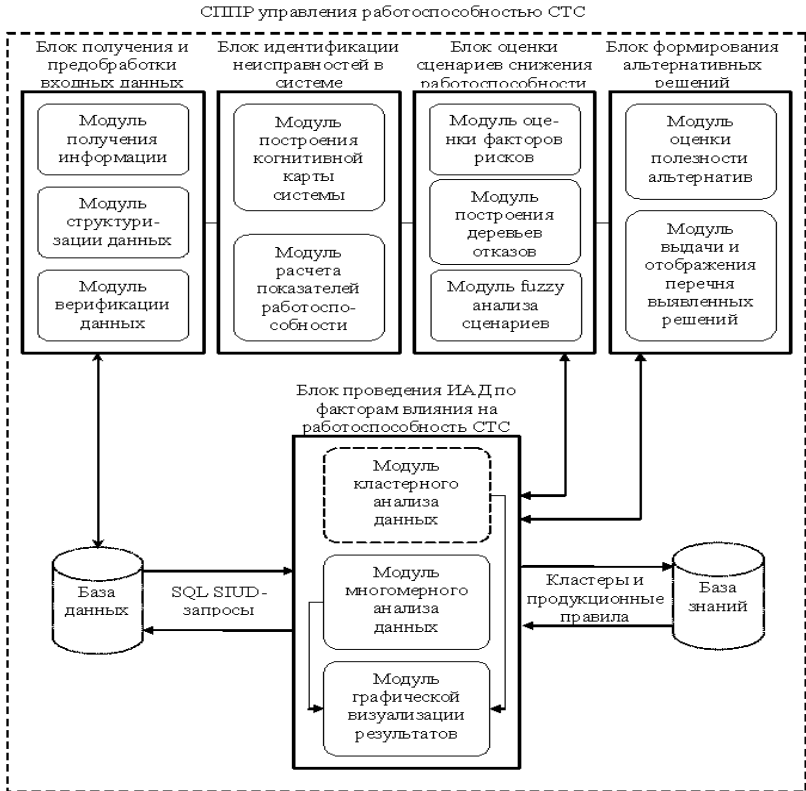


Рис.4.55. Схема взаимодействия блока подсистемы КАД в рамках СППР

Это может быть использовано в дальнейшем для расширения возможностей СППР или создания модуля экспертной системы или искусственной нейронной сети с целью автоматизации процесса кластеризации и формирования итоговых альтернатив. Каждый из модулей КАД, OLAP и EDV целесообразно реализовать в виде отдельного программного приложения, функционирующего в отдельном потоке для ускорения процесса обработки данных, посредством применения порождающего шаблона проектирования Factory. К факторам, оказывающим влияние на работоспособность СТС, согласно ряду источников [138,139], можно отнести следующие: структурный и функциональный ущербы, вероятность выхода компонента из строя, степень ремонтпригодности, количество проведенных ремонтов,

структурный и функциональный риск отказов, длительность эксплуатации, режим эксплуатации, степень износа, температура окружающей среды и воздействие внешних сил (неблагоприятное влияние климатических, природных или техногенных сил). В качестве объекта исследования СТС в данной статье рассмотрена судовая энергетическая установка и ее статистика отказов из оффшорных и открытых источников данных (OREDA, EMSA, SRIC). Для расширяемой структуры, а также с целью обеспечения целостности и унификации процесса хранения данных разработана ER-модель БД средствами свободной СУБД MySQL WorkBench (рис.4.56).

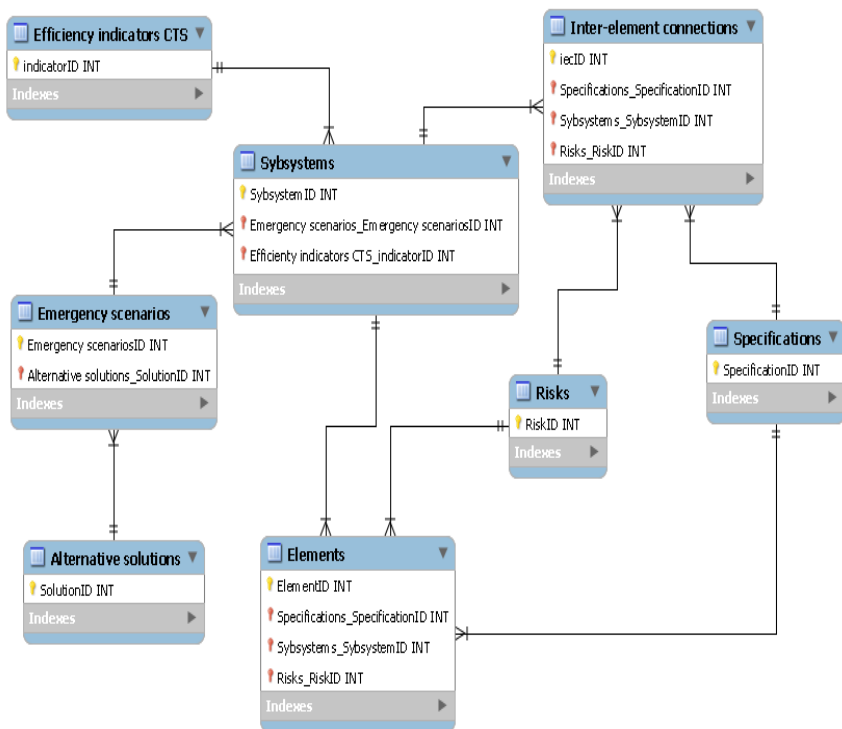


Рис.4.56. ER-диаграмма связей между сущностями разработанной БД

Предусмотрено наличие связей типа «один ко многим», посредством создания внешних ключей между таблицами хранения данных, по: факторам работоспособности СТС (Efficiency Indicators CTS); элементам (Elements); межэлементным связям (Inter-element connections); подсистемам СТС (Sybsystems); техническим характеристикам компонентов (Specifications); альтернативным вариантам решений

(Alternative solutions); аварийным сценариям развития (Emergency scenarios) и рискам (Risks). Для формализации процесса применения КАД для выделения мер схожести факторов, оказывающих влияние на степень работоспособности СТС, с помощью открытого облачного SaaS-сервиса mindmap.com разработана карта домена понятий, отображающая последовательность этапов кластеризации (рис.4.57).



Рис.4.57. Карта домена понятий по этапам реализации процессов функционирования модуля КАД

Сбор входных данных из статистических БД осуществляется отдельным программным приложением (парсером), формирующим процесс переноса данных в разработанную БД. Отбор и обработка данных с последующей формализацией выполняется средствами используемой СУБД. Далее проводится нормализация, осуществляемая на базе определения среднего значения (\bar{C}_3) и стандартного отклонения (CO) по всем признакам в отдельности.

Обозначим средние значения признаков как \bar{P}_i , а стандартные отклонения – как $S_i, i = 1, \dots, M$ (где M – количество признаков) для N - объектов по X -признакам. Таким образом, определение \bar{C}_3 и CO производится по формулам (4.95) и (4.96)

$$\bar{P}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij}, \quad (4.95)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (X_{ij} - \bar{P}_i)^2} \quad (4.96)$$

В качестве меры различия между анализируемыми объектами применяется евклидово расстояние. Его значение между некоторыми объектами X_j, X_k

$$D(X_j, X_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^M (X_{ij} - X_{ik})^2} \quad (4.97)$$

Для осуществления КАД использованы методы Nearest neighbor и Furthest neighbor, в которых дистанция между парой выделенных кластеров вычисляется на базе определения расстояний между наиболее близкими и наиболее далекими объектами выборки соответственно. Полученные, в результате проведения КАД дендрограммы выделения взаимосвязанности кластеров приведены на рис.4.58.

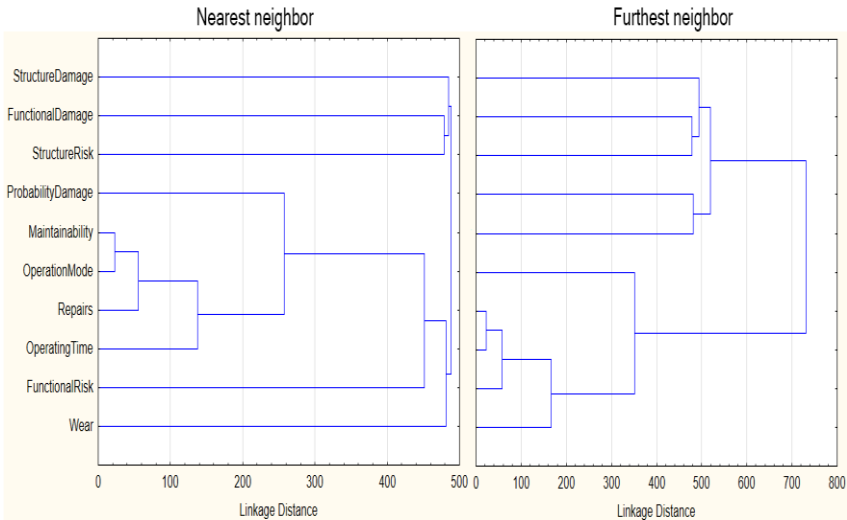


Рис.4.58. Созданные дендрограммы выделения взаимосвязанности кластеров

Оценка адекватности результатов осуществлена путем определения внешних, внутренних и относительных метрик оценки качества кластеризации. Используются методы Rand statistic, Hubert statistics и индекс Дана. Полученные результаты оценки адекватности позволяют утверждать, что ошибка кластеризации находится в допустимых

пределах, однако лучшие значения метрик получено для метода Furthest neighbor. Анализируя процесс КАД можно отметить, что метод Nearest neighbor ориентируется на минимизацию числа больших по размеру кластеров, а метод Furthest neighbor направлен на увеличение числа компактных (меньших по размеру) кластеров.

Экспериментально установлено, что факторы функционального ущерба, структурного риска, вероятности выхода из строя, степени работоспособности и структурного ущерба обладают высокой степенью схожести и объединяются в один кластер через 4 итерации. Ко второму кластеру относятся факторы режима эксплуатации, количества ремонтов, времени эксплуатации, износа и функционального риска, которые также формируются в один кластер через 4 итерации. Дальнейшим развитием предложенной концепции КАД может быть уточнение принадлежности ряда объектов к нескольким кластерам путем использования нейронечеткой кластеризации.

4.7. Мобильное приложение для мониторинга, диагностики и прогнозирования риска отказов компонентов сложной технической системы

Поддерживаемая функциональность платформы Android позволяет разрабатывать мобильные приложения для удаленного мониторинга и прогнозирования риска отказов элементов СТС [140,141]. Выбор системы управления базами данных (СУБД) для разработки и внедрения базы данных эффективно взаимодействующей с мобильным клиентским приложением усложняется из-за обилия на рынке доступных решений. СУБД SQLite - встроенная поддержка файлового сервера ОС Android является преимуществом в случае полностью автономного режима. Операции мобильного приложения связаны с необходимостью постоянного подключения к удаленному внешнему серверу. Использование СУБД приемлемо из-за интеграции стандартных инструментов и поддержки ее библиотеки, что позволяет увеличить скорость и эффективность работы мобильного приложения. В долгосрочной перспективе при разработке проекта на основе новых списков требований для соответствующей масштабируемости может быть выбрана СУБД NoSQL.

Для решения поставленной задачи разработаны таблицы базы данных: элементы, межэлементные коммуникационные подсистемы, системы, датчики, параметры, вероятность отказов компонентов СТС, ущерб, параметры прогноза, список журналов. Типы данных, используемых в базе данных - в основном целые действительные числа, прописные и регистрационные данные в таблице. На основе

разработанной ER-модели может быть реализована конкретная физическая модель базы данных в MySQL Workbench или SQL Navigator.

Проектирование сценариев использования приложения может быть обеспечено диаграммой вариантов использования мобильных приложений (рис. 4.59). Были выбраны функции приложений: просмотр информации о повреждениях компонентов ТС; оценки вероятности сбоя, структурных и функциональных рисков; поиск информации в базе данных по имени или уникальному номеру объекта; локального хранилища и отправки сгенерированного отчета в формате pdf; построение когнитивной имитационной модели (КИМ); изменение настроек пользовательского интерфейса; просмотр результатов прогноза состояния компонентов ТС; включение и отключение модулей мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния компонентов ТС; ведение журнала и переход в экономичный режим, уменьшающий энергопотребление батареи мобильного устройства, а также обеспечивающий дополнительное сжатие данных, отправленных на сервер. Для формализации класса и объектных моделей мобильного приложения разработана диаграмма классов проекта, а также указаны отношения между классами и их экземплярами (рис. 4.60).

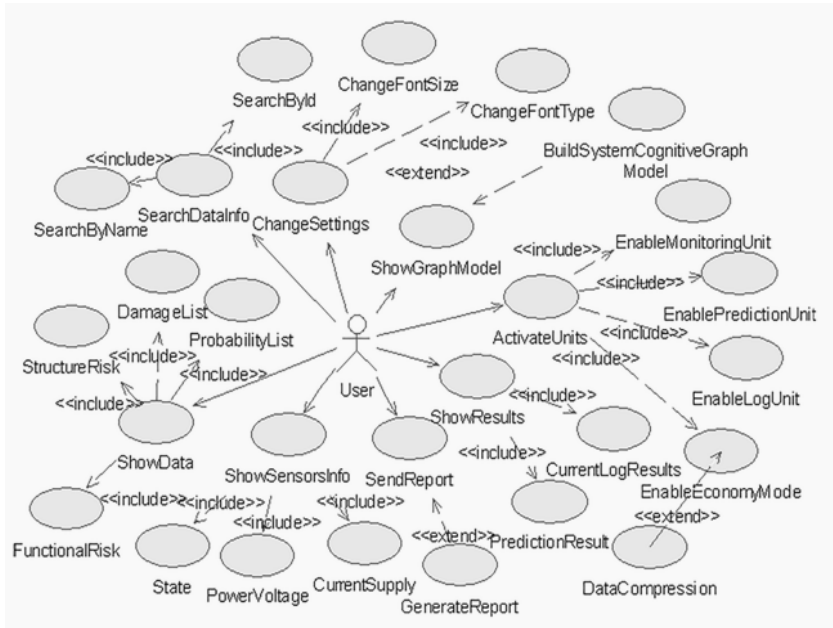


Рис. 4.59. Диаграмма вариантов использования мобильных приложений

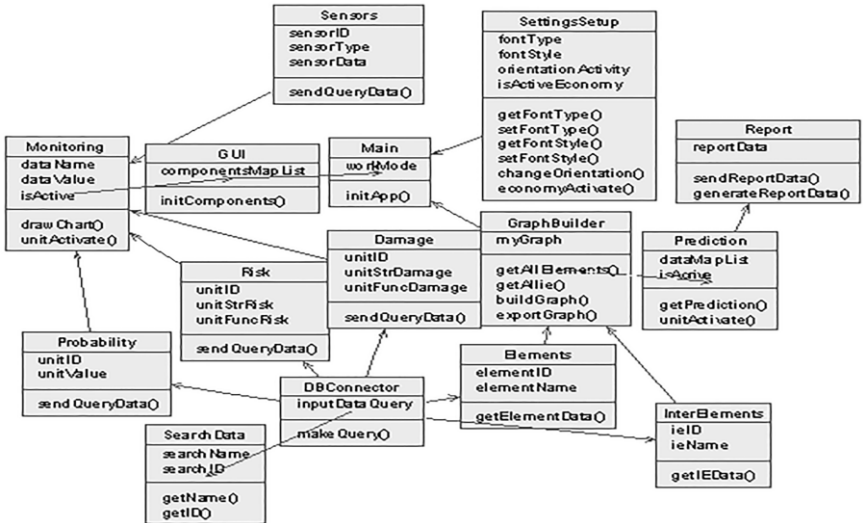


Рис. 4.60. Фрагмент диаграммы класса мобильного приложения

Запуск приложения выполняется в отдельном потоке с помощью метода `initApp` Main class. Процедура авторизации выполняется в классе приложений `Autoriz` и создает графическую активность пользователя с полями входа и пароля. Каждый класс реализует: мониторинг, диагностика, прогнозирование; построение графика КИМ; поиск и просмотр информации с датчиков контролируемых параметров СТС; определения вероятности отказов компонентов СТС, риска и ущерба. Для более подробного описания мобильного приложения была разработана диаграмма его деятельности (рис. 4.61).

Объекты на диаграмме: клиент-мобильное приложение; внешний сервер, синхронизирующий, обрабатывающий и проверяющий статистические данные о работе компонентов СТС; сервер управления - выполняет задачи хранения, обработки, резервирования и обмена данными с внешним сервером и системой сбора данных; система сбора данных - выполняет функции сбора данных непосредственно с датчиков, расположенных на отдельных компонентах СТС, и передает информацию на сервер управления СТС. Для проверки активности сервера и возможности установления соединения между сервером и клиентом используется мобильное приложение. Оно отправляет пакет запросов для проверки основных активных обновлений в репозиториях, результатов проверки данных авторизации, а также получает техническую и статистическую информацию о работе СТС.

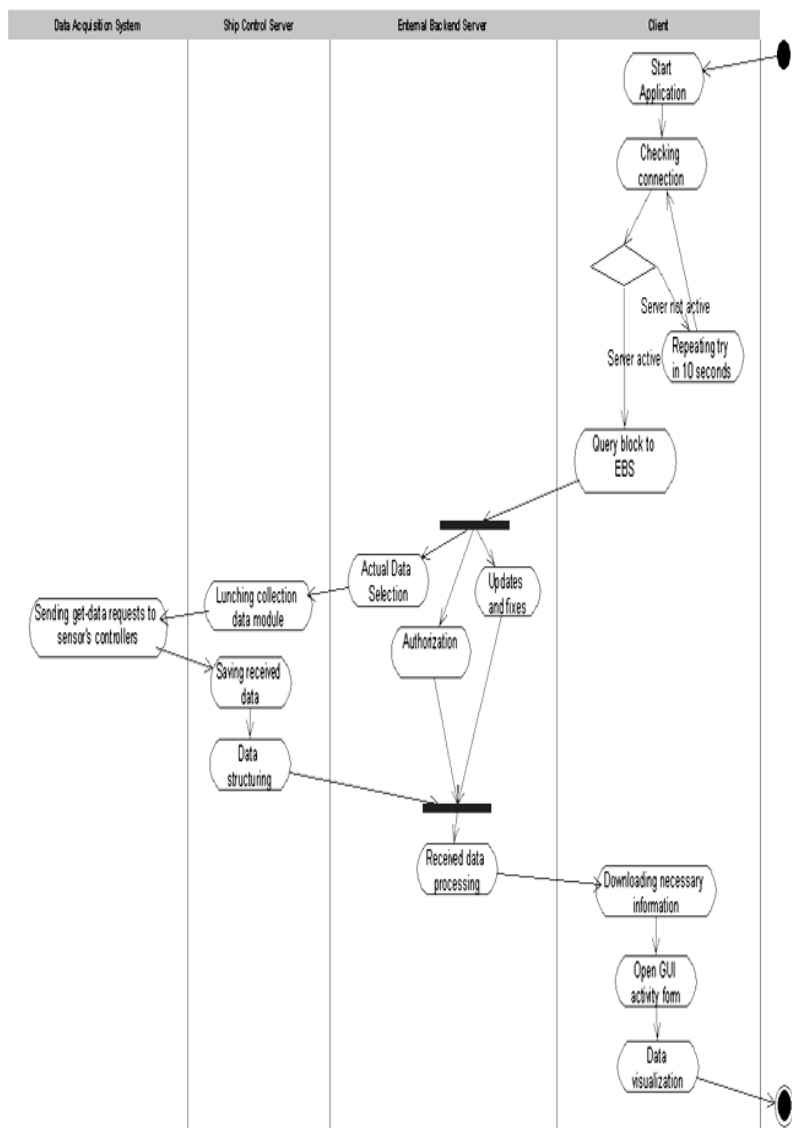


Рис. 4.61. Диаграмма активности мобильного приложения
 Для реализации интерфейса прототипа и написания программной
 кодовой реализации, формализованной через UML-функциональность
 разработан алгоритм работы мобильного приложения (рис. 4.62).

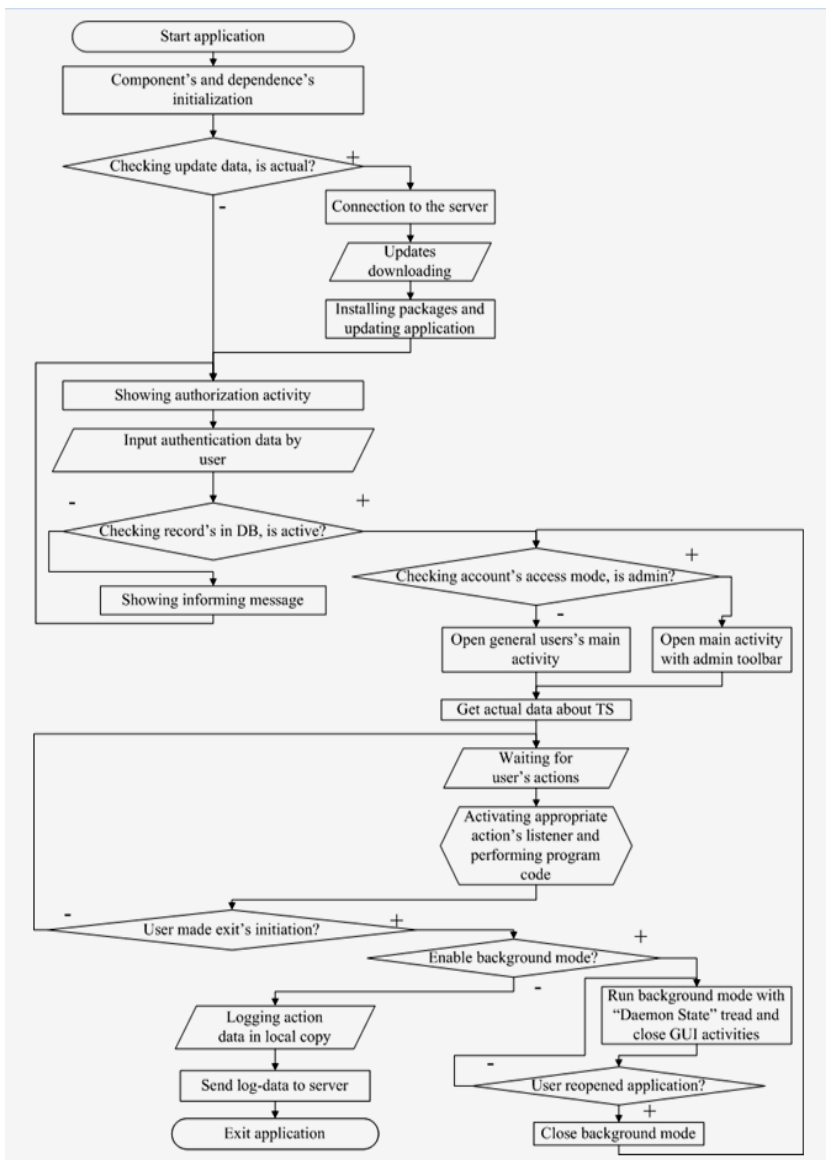


Рис. 4.62. Алгоритм мобильного приложения

Пакет установки приложения загружается на мобильное устройство в формате *.apk. В результате выполняется инициализация всех компонентов и зависимостей программных приложений, включая

проверки подключения к точкам беспроводного доступа в Интернет с помощью поддерживаемых технологий (с использованием пакета android.net) и действия удаленного сервера. Затем осуществляется процесс визуализации компонента отражения обновления данных на сервер. В случае реализации такой процедуры новый процесс начинает установку необходимых пакетов и обновление приложений в фоновом режиме. Пользователь применяет интерфейс входа в систему, введя имя пользователя и пароль. Осуществляется получение технической и статистической информации о компонентах системы. После этого приложение переходит в основную форму, в режим ожидания и режим пользовательских запросов, в соответствии с которым осуществляется выполнение программного кода, содержащегося в соответствующем обработчике событий. При закрытии приложения появляется визуализация дополнительного диалогового окна, в котором предлагается переносить работу мобильных приложений в фоновом режиме. Если пользователь выбирает запуск приложения в фоновом режиме в отдельном процессе и потоке, тогда действие GUI выгружается из оперативной памяти мобильного устройства. Если снова запускается приложение, которое в этой точке уже находится в фоновом режиме, тогда режим закрывается, и управление передается для проверки доступа к режиму приложения. Когда пользователь инициирует окончательное закрытие приложения в фоновом режиме, происходит ведение журнала всех действий, выполняемых в локальной копии рабочего каталога мобильного приложения. Если установлено соединение с сервером, то выполняется отправка данных на сервер. После этого происходит полная разрядка приложения из основной памяти используемого мобильного устройства. Объем данных мобильных приложений, хранящихся в соответствующем каталоге «Cache», не должен превышать 2,5 мегабайта. В противном случае произойдет процедура кэширования.

Разработанное мобильное приложение состоит из модулей:

- инициализации компонентов пользовательского интерфейса;
- проверки текущего модуля данных программы для версии приложения;
- подключения к удаленному серверному модулю;
- построения и визуализации системного модуля КИМ [44];
- отчетности, для преобразования, экспорта статистики и графических данных из приложений;
- прогноза для создания и обучения искусственной нейронной сети на основе метода обратного распространения, линейной функции нормализации с помощью касательной функции активации. Создается нейронная сеть, обучаемая с оценкой результатов, в виде значений ошибок;
- визуализации статистических данных;

- получения данных для реализации запросов выборки данных, хранящихся в базе данных на стороне сервера.

Модули представляют собой базовую структуру проекта разработки мобильных приложений. Они хранятся в отдельных пакетах, поэтому в будущем проект может быть дополнен. Прототипная реализация программного обеспечения Интерфейс клиента имеет форму, показанную на рис. 4.63.

Прототип разработан с использованием облачной службы SaaS fluidui.com, состоящей из 3 вкладок: Analytics (содержит компоненты, просматривающие список активных датчиков, получения информации и управления ими модулями мониторинга, диагностики и прогнозирования, ведения журналов), мониторинг (включает графические компоненты динамической визуализации параметров и системы характеристик), Prediction (содержит таблицу прогнозируемых значений риска отказов в зависимости от выбранного периода времени).



Рис. 4.63. Прототип интерфейса мобильного клиент

Разработанный проект мобильных приложений для мониторинга, диагностики и прогнозирования риска отказов компонентов СТС является полным и логическим завершенным. В процессе написания кода программного обеспечения целесообразно использование настройки Gradle, что позволит ускорить процесс рефакторинга, профилирования и

интеграции с системой контроля версий GIT. Разработанное мобильное приложение позволяет упростить процесс оценки риска отказов компонентов СТС. Дополнительный контент и функциональные дополнения проекта возможны благодаря интерфейсам Android-Core. В качестве альтернативы серверной стороне рекомендуется использовать облачные сервисы и технологии, основанные на моделях IaaS и PaaS.

4.8. Программное приложение для автоматизации построения модели оценки риска отказов сложных технических систем

На основании метода оценки риска отказов взаимосвязанных и взаимодействующих элементов СТС [133,143] разработан алгоритм определения риска отказов в зависимости от степени влияния компонентов СТС, а также КИМ СТС (рис.4.64) [127].

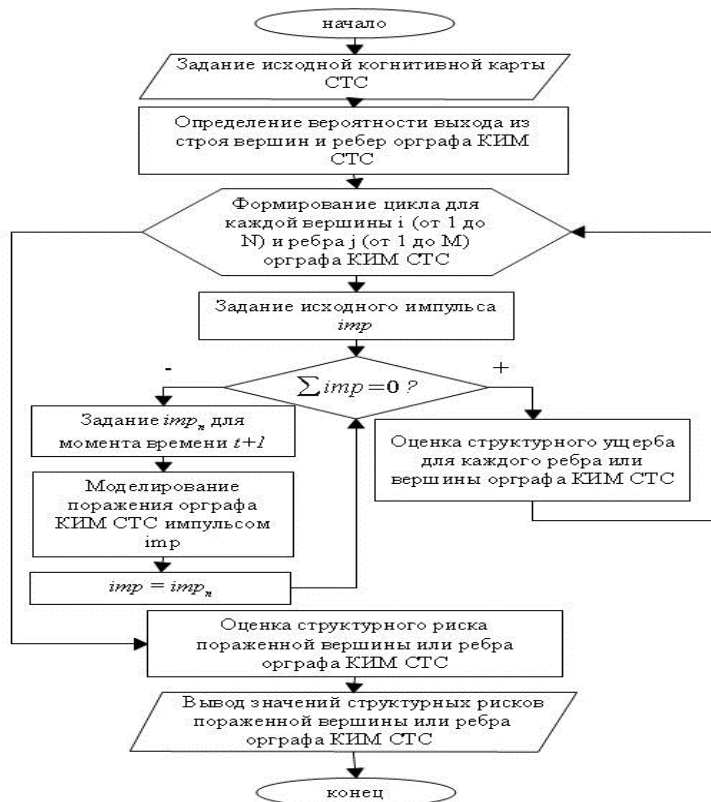


Рис. 4.64. Алгоритм определения риска отказов от степени влияния элементов КИМ СТС

Для поддержки принятия решений по оценке риска отказов ДТС по априорным и апостериорным данным, например при эксплуатации двигателей транспортных средств (ДТС) [144,145] предлагается использовать метод, основанный на динамических байесовских сетях доверия (ДБСД) [21,22,129]. Структура ДБСД ДТС представлена на рис.4.65. Используемые условные обозначения приведены в табл.4.9.

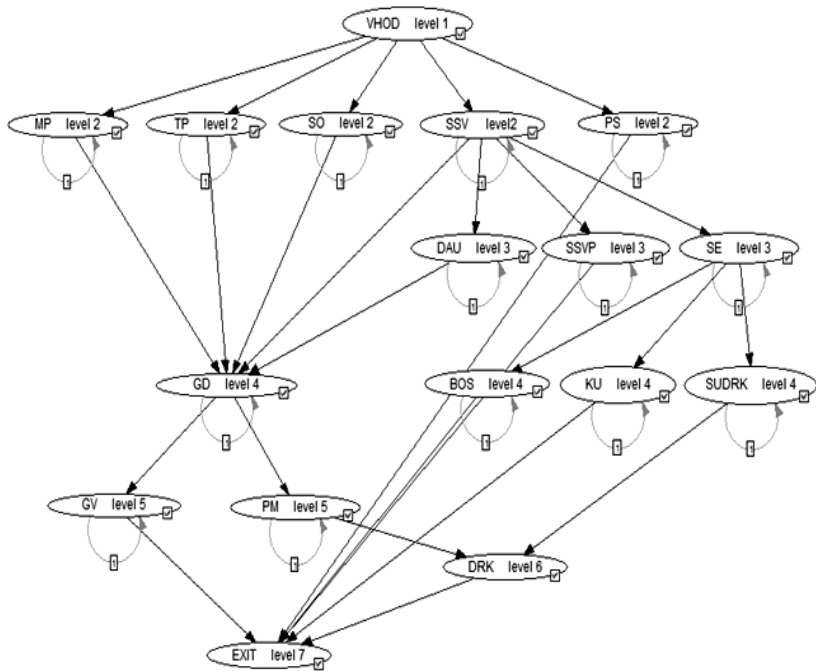


Рис. 4.65. Структура ДБСД ДТС

Для автоматизации процесса построения когнитивной модели оценки риска отказов ДТС разработано кроссплатформенное программное приложение на языке программирования Java, графического фреймворка JavaFX и языке разметки XML.

После запуска разработанного приложения пользователь осуществляет выбор режима работы (ручной – позволяет проводить оценку параметров пошаговым образом, вводя для выбранной системы требуемые данные вручную, автоматический – активирует автоматическую обработку данных).

Таблица 4.9. Условные обозначения элементов ДТС в ДБСД

Наименование элемента	Условное обозначение
Входной элемент	VHOD
Масляная подсистема	MP
Топливная подсистема	TP
Система охлаждения	SO
Система сжатого воздуха	SSV
Система управления движительно-рулевым комплексом	SUDR
Судовая электростанция	SE
Противопожарная система	PS
Главный двигатель	GD
Система дистанционного автоматизированного управления главного двигателя	DAU
Балластно-осушительная система	BOS
Котельная установка	KU
Передача мощности от главного двигателя к движителю	PM
Движительно-рулевой комплекс	DRK
Система санитарной водоподготовки	SSVP
Газовыпускная система	GV

При ручном режиме (рис.4.66) пользователь подключается к базе данных или импортирует данные из отдельного файла. После импорта данных в расположенной ниже таблице отображается общий набор данных: идентификационный номер элемента системы; его краткое название; тип, вид ресурса; средняя вероятность отказа элементов СТС.

Поддерживаются функции сортировки по столбцам таблицы и поиска по указанному критерию имени, ID и значению вероятности выхода из строя. Расположенный в правой части формы компонент TabPane, содержит в себе компонент Accordion из 4-х позиций и реализует возможности перехода по вкладкам просмотра результатов построения КИМ в виде графа (рис.4.67). Доступны функции просмотра структуры графа модели, изменения его весовых значений, пошагового перехода по всем его состояниям, масштабирования его внешнего вида. Для наглядной визуализации результатов оценки рисков реализованы функции построения вертикальной гистограммы ущерба для компонентов системы в выбранном состоянии модели, а также круговых диаграмм, отображающих процентное соотношение элементов и межэлементных связей, по категориям: низкий уровень риска, средний, высокий и критический (рис.4.68).

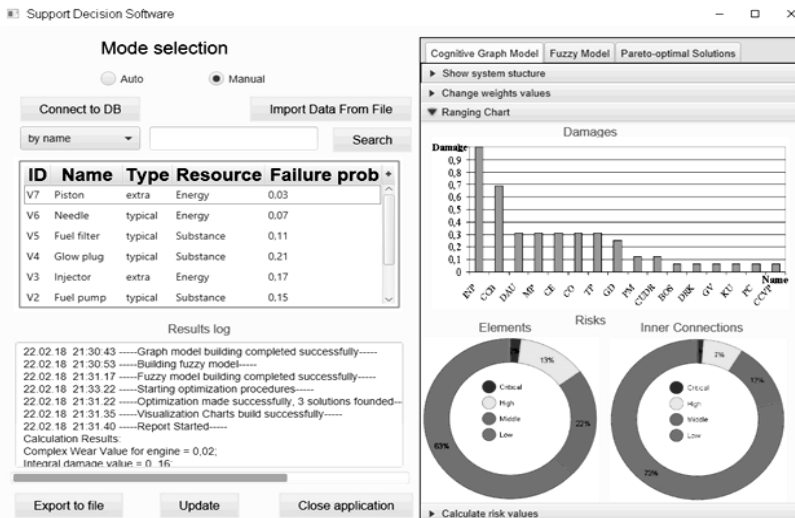


Рис. 4.66. Интерфейс системы поддержки принятия решений для просмотра результатов когнитивной модели ДТС в ручном режиме

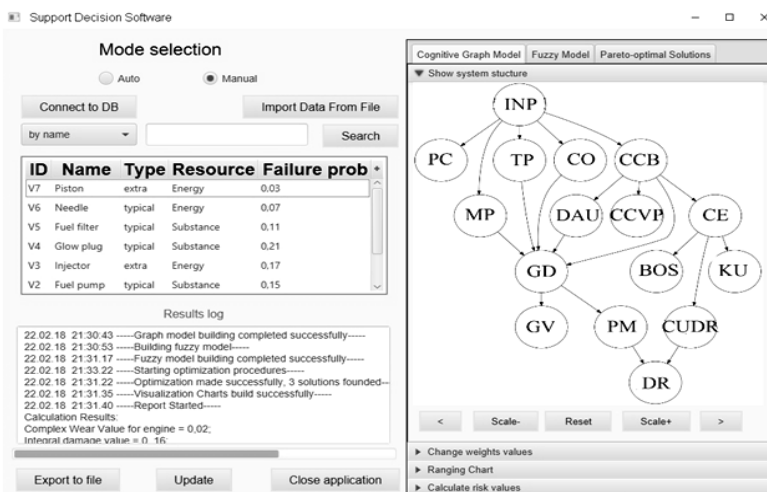


Рис. 4.67. Интерфейс системы поддержки принятия решений для просмотра состояний компонентов системы в виде ориентированного графа в ручном режиме

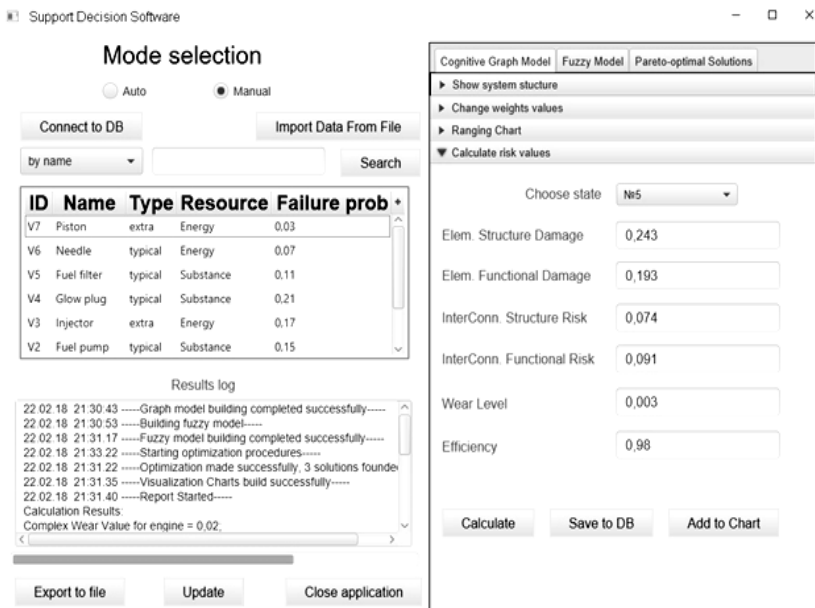


Рис. 4.68. Интерфейс системы поддержки принятия решений для оценки значений структурного и функционального ущерба и риска системы в ручном режиме

С помощью вкладки компонента Accordion «Calculate Risk Values» осуществляется ручной расчет значений ущерба, риска, уровня износа и общей эффективности функционирования для выбранного состояния конкретного компонента ТС.

В процессе построения когнитивной модели системы осуществляется логирование выполнения операций с фиксацией даты и времени начала и завершения каждого процесса. После этого формируется отчет, содержащий комплексное значение износа двигателя, интегральное значение риска потери работоспособности. Полученный отчет лога может быть экспортирован в отдельный файл в формате pdf или csv.

Разработанное программное приложение для автоматизации построения модели оценок риска отказов сложных технических систем на примере двигателей транспортных средств позволяет обеспечить гибкость взаимодействия пользователя с модулем системы поддержки принятия решений, имплементирующей разработанные методы и модели оценок риска отказов и прогнозирования технического состояния двигателей транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков В.Я. Сложные технические системы / В.Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии, 2017. – №3 (20). – С. 86-92.
2. Вычужанин В.В. Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках. Монография/В.В. Вычужанин. – Одесса.: ОНМУ, 2009. – 206 с.
3. Кудж С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем / С.А. Кудж // Перспективы науки и образования, 2014. – № 1. – С 38–43.
4. Берталанфи Л. Общая теория систем – критический обзор. / В кн. исследования по общей теории систем / Л. Берталанфи. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.
5. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Н. Такахара. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
6. Кудж С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем / С.А. Кудж // Перспективы науки и образования, 2014. – № 1. – С. 38–43.
7. Месарович М., Такахара Н. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
8. Волкова В.Н. Основы теории систем и системного анализа. 2-изд., испр. и доп. / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. – СПб.: СПбГУ, 2001. – 511 с.
9. Надежность и эффективность в технике. Справочник. В 10 т. Т.9. Техническая диагностика. Под ред. В.В.Клюева, П.П.Пархоменко. – М.: Машиностроение, 1986. – 351 с.
10. Дорохов А.Н. Обеспечение надежности сложных технических систем / А.Н. Дорохов, В.А. Керножицкий, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 352 с.
11. Животкевич И.Н. Надежность технических систем / И.Н. Животкевич, А.П. Смирнов. – М.: Олита, 2003. – 472 с.
12. Острейковский В.А. Теория надежности / В.А. Острейковский. М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
13. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
14. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007. – 276 с.
15. Вычужанин В.В. Информационное обеспечение мониторинга и диагностирования технического состояния судовых энергоустановок/ В.В. Вычужанин // Вісник Одеського національного морського університету, збірник наукових праць, 2012. – випуск 35 – С. 111-124.
16. ISO 31000:2018(E) Risk management — Guidelines, 16 p.
17. Воскобоев В.Ф. Надежность технических систем и техногенный риск / В.Ф. Воскобоев. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 200 с.
18. Ларичев О.И. Методологические проблемы анализа риска и безопасности использования новых технологий / О.И. Ларичев, А.И. Мечитов // Системные исследования. Методологические проблемы:

- ежегодник, 1988. – С. 355–362.
19. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.
20. Дорожко И. В. Оценка надежности структурно сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe / И. В. Дорожко, А. Г. Тарасов // *Intellectual Technologies on Transport*, 2015. – №3. – С. 36-45.
21. Тулупьев А. Л. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах / А. Л. Тулупьев, А. В. Сироткин, С. И. Николенко. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2009. – 400 с.
22. Jensen, F.V. Bayesian Networks and Decision Graphs / F.V. Jensen, T.D. Nielsen. – Berlin: Springer, 2007. – 457 p.
23. Кунина П.С. Анализ взаимосвязей оборудования компрессорной станции как сложной технической системы / П.С. Кунина, Е.И. Величко // *Проблемы автоматизации и механизации процессов добычи, подготовки и транспорта газа и газового конденсата*, 2008. – С. 151–159.
24. Кочкаров А.А. Управление безопасностью и стойкостью сложных систем в условиях внешних воздействий / А.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // *Проблемы управления*, 2005. – №5. – С.70–76.
25. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
26. Борисов А.Н. Использование нечеткой информации в экспертных системах / А.Н. Борисов, В.И. Глушков // *Новости искусственного интеллекта*, 1991. – № 3. – С.13-41.
27. Васильев В.И. Интеллектуальные системы управления с использованием нейронных сетей / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов, С.С. Валеев, С.В. Жернаков. – Уфа: УГАТУ, 1997. – 92 с.
28. Васильева Т.Н. Разработка метода анализа и обработки рисков отказов сложных многокомпонентных систем: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.13.01. / Т.Н. Васильева; НИУ МЭИ. – М, 2013. – 20 с.
29. Хохлов Н.В. Управление риском: Учеб. пособие для ВУЗов / Н.В. Хохлов. – М.: ЮНИТИ–ДАНА, 1999. – 239 с.
30. Чернова Г.В. Управление рисками: учебное пособие / Г.В. Чернова, А.А. Кудрявцев. – М.: Проспект, 2005. – 160 с.
31. Новегно А. Роль оценки безопасности и управление риском / А. Новегно, А. Эфрам // *Бюл. МАГАТЭ*, 1987. – №2. – С. 39.
32. ГОСТ ИСО/МЭК 31010:2009 (ISO/IEC 31010:2009) Управление рисками: методики оценки потенциальных рисков (Risk management – Risk assessment techniques). Введ 11.12.01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 70 с.
33. Марков А. Управление рисками – нормативный вакуум информационной безопасности / А. Марков // *Открытые системы*, 2007. – № 8. – С. 13–17.

34. Симонов С.В. Анализ рисков, управление рисками / С.В. Симонов // *Jet Info*, 1999. – № 1. – С. 3–28.
35. Гневко В.А. Управление риском и эффективностью на основе построения базы знаний по статистическим данным / В.А. Гневко, Е.Д. Соложенцев // *Экономика и управление*, 2008. – № 3. – С. 199–205.
36. Covello V.T. Risk Assessment Methods / V.T. Covello, M.W. Merkhofer. – New York and London: Plenum Press, 1993. – 374 p.
37. Власов С.В. Управление риском эксплуатации и промышленной безопасностью объектов энергетических систем / С.В. Власов // *Промышленная безопасность*. – УКАНГ, 2012. – №1. – С.33–37.
38. Вычужанин В.В. Метод управления рисками судовых сложных технических систем/ В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко// *Проблемы техники*, 2014. – №2. – С. 138-142.
39. Мильнер Б.З. Организация программно–целевого управления / Б.З. Мильнер. – М.: Наука, 1980. – 376 с.
40. Mitra S. Data Mining. Multimedia, Soft Computing, and Bioinformatics / S. Mitra, T. Acharya. – John Wiley & Sons, Inc. – Hoboken, New Jersey, 2003. – 424 p.
41. Vychuzhanin V. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems/ V.Vychuzhanin, N.Rudnichenko, V.Boyko, N. Shibaeva, S. Konovalov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016. – V. 84. – № 6/9. – P. 4-11.
42. Вычужанин В.В. Распределенный программный комплекс на базе фреймворка APACHE SPARK для обработки потоковых BIG DATA от сложный технических систем / В.В. Вычужанин// *ИНФОРМАТИКА ТА МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ В МОДЕЛЮВАННІ*, 2018. –Том 8. – №2. – С. 146 – 154.
43. Vychuzhanin V.V., Assessment of risks structurally and functionally complex technical systems/ V.V. Vychuzhanin, N.D. Rudnichenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014. – V. 1. – № 2. – P.18-22.
44. Рудниченко Н.Д. Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин // *Информатика и математические методы в моделировании*, 2013. – №3. – С. 240–247.
45. Бойко В.Д.. Модель оценки живучести судовых технических систем / Бойко В.Д. Вычужанин В.В // *Вестник Миколаївського кораблебудівного університету*, 2012. –№3. – С. 62-67.
46. Bailey D. Practical SCADA for industry / D. Bailey, E. Wright. – NY.: Elsevier, 2003. – 298 p.
47. Zadrozny P. Big Data Analytics using Splunk / P. Zadrozny, R. Kodali. – Berkeley, CA, USA: Apress, 2013. – 376 p.
48. Ohlhorst F.J. Big Data Analytics: Turning Big Data into Big Money / F. J. Ohlhorst, Hoboken, N.J, USA: Wiley, 2013. – 176 p.

49. Pokorny J. NoSQL databases: a step to database scalability in web environment / J. Pokorny // Proceedings of the 13th International Conference on Information Integration and Web-based Application and Services, 2011. – p. 278-283.
50. Apache Hadoop Documentation 2014 [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://hadoop.apache.org/>.
51. White T. Hadoop: The Definitive Guide. O'Reilly, 2012. . – Access Mode: http://cdn.oreillystatic.com/oreilly/booksamplers/9781449311520_sampler.pdf.
52. Shvachko K. The Hadoop Distributed / K. Shvachko, Kuang Hairong, S. Radia, R. Chansler// MSST '10 Proceedings of the 2010 IEEE 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technologies, 2010. – P. 1-10.
53. Вычужанин В.В. Оптимізація відбору та аналізу інформації в різноструктурних сховищах даних/ В.В. Вычужанин, Д.С. Шибаев, Н.О. Шибаева, Н.Д. Рудниченко // Інформатика та математичні методи в моделюванні, 2017. –Т.7. –№4. – С. 318-325.
54. Bhatotia P. Incoop: MapReduce for incremental computations / P. Bhatotia, A. Wieder, R. Rodrigues, U. A. Acar, R. Pasquin // Proc. of the 2nd ACM Symposium on Cloud Computing, 2011. – P.1-14.
55. Apache Spark documentation 2014 [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://spark.apache.org/documentation.html>.
56. Apache Spark Research 2014 [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://spark.apache.org/research.html>.
57. Богомолов А.М. Диагностика сложных систем / А.М. Богомолов, В.А. Твердохлебов. – Киев: Наукова думка, 1974. – 128 с.
58. Рябинин И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
59. Можаяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем / А.С. Можаяев. – СПб: ВМА им Кузнецова Н.Г., 2006. – 590 с.
60. Диагностика технических устройств / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 – 615 с.
61. Фрейман В.И. Диагностирование и оценка состояния элементов систем управления распределенными инфраструктурами / В.И. Фрейман, А.А. Южаков // Мехатроника, автоматизация, управление, 2018. – Т. 19. – №2. – С. 86-94.
62. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобилей. Теоретические основы Учебное пособие. — Харьков: Майдан, 2014. — 515 с.
63. Медведев В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности безопасности судовых энергетических установок: монография / В.В. Медведев. – СПб.: Страта, 2013. – 369 с.
64. Шеннон Р. Дж. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Дж. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

65. Beetz M. Cognitive technical systems—what is the role of artificial intelligence / M. Beetz, M.Buss, D. Wollherr // KI 2007: Advances in Artificial Intelligence, 30th Annual German Conference on AI, 2007. – P. 19 – 42.
66. Покусаев М.Н. Система диагностики судовых энергетических установок с применением нейросетевых моделей / М.Н. Покусаев, Н.Н. Касимов // Вестник АГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика, 2012. – № 2. – С. 88–93.
67. Надеев А.И. Диагностика технического состояния судовых дизелей на основе интеллектуального анализа данных / А.И. Надеев, Ф.В. Свирипов, Хай Нгок Буй // Вестник Астраханского государственного технического университета. Морская техника и технология, 2011. – №2. – С. 105–110.
68. Жедунов Р.Р. Система идентификации предаварийных ситуаций технологического процесса, использующая аппарат нечеткой логики и данные вероятных отказов / Р.Р. Жедунов // Вестник Астраханского государственного технического ун-та, 2007. – № 3(38). – С. 169–173.
69. Филоненко А.В. Идентификация предаварийных ситуаций установки получения серы методом Клауса: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.13.06. / А.В. Филоненко ; АГТУ. – Астрахань, 2005. – 20 с.
70. Boyko V. Concept implementation of decision support software for the risk management of complex technical system / V. Boyko, N. Rudnichenko, S. Kramskoy, Y. Hrechukha, N. // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016. - №512. – P. 255-269.
71. Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Shybaiev, D., Gritsuk, I. et al., “Cognitive Model of the Internal Combustion Engine,”SAE Technical Paper 2018-01-1738, 2018, doi:10.4271/2018-01-1738
72. Рудниченко Н.Д. Применение кластерного анализа данных для выделения меры схожести факторов влияния на работоспособность сложных технических систем / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин, Д.С. Шibaев // Информатика и математические методы в моделировании, 2017. – №3. – С. 214-219.
73. Шibaев Д.С. Оптимизация отбора и анализа информации в разноструктурных хранилищах данных / Д.С. Шibaев, В.В. Вычужанин, Н.О. Шibaева, Н.Д. Рудниченко // Информатика и математические методы в моделировании, 2017. – №3. – С.318-324.
74. Шibaев Д.С. Оптимизация методов прогнозирования, обработки и анализа информации в разноструктурных хранилищах даних / Д.С. Шibaев, В.В. Вычужанин, Н.О. Шibaева, Н.Д. Рудниченко // Информатика и математические методы в моделировании, 2018. – №1. – С.78-85.
75. Шibaев Д.С. Повышение эффективности методов отбора и анализа информации в разноструктурных хранилищах данных / Д.С. Шibaев, В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // 21-й міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. Матеріалів форуму. – Харків: Хнуре, 2018. – Т.5. – С.221-222.

76. Vychuzhanin V.V. Big data mapping in the geopositioning systems for fishing industry / V.V. Vychuzhanin, D.S. Shibaev, V.D. Boyko, N.O. Shibaeva, N.D. Rudnichenko // International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 2017. – P. 28 – 31.
77. Чехарин Е.Е. Большие данные: большие проблемы / Е.Е. Чехарин // Перспективы науки и образования, 2016. – №3. – С. 7–11.
78. Биктимиров М.Р. Тенденции развития технологий обработки больших данных и инструментария хранения разноформатных данных и аналитики / М.Р. Биктимиров, А.М. Елизаров, А.Ю. Щербаков // Russian Digital Libraries Journal, 2016. – №5. – С. 390 – 406.
79. Hyunjoung L. Fundamentals of Big Data Network Analysis for Research and Industry / L. Hyunjoung, I. Sohn. – Wiley, 2016. – 205 p.
80. Li K.-C. Big Data Management and Processing / K.-C. Li, H. Jiang, A.Y. Zomaya CRC Press, 2017. – 593 p.
81. Liu Sh. Computational and Statistical Methods for Analysing Big Data with Applications / Sh. Liu, J. McGree, Z. Ge, J. Xie. – Elsevier, 2016. – 196 p.
82. Supriya S. Pore Pawar Comparative Study of SQL & NoSQL Databases / S. Pore Supriya, B. Pawar Swalaya // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), 2015. – Volume 4 Issue 5. – P. 1747-1753.
83. Sedkaoui S. Data Analytics and Big Data / S. Sedkaoui. – Wiley, 2018. – 220 p.
84. Мулюкова К. В. Сравнительный анализ современных инструментов Data Mining / К. В. Мулюкова // Молодой ученый, 2019. – №1. – С. 19 – 21.
85. Щербина А.Д. Порівняльний аналіз існуючих напрямів у інтелектуальному аналізі даних / А.Д. Щербина, Д.С. Шибасев, М.Д. Рудніченко, Н.О. Шибасєва // Project, Program, Portfolio Management The Third International Scientific-practical Conference, Odesa, ONPU 07–08 Dec 2018. – С.88 – 90.
86. Rokach L. Data Mining with Decision Trees. Theory and Applications / L. Rokach, O. Maimon. – World Scientific Publishing Co. , 2008. – 328 p.
87. Субботин С.А. Применение аппарата деревьев решений в задаче диагностирования автомобильных кузовов / С.А. Субботин, Е.А. Гофман // Системний аналіз. Інформатика. Управління : II Всеукраїнська науково-практична конференція САІУ-2011, 2011. – С. 211–212.
88. Шамаева Д. Р. Деревья решения для задач построения рейтинга коммерческих банков / Д. Р. Шамаева // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2017 г.). — СПб.: Свое издательство, 2017. – С. 18 –22.
89. Дружнов П. Н. Параллельная реализация алгоритма градиентного бустинга деревьев решений / П. Н. Дружнов // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии, 2013. – № 2 (28). –

С. 109–114.

90. Vychuzhanin V. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems / V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, V. Boyko, N. Shibaeva, S. Konovalov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016. – №6/9 (84). – P. 4-11.

91. Wartsila, “Wartsila50DF - high output with fuel flexibility” 2014 [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-50df>, accessed Feb. 2018.

92. OREDA – Offshore Reliability Data Handbook. (2015)

93. Вычужанин В.В. Диагностика, контроль при эксплуатации и ремонте систем кондиционирования воздуха на основе гибридных нейро-нечетких экспертных систем / В.В. Вычужанин // Вісник ОНМУ, збірник наукових праць, 2010. – №30. – С. 100-109.

94. Гузик В.Ф. Статистическая диагностика неравновесных объектов / В.Ф. Гузик, В.И. Кидалов, А.П. Самойленко. – СПб.: Судостроение, 2009. – 304 с.

95. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем: Учеб. пособие для вузов / В.М. Гуменюк. – Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. – 218 с.

96. Концевич Т.Ю. Концепция возможности построения удаленного мониторинга ГТД в составе силовых установок наземного применения / Т.Ю. Концевич, А.А. Филоненко, В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2007. – №4 (40). – С. 49–54.

97. Стандарт ИСО 17359-2003. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство.

98. Стандарт ИСО 13371-2004. Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование развития неисправностей. Общее руководство.

99. Стандарт ИСО 13374. Контроль состояния и диагностика машин. Методы обработки, передачи и представления данных. ч.1. Общее руководство, ч.2. Общие методы обработки и анализа, ч.3. Требования к обработке данных.

100. Стандарт ИСО 13379-2003. Контроль состояния и диагностика машин. Интерпретация данных и методы контроля состояния машин.

101. Медведев В.В. Применение методологии формализованной оценки безопасности при проектировании судовой энергетической установки и ее элементов: монография / В.В. Медведев. – СПб.: Реноме, 2008. – 328 с.

102. Моек Е.Н. Техническая диагностика судовых машин и механизмов / Е.Н. Моек, Х.А. Штрикерт. – Л.: Судостроение, 2005. – 328 с.

103. Портнягин Н.Н. Теория и методы диагностики судовых электрических средств автоматизации / Н.Н. Портнягин, Г.А. Пюкке. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2003. – 112 с.

104. ABB Marine Rotterdam, Files on technical-motion control of the main power system with a propeller on the m/s Topas vessel. – 218 p.
105. Monti A. Ship power system control: a technology assessment / A. Monti, F.Ponci, E. Santi // IEEE-Electric Ship Technologies Symposium, Philadelphia, 2005.
106. NORIS Germany, Manual for the control system of the main power system operation for m/s Topaz. – 118 p.
107. Вычужанин В.В. Оценки структурного и функционального рисков сложных технических систем / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2014. –1/2 (67) . – С.18 – 22.
108. LangIcy P. Automated cognitive modeling / P.LangIcy, S.Ohlsson // AAAI-84 Proceedings, 1984. – 112 p.
109. Frank A. Spatial and cognitive simulation with multi-agent systems / A. Frank, S.Bittner, M. Raubal // Spatial Information Theory, 2001. – P. 124–139.
110. Buss M. CoTeSys – cognition for technical systems/ M. Buss, M. Beetz, D. Wollherr, inPro-ceedings of the 4th COE Workshop on Human Adaptive Mechatronics (HAM), 2007.
111. Schwenk C.R. The cognitive perspective on strategic decision making / C.R. Schwenk // Journal of Management Studies, 2007. – Т.25, №1. – P. 41–55.
112. Вычужанин В.В. Взаимодействие технических средств СЭУ на основе когнитивного моделирования / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції Суднова енергетика: стан та проблеми, 2013. – С. 58–60.
113. Birnbraun Z. W. On the importance of different components in a multicomponent system. Multivariate Analyses / Z. W. Birnbraun. – New York: Academic Press, 1969. – P. 581 – 592.
114. Забиров Т.А. Живучесть надводного корабля / Т.А. Забиров. – М.: Военное издательство, 1994. – 360 с.
115. Додонов А.Г. Живучесть информационных систем / А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
116. Стекольников Ю.И. Живучесть систем / Ю.И. Стекольников. – СПб: Политехника, 2002. –155 с.
117. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Г.Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
118. Максимов В.И. Развитие моделей принятия решений: проблемы, парадоксы и перспективы / В.И. Максимов // Банковские технологии, 2000. –№ 3. –С. 39–43.
119. Максимов В.И. Анализ и управление в нестабильной среде / В.И. Максимов, С.В. Качаев, Е.К. Корноушенко // Банковские технологии, 1999. –№ 3. –С. 47–52.

120. Максимов В.И. Когнитивный анализ и моделирование сложных ситуаций / В.И. Максимов, Е.К. Корноушенко, С.В. Качаев // Банковские технологии, 2001. – № 7. – С. 21–26.
121. Шередеко Ю.Л. Классификация информационных процессов. Когнитивные процессы / Ю.Л. Шередеко // Управляющие системы и машины УС и М, 1998. – № 1. – С. 5–17.
122. Горелова Г.В. Когнитивное моделирование для интеллектуальной системы поддержки принятия решений управления транзитной торговлей / Г.В. Горелова, А.И. Хлебникова // Искусственный интеллект, 2010. – № 3. – С. 473 – 482.
123. Шадрина, В.В. Применение методов прогнозирования в технических системах / В.В. Шадрина, Е.Ю. Косенко // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2011. – Т.115, № 2. – С. 141-145
124. Вычужанин В.В. Метод оценки влияния состояния межагрегатных связей на структурную живучесть сложных технических систем / В.В. Вычужанин, В.Д. Бойко, Н.Д. Рудниченко // Вестник государственного морского и речного флота университета имени адмирала С. О. Макарова. – СПб.: ГУМРФ, 2014. – вып. 3(25). – С.105-112.
125. Романов В.С. Рискообразующие факторы: характеристика и влияние на риски / В.С. Романов // Управление риском. – 2001. – № 3. – С. 10-12.
126. Кляхин В.Н. Управление рисками при создании кораблей ВМФ / В.Н. Кляхин, О.К. Коробков // Морская электроника. – 2004. – №8. – С. 55-62.
127. Рудниченко Н. Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем / Н. Д. Рудниченко, В. В. Вычужанин // Информатика и математические методы в моделировании. – 2013. – №3. – С. 240-247.
128. Калман Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. – М.: Мир, 1971. – 400 с.
129. Дорожко И. В. Оценка надежности структурно сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe / И. В. Дорожко, А. Г. Тарасов, А. М. Барановский // Intellectual Technologies on Transport. – 2015. – № 3. – С. 36-45.
130. Vose D. Risk analysis: a quantitative guide / D. Vose. – John Wiley Sons, 2008. – 729 с.
131. Штовба М. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / М. Д. Штовба. – СПб.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
132. Пичкалев А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств / А.В. Пичкалев // Исследования наукограда. – 2012. – №1. – С. 25-28
133. Григоренко Д.В. Кластеризация систем обработки специальных данных / Д.В. Григоренко, В.Н. Ручкин // Методы и средства обработки и хранения информации. – Рязань: РГРТУ. – 2012. – С. 98 - 103.

134. Надев А.И. Диагностика технического состояния судовых дизелей на основе интеллектуального анализа данных / А.И. Надеев, Б.Х. Нгок, Ф.В. Свирипов // Вестник АГТУ. – Сер.: Морская техника и технология. – 2011. – №2. – С.105-110.
135. Егоров, А.В. Особенности методов кластеризации данных / А.В. Егоров, Н.И. Куприянова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – №11. – С.174-178.
136. Суслов, С.А. Кластерный анализ: сущность, преимущества и недостатки / С.А. Суслов // Вестник НГИЭИ. – 2010. – №1. – С.51-57.
137. Kohonen M.M. Self Organizing Map with Modified K-means clustering For High Dimensional Data Set / M.M. Kohonen // International Journal of Applied Information Systems (IJ AIS). Foundation of Computer Science FCS, New York, USA.– 2012. –P. 34–39.
138. Рудниченко Н.Д. Разработка модели нейросети для прогнозирования риска отказов компонентов сложных технических систем / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин // Информатика и математические методы в моделировании. – 2016. – №4. – С. 333-338.
139. Nobuo, K. Statistical Study on Reliability of Ship Equipment and Safety Management–Reliability Estimation for Failures on Main Engine System by Ship Reliability Database System / K. Nobuo // Bulletin of the JIME. – 2011. – Vol. 29. – №2. – P.64-70.
140. Burnette E. Hello, Android: introducing Google's mobile development platform / E. Burnette. - Pragmatic Bookshelf, 2010. – 300 p.
141. Fling B. Mobile design and development: practical concepts and techniques for creating mobile sites and web apps / B. Fling. – O'Reilly Media, 2009. – 336 p.
142. To N. The Android developer's cookbook: building applications with the Android SDK (Developer's Library) / N. To, J. Steele - Addison-Wesley Professional, 2010. - 400 p.
143. Вычужанин В.В. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок / В.В.Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Вісник Одеського національного морського університету, збірник наукових праць. – 2014. – №2(40) . – С. 68 – 77.
144. Andersen B.A Diagnostic System for Remote Real-Time Monitoring of Marine Diesel-Electric Propulsion Systems / B.A. Andersen. – Leipzig, 2011. – 45 p.
145. Krarowski R. Diagnosis modern systems of marine diesel engine / R. Krarowski // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2014. – P. 191-198.

У монографії наведено результати аналізу стану використання інформаційних технологій у діагностиці складних технічних систем. Запропоновано методи і моделі оцінювання ризику відмов складних технічних систем. Виділено напрямки досліджень у межах розробки і застосування методів і засобів інформаційних технологій у діагностиці і прогнозуванні стану складних технічних систем.

Матеріали монографії удуть корисними аспірантам, магістрантам, викладачам вищих навчальних закладів і курсів підвищення кваліфікації, а також усім тим, хто цікавиться питаннями застосування інформаційних технологій для розв'язання задач надійної експлуатації складних технічних систем.

Наукове видання

ВИЧУЖАНІН Володимир Вікторович,
РУДНІЧЕНКО Микола Дмитрович

**МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У
ДІАГНОСТИЦІ СТАНУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Монографія

Російською мовою

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 10,35.
Тираж 200 прим. Зам. 71 / 8.

Видавництво «Екологія».
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1873 від 20.07.2004
65091, м. Одеса, вул. Разумовська, 23 / 1;
тел. (0482) 33-07-17, 37-14-25, (048) 7-855-855
email: astro_print@ukr.net; www.astroprint.ua; www.stranichka.in.ua

Надруковано з готового оригінал-макету
ФОП Побута М.І.
65044, м. Одеса, пр-т Шевченка, 1-а
Тел.: 770-24-74, email: pd5@ukr.net