

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР
«НАДЕЖНОСТЬ И РЕСУРС БОЛЬШИХ СИСТЕМ И МАШИН»
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(НИЦ «НИР БСМ» УрО РАН)

УДК 614.8-027.21:519.2 504:519.2
Рег. № НИОКТР АААА-А19-119021590030-7

УТВЕРЖДАЮ
Директор НИЦ «НИР БСМ» УрО РАН

_____ Л.В. Полуян

«24» декабря 2020 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ
КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ИНФРАСТРУКТУР ПО КРИТЕРИЮ ИНТЕГРАЛЬНОГО
РИСКА

(заключительный)
(FGFS – 2019-0001)

Руководитель НИР,
Научный руководитель НИЦ УрО РАН,
глав. науч. сотр., д-р техн. наук

_____ С.А. Тимашев

Екатеринбург 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, науч. рук., глав. науч. сотр., д-р техн. наук	<hr/>	С.А. Тимашев (введение, разделы 1.1, 2, 3, заключение)
	(подпись, дата)	
Исполнители:		
Директор, канд. техн. наук	<hr/>	Л.В. Полуян (раздел 5)
	(подпись, дата)	
Уч. секретарь, канд. техн. наук	<hr/>	Е.С. Гурьев (раздел 5)
	(подпись, дата)	
Вед. науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/>	А.В. Бушинская (разделы 2, 3)
	(подпись, дата)	
Вед. науч. сотр., д-р техн. наук	<hr/>	В.П. Обоскалов (раздел 4)
	(подпись, дата)	
Вед. науч. сотр., д-р техн. наук	<hr/>	А.Н. Тырсин (раздел 1.2)
	(подпись, дата)	
Стар. науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/>	М.Г. Малюкова (раздел 5)
	(подпись, дата)	
Стар. науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/>	В.Н. Алехин (раздел 1.1)
	(подпись, дата)	
Стар. науч. сотр., д-р техн. наук	<hr/>	А.О. Чернявский (раздел 6)
	(подпись, дата)	
Стар. науч. сотр., д-р техн. наук	<hr/>	Ю.В. Рождественский (раздел 7)
	(подпись, дата)	
Вед. инженер-исслед., б. с.	<hr/>	И.Г. Никулина (раздел 1.1)
	(подпись, дата)	
Стар. инженер-исслед., б. с.	<hr/>	Т.Г. Ковальчук (раздел 1.1)
	(подпись, дата)	
Инженер-исслед., б. с.	<hr/>	И.М. Симагин (раздел 5)
	(подпись, дата)	
Инженер-исслед., б. с.	<hr/>	В.В. Чикир (раздел 5)
	(подпись, дата)	
Нормоконтроль, инженер	<hr/>	Ф.В. Пономарева
	(подпись, дата)	

РЕФЕРАТ

Отчет 295 с., 1 кн., 177 рис., 14 табл., 152 источн., 4 прил.

КОНВЕРГЕНТНЫЕ МАБИКС ТЕХНОЛОГИИ, ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР, ИНДЕКС КАЧЕСТВА ЖИЗНИ. СОЦИАЛЬНАЯ ГОТОВНОСТЬ ПЛАТИТЬ, ПАНДЕМИЯ, МАТРИЦА ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ ИНФРАСТРУКТУР, НАДЕЖНОСТЬ ЭЭС, БАЙЕСОВСКИЕ СЕТИ, ЭНТРОПИЯ, АЛЕАТОРНЫЕ, ЭПИСТЕМНЫЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ, СИЛЬНОАГРУЖЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ, УЗЛЫ ТРЕНИЯ, ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Объектом исследования являются взаимозависимые критичные инфраструктуры (ВКИ) различной природы (умные, устойчивые к развитию региональные и урбанистические системы производства и жизнеобеспечения, потенциально опасные объекты (ПОО) нефтегазовой отрасли, электроэнергетические системы, космические аппараты, атомные реакторы), функционирующие в обычных условиях и при чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Цель работы – создание гибкого многоцелевого инструментария для оптимизации супраживучести, безопасности и гармоничного управления цифровыми системами умных ВКИ по обобщенным территориальным критериям.

Методы проведения работы: конвергентная технология MABICS (цифровая стохастическая механика, искусственный интеллект, прикладная биология, теория информации, когнитивные и социальные науки) в контексте зонтичной науки инфранетики.

В результате НИР разработаны:

- программный алгоритм итерационного построения *матрицы взаимозависимостей городских инфраструктур* (МВГИ) и сервисов на основе экспертных оценок и блокчейн технологии,
- эффективный метод расчета показателей структурной и балансовой надежности реальных локальных и автономных электроэнергетических систем произвольной конфигурации на базе вероятностно-аналитического эквивалентирования,
- метод управления системами критичных инфраструктур в рамках энтропийного моделирования и комплекс алгоритмов и программ на его основе,
- метод оптимизации объема средств, направляемых на применение конкретных мер и устройств на повышение безопасности урбанистических/ производственных инфраструктур при их проектировании и эксплуатации по критериям индекса качества жизни (ИКЖ) и социальной готовности платить (ГП),
- методология интеграции метода Байесовских сетей с иерархическим энтропийно-Байесовским анализом для моделирования редких событий с учетом как исходных и собираемых в ходе эксплуатации системы данных, в том числе, ошибок человеческого фактора (ЧФ), так и неопределенности исходной модели,
- материалы численного анализа деформирования сильноагруженной трубки теплообменника атомного реактора из материала с малым упрочнением, показывающие, что её деформации могут на два порядка превышать тепловые,
- экспериментально-теоретическая методика расчёта подшипников скольжения, работающих в условиях Крайнего Севера и пространства ближнего космоса.

Область применения – поддержка и принятие решений лицами локального (ПОО), отраслевого, муниципального и регионального уровня, связанных с устойчивым ростом регионального валового продукта, и обеспечения высококачественных параметров жизни регионального социума.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	8
ВВЕДЕНИЕ	10
1 Алгоритмы синтеза разнородных методов оценки индивидуальной надежности инфраструктур с учетом неопределенностей исходных данных и энтропийного управления системами	11
1.1 Алгоритм синтеза аналитических и численных методов оценки индивидуальной надежности с множественными типами отказов с учетом неопределенности (эпистемной и алеаторной) исходных данных	11
1.1.1 Введение	11
1.1.2 Теория индивидуальной надежности	11
1.1.3 Проблемы учета неопределенности в задачах надежности и риска.....	13
1.1.4 Источники неопределенности в задачах конструкционной надежности и риска.....	18
1.1.5 Неопределенность основных переменных.....	19
1.1.6 Неопределенность модели.....	21
1.1.7 Неопределенность параметров.....	26
1.1.8 Способы синтеза аналитических, цифровых и эмпирических подходов.....	28
1.1.9 Влияние неопределенностей на оценку конструкционной живучести и надежности компонент инфраструктур	29
1.1.10 Заключение к разделу 1.1.....	33
1.2 Разработка методов управления системами критичных инфраструктур на основе векторной энтропии	35
1.2.1 Введение	35
1.2.2 Дифференциальная энтропия как инструментарий моделирования систем критичных инфраструктур	36
1.2.3 Взаимосвязь между энтропийным моделированием и корреляционно-регрессионным анализом в задачах исследования.....	39
1.2.4 Векторное энтропийное управление: задачи и методы решения	54
1.2.5 Структура комплекса программ для исследования эффективности алгоритмов векторного энтропийного управления стохастическими системами	59

1.2.6	Алгоритмическое и программное обеспечение для векторного энтропийного управления гауссовскими стохастическими системами.....	62
1.2.7	Практическое применение векторного энтропийного управления	70
1.2.7.1	Численные примеры задачи векторного энтропийного управления.....	70
1.2.7.2	Повышение безопасности производства на угледобывающих предприятиях	73
1.2.8	Выводы к разделу 1.2	75
2	Программное обеспечение, позволяющее синтезировать анализ потока данных мониторинга с датчиков и сенсоров умных городских инфраструктур с результатами комплексных оценок их текущего состояния и безопасности компетентными экспертными группами, и алгоритмами принятия решений по минимизации последствий природных и техногенных аварий	77
2.1	Введение.....	77
2.2	Концепция «живой лаборатории» для управления умным городом	81
2.3	Определение взаимозависимости инфраструктур	82
2.4	Методы экспертных оценок в «живой лаборатории»	84
2.4.1	Методы экспертных оценок стратегического совета: администрация, стейкхолдеры (Ярус 1).....	85
2.4.2	Методы экспертных оценок руководящего совета: Главы департаментов (Ярус 2)	89
2.4.3	Методы экспертных оценок исполнителей: государственные и частные предприятия (Ярус 3).....	90
2.4.4	Методы экспертных оценок общества (Ярус 4)	93
2.5	Описание сервиса анализа экспертных оценок в «живой лаборатории».....	93
2.6	Использование датчиков/сенсоров для мониторинга и оперативной передачи информации	99
2.7	Передача информационных потоков от датчиков/сенсоров.....	100
2.7.1	Верификация показаний датчиков перед их передачей в «живую лабораторию»	100
2.7.2	Описание технологии верификации показаний датчиков с помощью блокчейн-технологии.....	102
2.7.3	Схема передачи информационных потоков от датчиков/сенсоров.....	107
2.7.4	Пример передачи информационных потоков на примере БАЭС	109
2.8	Пример применения «живой лаборатории» в Екатеринбурге	110
2.9	Заключение к разделу 2	116

3	Метод оптимизации объема средств, направляемых на применение конкретных мер и устройств на повышение безопасности компонент урбанистических и производственных инфраструктур при их проектировании и эксплуатации по критериям индекса качества жизни (ИКЖ) и готовности платить (ГП).....	118
3.1	Введение.....	118
3.2	Основы теории дисконтирования и общественной полезности потребления .	119
3.3	Функция полезности (всей) жизни	121
3.4	Индекс качества жизни	124
3.5	Цена среднестатистической жизни и готовность платить	126
3.6	Критерий социальной приемлемости инвестиций в проекты по снижению риска	128
3.7	Связь между критерием приемлемости и денежной оптимизацией.....	130
3.8	Иллюстративный пример. Взаимодействие оптимизации с критерием приемлемости и влияние вероятности отказа на критерий ИКЖ	132
3.9	Заключение к разделу 3	138
4	Способ оценки структурной надежности локальных и автономных ЭЭС с распределенной генерацией.....	139
4.1	Введение.....	139
4.2	Математические модели расчета показателей структурной надежности ЭЭС с отказами элементов типа «обрыв»	143
4.3	Отказы типа «КЗ».....	149
4.4	Заключение к разделу 4	158
5	Оценка риска потенциально опасных объектов нефтегазовой отрасли с учетом человеческого фактора на основе сетей Байеса	161
5.1.	Введение.....	161
5.2.	Байесовские сети, как инструмент анализа статистических данных	163
5.3.	Аварии с эффектом BLEVE	165
5.4.	Сбор статистических данных и моделирование аварии	166
5.4.1	Подготовка исходных данных.....	166
5.4.2	Человеческий фактор	168
5.5.	Моделирование байесовской сети	174
5.5.1	Моделирование основных причин развития аварий по BLEVE.....	174
5.5.2	Моделирование человеческого фактора	187
5.6.	Результаты расчета итоговой модели	237
5.7.	Примеры моделирования вероятностного развития аварий	238

5.8.	Заключение к разделу 5	246
6	Методики расчета возможных сценариев развития аварийных ситуаций при взаимодействии конструкции реактора с жидкометаллическим теплоносителем....	248
6.1	Введение.....	248
6.2	Особенности оценки механизмов деформирования деталей	249
6.3	Учет особенностей поведения материала	252
6.4	Механизмы разрушения и моделирование аварийных ситуаций	258
6.5	Заключение к разделу 6	264
7	Методики расчета узлов трения машин и механизмов в условиях пониженных температур (до – 150 град. Цельсия).....	265
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	268
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	270
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	283
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	284
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	289
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	290
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	294

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- КА – космический аппарат
- ТИКН – теория индивидуальной конструкционной надежности
- ЭЭС – электроэнергетическая система
- ФПВ – функция плотности вероятности
- ВО – вероятность отказа
- СВ – случайная величина
- ЦД – цифровой двойник
- ТВ – теория вероятностей
- ТНМ – теория нечетких множеств
- DSET (Dempster-Shafer evidence theory) – теория очевидности Демпстера-Шефера
- БС – байесовская сеть
- НБА (Hierarchical Bayesian Analysis) – иерархический байесовский анализ
- BN (Bayesian Network) – байесовская сеть
- ФПС – функция предельного состояния
- СКО – среднеквадратическое отклонение
- ИЧР – индекс человеческого развития
- БАЭС – Белоярская атомная электростанция
- ИКТ – информационно-коммуникационные технологии
- ISO – Международная организация по стандартизации
- IEC – Международная электротехническая комиссия
- ITU – Международный союз электросвязи
- ГЦ – глобальная цифровизация
- ИВ (IoT) – интернет вещей
- ЛПР – лица, принимающие решения
- ПОО – потенциально опасный объект
- ВКИ – взаимозависимые критичные инфраструктуры
- ИНФ – инфраструктура
- СЕРВ – сервис
- API (Application Programming Interface) — программный интерфейс приложения
- DSDK (Decentralized Software Development Kit) – комплект средств для децентрализованной разработки программного обеспечения
- ИКЖ – индекс качества жизни
- ГП – готовности платить

КИ – критичная инфраструктура
СГП – социальная готовность платить
ВВП – внутренний валовый продукт
СОЖ – средняя ожидаемая продолжительность жизни
ОПЖ – остаточная (предстоящая) продолжительность жизни
ЦСЖ – цена среднестатистической жизни
ФПВ – функция плотности вероятности
СЦСЖ – социальная цена статистической жизни
СИКЖ – социальный индекс качества жизни
ГУ – граничное условие
ЭЭС – электроэнергетическая система
ПН – показатели надежности
ИП – источник питания
УБУ – условные базовые узлы
АБУ – абсолютные базовые узлы
КЗ – короткое замыкание
ОТКЗ – отказ типа «короткое замыкание»
ОТО – отказ типа «обрыв»
АВР – автоматический ввод резерва
БН – балансовая надежность
ПБН – показатели балансовой надежности
ОЭС – объединенные энергосистемы
МО – математическое ожидание
ЧФ – человеческий фактор
ЧО – человеческая ошибка
ДТП – дорожно-транспортное происшествие
ПК – программный комплекс
ПО – программное обеспечение
МКЭ – метод конечных элементов

ВВЕДЕНИЕ

В отчете рассматривается проблема синтеза разнородных методов познания для случая, когда предметом исследования является живучесть, надежность и риск эксплуатации как уникальных, единственных в своем роде, индивидуальных систем и инфраструктур, так и систем массового применения. Как правило, такие нелинейные системы многомерны, функционируют в быстро меняющейся существенно неопределенной среде высокого риска, и могут отказать по множеству разнородных критериев. Природа и возможные подходы к практическому решению таких задач изучены не до конца, необходимый научный инструментарий проработан недостаточно. Всё это затрудняет формализацию задач обеспечения супраживучести, безопасности и стратегической готовности критичных инфраструктур и ключевых объектов. Поэтому тематика отчета, направленная на решение этой проблемы, является высоко актуальной с явной тенденцией к росту.

1 Алгоритмы синтеза разнородных методов оценки индивидуальной надежности инфраструктур с учетом неопределенностей исходных данных и энтропийного управления системами

1.1 Алгоритм синтеза аналитических и численных методов оценки индивидуальной надежности с множественными типами отказов с учетом неопределенности (эпистемной и алеаторной) исходных данных

1.1.1 Введение

В отчете рассматривается проблема синтеза разнородных методов познания для случая, когда предметом исследования является живучесть, надежность и безопасность уникальных, единственных в своем роде, индивидуальных систем и инфраструктур. Как правило, такие нелинейные системы многомерны, функционируют в быстро меняющейся существенно неопределенной среде высокого риска, и могут отказать по множеству разнородных критериев. Природа и возможные подходы к практическому решению этой проблемы изучены не до конца, необходимый научный инструментарий проработан недостаточно. Всё это затрудняет формализацию задачи.

1.1.2 Теория индивидуальной надежности

Проблема оценки индивидуальной надежности была рассмотрена впервые в работах [1–3] применительно к строительным металлическим конструкциям и конструкциям атомных реакторов, результаты разработки были использованы при создании государственного стандарта на точность изготовления металлоконструкций, но не получила дальнейшего развития из-за тогдашнего менталитета как теоретиков, так и прикладников, ориентированных на исследование и обеспечение надежности конструкций массового применения. Она оказалась востребованной спустя почти сорок лет, когда разработчики телекоммуникационных космических аппаратов (КА) единичного/штучного изготовления столкнулись с необходимостью обеспечения их высочайшей надежности ($R \geq 0,99995$) как на стадии запуска на орбиту, так и в процессе эксплуатации [4].

Ключевая идея теории индивидуальной конструкционной надежности (ТИКН) состоит в том, чтобы углубленно, по существу, изучить статистические свойства *единичного* изделия, используя для этого данные, которые генерирует система качества на предприятии-изготовителе данного конкретного изделия. Естественно, при этом

предполагается, что рассматриваемое предприятие – передовое, и имеет в своем составе сертифицированную систему обеспечения качества (которой сорок лет тому назад могло и не быть). Результатом такого подхода является создание представительной и состоятельной базы данных обо всех ключевых параметрах единичного изделия. Целенаправленный анализ этой базы позволяет создать «статистический портрет» единичного изделия, подобно тому, как получается оценка одиночного размера дефекта в реальных условиях эксплуатации при его диагностике набором неразрушающих методов контроля и последующей верификации измерений другим, более точным инструментом. Таким образом, взамен ансамбля однотипных изделий, анализ которого позволяет получить статистические характеристики интенсивности отказов (например, магистральных трубопроводов, вертолетных двигателей или кофеварок), исследователь получает данные, из которых он может извлечь наилучшую возможную *оценку истинного значения* того или иного критичного параметра системы.

Таким образом, ТИКН предписывает проведение на предприятии(ях)-изготовителе уникального объекта комплекса мероприятий, позволяющих получить оценку истинных значений параметров, относящихся к: (1) свойствам образцов материалов, использованных в данной уникальной конструкции, (2) свойств самой конструкции (влияние принятой технологии изготовления на несовершенства формы, особенности граничных условий, несущую способность узлов и др.). В результате в уравнении(ях), описывающем поведение системы, математический оператор системы и коэффициенты уравнения оказываются полностью определенными: у них известны как оценка истинного значения, так и возможный разброс этого значения вызванный погрешностями его замера и конечной точностью метода верификации проведенных измерений. Два из трех множеств, участвующих в анализе конструкционной надежности (множество свойств материалов, из которых изготовлен объект и множество свойств самой конструкции в целом) препарируются до полной готовности участия в надежностной «кухне». Следует отметить, что изложенный подход предполагает, что все вышеописанные множества имеют алеаторную природу, поэтому все неопределенности задачи известны и могут быть оценены статистически.

Третье множество, участвующее в анализе надежности индивидуальной конструкции, суть всевозможные сочетания и комбинации нагрузок и воздействий на систему. Это множество в задачах конструкционной надежности является наименее изученным, поскольку отражает непрерывно усложняющуюся среду, в которой функционирует спроектированная система и содержит как алеаторные, так и эпистемные неопределенности.

Перечисленные множества используются по существу при решении соответствующих задач надежности, живучести, риск-анализа и безопасности инфраструктур с применением тех или иных моделей расчета. Поэтому ниже рассмотрены проблемы модельной неопределенности, под которой понимаются все возможные отклонения от истины при применении той или иной модели. Это множество может иметь, хотя бы временно или частично, эпистемную природу. По этой причине именно из-за внешней среды (в которую входит и человеческий фактор) возникают ситуации по типу *Черный лебедь* [3].

1.1.3 Проблемы учета неопределенности в задачах надежности и риска

Технические проблемы, включая все без исключения проблемы надежности, риска и принятия решений, решаются в рамках существующего в научном мире множества моделей, каждая из которых несет в себе элемент субъективности, так как является детищем одного или группы ученых и/или инженеров и практиков. Это множество состоит из набора физических, технико-экономических и вероятностных моделей (или *субмоделей*). Вероятностные модели характеризуются, в частности, тем, что исходный фактический материал о системе позволяет представить ее несколькими эквивалентными/альтернативными вероятностными моделями, каждая из которых априори имеет право на существование, поскольку *используется в качестве математических идеализаций реальной проблемы*. При этом любая (суб)модель, без исключения, содержит неопределенные по своей природе величины, которые необходимо явным образом включать в состав модели.

Каждая модель неизбежно носит печать субъективности её создателя (ученого и/или инженера). В зависимости от того, насколько разработанная модель близка к ее физическому эквиваленту (прототипу) судят о ее приемлемости и правдоподобности получаемых с её помощью результатов. Наиболее удачные модели сочетают в себе максимально возможную простоту с приемлемой точностью. Они получают широкое распространение и, как правило, получают имя своего изобретателя. Вспомним, к примеру, методы Бубнова, Рунге-Кутта, метод прогонки Годунова, фильтр Калмана, принцип и уравнение Понтрягина, δ -функцию Дирака, ФПВ Вейбулла-Гнеденко, модель пластичности Ильюшина, модель (формулу) потери устойчивости гибкого упругого стержня Эйлера, модель тонкой оболочки Койтера-Муштари и др.

В контексте моделирования физико-технических и физико-кибернетических инфраструктур все неопределенности их моделей полезно разделить на два условных

класса: *алеаторную* неопределенность и *эпистемную* неопределенность. Слово *алеаторий* восходит к латинскому слову *alea* и означает *бросание игральные кости*. Поэтому под алеаторной неопределенностью понимают *врожденную, изначально присущую внутреннюю случайность* явления. Слово *эпистемный* происходит от греческого *ἐπιστήμη* (*эпистеме*), что означает *знание*. Поэтому эпистемная неопределенность является следствием отсутствия необходимых знаний (провал, недостаток знаний – info gap). Выявление таких пробелов в знаниях является актуальнейшей проблемой современности, поскольку стимулирует проведение соответствующих исследований на стыках наук и непосредственно занимается *дьяволом, который сидит в деталях*. Эта проблема в частности, успешно решается в контексте инфранетики [3].

Во множестве моделей анализа рисков расщепление всех возможных неопределенностей на два подмножества позволяет ту часть неопределенности, которая связана с отсутствием/неполнотой знаний, явным образом учесть в самой модели, путем введения вспомогательных *нефизических* переменных, которые определяют *статистическую корреляцию* между различными компонентами задачи, имеющими *общие* неопределенности. Эти переменные фиксируют информацию, полученную в результате сбора большего объема данных или использования более продвинутых научных принципов.

Природа неопределенностей и методы их учета в задачах статистической динамики, надежности, живучести, риска и безопасности сравнительно недавно изучаются теоретиками, прикладниками, и инженерами многих специальностей [5–9] в контексте создания норм проектирования и рекомендаций по эксплуатации по критериям целостности, надёжности, живучести, безопасности и говернанса (принятия гармонизированных решений на основе анализа рисков).

С возрастанием сложности функционирующего объекта учет связанных с ним неопределенностей становится все более важным. О сложности любого физически существующего объекта можно судить по сложности его формализованной (математической) модели, создаваемой для описания того или иного этапа его жизненного цикла.

Этот учёт реализуется на уровне применяемой модели этого объекта. Технические проблемы, включая, без исключения, проблемы надежности, риска и принятия решений, решаются в рамках множества существующих и создаваемых моделей. Эта множество состоит из некоторого растущего числа (иногда конкурирующих между собой) физических и вероятностных моделей (или субмоделей), которые используются в качестве математических идеализаций случайности.

Они могут представлять такие величины, как свойства материала (прочность, пластичность, ударная вязкость, усталостная долговечность, ползучесть и т.д.), характеристики нагрузки (например, динамические/вибрационные воздействия силовых агрегатов КА, сила землетрясения, скорость ветра, высота волны цунами), другие воздействия окружающей среды (например, температура, давление, концентрация токсинов и загрязнения в атмосфере, воде и грунте) и геометрические параметры инфраструктуры (например, размеры поперечного сечения, расположение опор, несовершенства формы объекта – начальные прогибы, перемещения и др.). Зависимые переменные y (производные, т.е., вычисляемые через базовые переменные x) обычно не наблюдаются напрямую, за исключением лабораторных или натуральных исследований, направленных на разработку модели. Критерии технических характеристик обычно описываются в терминах таких зависимых величин, как например, напряжения, деформации, пределы устойчивости, меры повреждения, временные, финансовые и людские потери, концентрация токсинов/загрязнений в 3D пространстве и времени.

В задачах оценки надежности систем ЭЭС типа мини- и микрогрид с возобновляемыми источниками энергии, которые в настоящее время являются, пожалуй, самыми сложными системами созданными человеком, значимыми неопределенными факторами являются (1) величины генерируемой мощности и (2) ограниченная пропускная способность межузловых связей. Задачи оценки надежности оперативного управления коммерческими резервами и тарифами в реальном масштабе времени требуют оперативного управления неопределённостями, что можно выполнить, используя процедуры вероятностного эквивалентирования, а это также приводит к появлению неопределенностей/погрешностей (см. п. 1.1.5). Эти неопределенности в основном относятся к классу эпистемных неопределённостей. Если задача оценки индивидуальной надежности полностью характеризуется алеаторной стохастикой, то к ней применимы все существующие методы стохастической динамики и математической статистики.

Большинство проблем, представляющих интерес для специалистов в области анализа рисков (вообще, ученых-прикладников и инженеров в целом), включают оба типа неопределенностей. Часть исследователей предполагает, что всегда можно провести четкое различие между этими двумя типами неопределенностей [8]. Однако на этапе моделирования зачастую трудно провести такую дифференциацию.

К сожалению, стандартные тесты согласия не гарантируют точности аппроксимации хвоста распределения ФПВ применяемых на практике. В [10] показано, что одинаково хорошо подогнанные распределения могут приводить к существенно различающимся оценкам малых вероятностей. Следовательно, при вычислении вероятностей редких

событий, возникает ошибка неопределенной величины, которую в ряде случаев можно классифицировать как эпистемную, поскольку увеличение объема выборки позволит точнее согласовать распределение и, следовательно, уменьшить неопределенность модели. Однако, в отличие от описанных выше физических моделей, трудно оценить величину ошибки, возникающей на этапе выбора модели распределения. Эту оценку логично сделать, вычислив интересующие вероятности для всех конкурирующие ФПВ и оценить их изменчивость. При этом остается нерешенным вопрос критерия выбора (принятия решения о) наиболее подходящей ФПВ.

Практика решения таких задач показывает, что создатель инженерной модели руководствуется, в первую очередь, практическим императивом ограничить сложность модели до уровня, позволяющем принимать здравые решения, с естественным учетом общего состояния научных знаний, уже имеющихся данных и стоимостью получения недостающих данных. В противном случае, когда задача хотя бы частично имеет эпистемный характер, классическая математика неспособна дать адекватный ответ на поставленный вопрос. Приведенное описание проблемы систематизировано в виде блок-схемы представленной на рисунке 1.1.1.

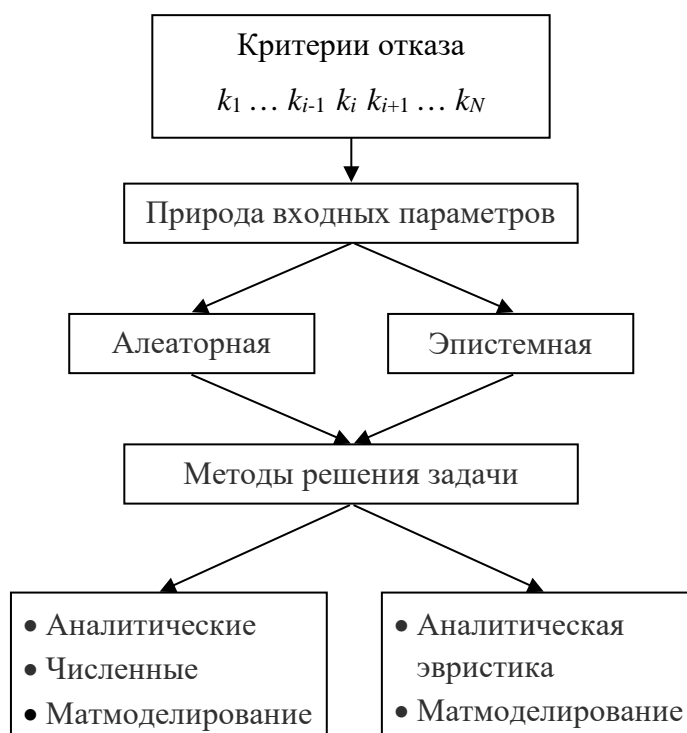


Рисунок 1.1.1 – Блок-схема алгоритма синтеза задач оценки индивидуальной конструкционной надежности

Для задач оценки риска эксплуатации уникальных конструкций, когда необходимо дать оценку вероятности отказа (ВО) и ущерба U , вызванного этим отказом, и величине их произведения, что и дает классическое значение риска, возникает проблема синтеза двух задач, из которых, в лучшем случае, одна оперирует алеаторными величинами, а вторая – (квази)эпистемными.

Для большинства задач этого типа вторая величина оценивается со значительно большей точностью, чем первая. Поэтому относительно высокая точность оценки ВО нивелируется весьма невысокой (гораздо более грубой) точностью оценки последствий инцидента, аварии или катастрофы. Катастрофы типа *Черный лебедь* характеризуются тем, что обе величины имеют небольшую точность оценки или даже просто неизмеримы, при этом:

$$VO \rightarrow 0, U \rightarrow \infty, \quad (1.1.1)$$

и возникает неопределенность типа $0 \cdot \infty$.

Ясно, что в таких случаях применение классической теории вероятности и основанной на ней теории классической конструкционной надежности бессмысленно.

Практическая ценность всех расчетов надежности, живучести, риска и безопасности заключается в их грамотном использовании при принятии управленческих решений разного уровня. Поэтому необходимо понять как перейти, в случае необходимости, от чисто количественных методов к полуколичественным, полукачественным, и, в самых крайних случаях, к чисто качественным методам принятия решений, при тех или иных исходных комбинациях алеаторных и эпистемных данных о внешней и внутренней среде проектируемого или функционирующей конструкции / инфраструктуры/системы.

Рассмотрим множество существующих моделей расчета конструкционной надежности и анализа рисков. Для удобства и наглядности последующего обсуждения, рассмотрим иллюстративную задачу, которая включает в себя: (1) множество переменных входа $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, эмпирические реализации которых образуют (2) множество базовых случайных величин (СВ) $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$. В результате статистической обработки данного множества образуется (3) параметризованная вероятностная субмодель $f_x = (x, \alpha_f)$, описывающая распределение случайного вектора X . В задачу также входит (4) множество параметризованных физических субмоделей $y_i = g_i(x, \alpha_g)$, $i = 1, 2, \dots, m$, описывающее отношения между n величинами $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, и m зависимыми

величинами $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, которые используются при моделировании исследуемой проблемы надежности или риска. Непосредственно наблюдаемые СВ X называются *базовыми*, поскольку они являются исходными эмпирическими данными, которые после ряда тождественных преобразований *превращаются в искомые результаты*.

Субмодели $f_x = (\mathbf{x}, \alpha_f)$ и $y_i = g_i(\mathbf{x}, \alpha_g)$, $i = 1, 2, \dots, m$, являются *несовершенными* математическими идеализациями реальности и содержат неопределенные погрешности/ошибки. Их параметры, α_f и α_g , обычно оцениваются путем *подгонки* этих субмоделей к наблюдаемым данным. В общем случае, альтернативные кандидаты для каждой из этих моделей могут рассматриваться с соответствующими весами, указывающими вероятность их относительной достоверности (см. [11,12]).

Большинство проблем в области надежности или анализа рисков, связано с перечисленными выше элементами. Ниже они используются при моделировании неопределенностей и оценки их значимости для оценки риска и надежности в различных прикладных контекстах.

1.1.4 Источники неопределенности в задачах конструкционной надежности и риска

В контексте рассматриваемой проблемы можно выделить следующие восемь неопределенностей:

- вариабельность, присущая основным СВ X (свойства материалов, конструкции и нагрузки), которую можно оценить напрямую,
- погрешность модели, возникающая в результате субъективного выбора формы вероятностной субмодели $f_x = (\mathbf{x}, \alpha_f)$, используемой для описания функции плотности вероятности (ФПВ) основных переменных,
- погрешность моделирования, возникающая в результате субъективного выбора физических субмоделей $y_i = g_i(\mathbf{x}, \alpha_g)$, $i = 1, 2, \dots, m$, используемых для описания зависимых переменных,
- статистическая неопределенность в оценке параметров α_f вероятностной субмодели,
- статистическая неопределенность в оценке параметров α_g физических субмоделей,

- погрешности косвенных измерений, на основании которых оцениваются параметры α_f и α_g (например, измерение глубины дефекта в металле с помощью магнитной дефектоскопии),
- погрешности численных вычислений и приближений или усечений (допуски на сходимость и ошибки усечения), которые входят в СВ Y ,
- погрешности, возникающие в результате непреднамеренных человеческих ошибок, допущенных при моделировании, проектировании, изготовлении, запуске и/или эксплуатации (например, космических аппаратов (КА) на орбите).

1.1.5 Неопределенность основных переменных

Рассмотрим базовую СВ X , описывающую какое-либо свойство материала, например, прочность углепластика как многослойного композита на сжатие, растяжение или изгиб, основного материала для космических аппаратов (КА). Следует ли трактовать неопределенность в X как алеаторную или эпистемную? Ответ зависит от обстоятельств. Если классифицируемая прочность – это прочность углепластика в КА, находящемся в монтажном цехе в процессе его сборки и тестирования, то эта неопределенность *эпистемная*, поскольку из этого экземпляра КА могут быть взяты и испытаны образцы материала, или проведены соответствующие неразрушающие методы контроля, предоставляя недостающую необходимую информацию. Конечно, тестирование может включать случайные погрешности измерения, особенно если используются косвенные неразрушающие методы. Эту неопределенность измерения следует также отнести к категории эпистемных, если есть возможность использовать другие, более точные независимые методы контроля.

С другой стороны, неопределенность прочности углепластика, проектируемого (*будущего*) КА должна быть отнесена к категории алеаторных. Пока КА не изготовлен/собран, никакие испытания не уменьшат вариабельность прочности углепластика *будущего* КА. Это пример того, как алеаторная неопределенность *трансформируется* в эпистемную неопределенность по мере конструирования и изготовления КА (или любого другого физического объекта) [6]. Этот процесс можно сравнить с процессом проведения рандомизированного эксперимента, определяемого алеаторными неопределенностями.

После физического создания уникальной конструкция КА, ее вероятностная модель выполнила свою задачу. Дальнейшее исследование проводится на детерминированной реализации объекта, что требует новой модели анализа, сложность которой зависит от

характера объекта. Эта модель анализа вполне может быть алеаторной (вероятностной), если объект сложен и предпринимаются шаги для выявления и идентификации этих неизвестных деталей объекта, которые характеризуются как эпистемные, поскольку цель исследования – получить исчерпывающую (по возможности) информацию об объекте.

Ситуация с нагрузками и воздействиями на КА (спросом) несколько иная, поскольку при оценке его надежности необходимо знать *будущие* характеристики нагрузок и воздействий. В этом контексте неопределенность основных переменных спроса, как правило, является алеаторной.

Еще раз подчеркнем разницу между базовыми X и зависимыми от них Y переменными. Этот выбор делает разработчик модели, обычно следуя стандартной инженерной практике. Категоризация неопределенностей как алеаторных или эпистемных, является прерогативой создателя модели и прагматическим выбором, зависящим от контекста и приложения.

Рассмотрим, например, максимальную годовую скорость солнечного ветра, возмущающего движение КА по орбите или интенсивность теплового излучения Солнца, которые могут быть нужны при проектировании штанги антенны телекоммуникационного КА. Разработчик модели может принять решение рассматривать эти величины как базовые переменные, представляющие алеаторную неопределенность. В этом случае он подгонит вероятностную субмодель, возможно, выбранную из некоторых стандартных рекомендаций, для эмпирически полученных данных о максимальной годовой скорости солнечного ветра или интенсивности солнечного излучения.

Если такие данные недоступны, аналитик может использовать *прогнозирующую* субмодель для скорости солнечного ветра или интенсивности солнечного излучения, полученные на основе более обширных астрометеорологических данных. В этом случае годовая скорость солнечного ветра/интенсивность излучения является зависимой переменной вида $y = g(\mathbf{x}, \alpha_g)$, где \mathbf{x} – основные астрометеорологические переменные входа, а $g(\mathbf{x}, \alpha_g)$ – суть субмодель прогнозирования скорости солнечного ветра / интенсивности излучения. Неопределенность в модели солнечного ветра/интенсивности излучения теперь представляет собой *смесь* алеаторных и эпистемных неопределенностей. Произвольный выбор переменных в задаче в качестве основных или зависимых при построении модели приводит к тому, что категоризация неопределенностей зависит от субъективного выбора субмоделей. Используя субмодели, аналитик полагается на эмпирические данные о других базовых переменных или (иногда) на априорно

заданные/принятые (из каких-то дополнительных, в том числе, интуитивных соображений) вероятности.

Хороший пример тому – анализ сейсмической опасности для различных наземных и подземных инфраструктур. Здесь интерес представляет интенсивность возможных колебаний грунта землетрясения на специфическом участке (сайте) строительства. Поскольку трудно получить эмпирические данные об интенсивности колебаний грунта в конкретном месте, на практике обычно связывают меру интенсивности с магнитудой землетрясения (для которой имеются эмпирические данные) с расстоянием, для которого может быть использована *априорная* модель. Часто предполагают, что землетрясение произойдет с одинаковой вероятностью в любом месте активного разлома. Это предположение основано на *законе затухания*, который можно рассматривать как субмодель прогнозирования интенсивности движения грунта. В этой формулировке интенсивность движения грунта становится зависимой переменной, а основными переменными являются сила землетрясения и расстояние от его эпицентра до объекта.

При выборе этой субмодели вводятся *дополнительные неопределенности* (связанные с *законом затухания*), которые могут иметь как алеаторные, так и эпистемные компоненты. Стоит отметить, что различная категоризация неопределенностей в существующей и будущей инфраструктурах (системе, конструкции, объекте) диктует *фундаментальное различие в методах*, используемых для оценки их надежности. Для существующей инфраструктуры оценка надежности должна быть основана на условии учета известной истории объекта. Чем больше временной информации известно об объекте, тем меньше неопределенности в оценке его надежности и живучести. Например, знание того, что объект выстоял землетрясение известной интенсивности, можно использовать для соответствующего усечения левого хвоста распределения его живучести.

По сути, это проблема обновления информации, для которой идеально подходят байесовские методы [5, 13]. Проблема оценки надежности объекта на стадии его проектирования сводится к определению состояния случайной выборки, взятой из генеральной совокупности. После учёта на стадии проектирования всех разумных мер контроля, никакое обновление прямой информацией невозможно, пока объект не будет материализован. Это различие в оценке надежности существующей и будущей конструкции упускается из виду в большей части литературы по конструкционной надежности.

1.1.6 Неопределенность модели

Рассмотрим задачу прогнозирования некоторой физической величины y , однозначно определяемой двумя множествами основных переменных x и z . Для этого необходимо разработать математическую модель (или субмодель) для y .

Зачастую точная форма связи между y и (x, z) неизвестна. Более того, разработчик модели может не знать о зависимости y от z или из практических соображений невозможно/слишком накладно/бесполезно собирать данные о переменных z , и *не захотеть* включать переменные z в прогнозирующую модель y . В качестве конкретного примера рассмотрим упомянутую выше модель ослабления интенсивности колебаний грунта. Хорошо известно, что интенсивность землетрясения на площадке застройки зависит, помимо его силы и расстояния от эпицентра, от скорости распространения разлома, механических характеристик пород на пути распространения сейсмических волн, геологических особенностей окружающей среды и др.

На практике трудно, если не невозможно, измерить эти переменные для данной площадки. Поэтому они исключаются из модели затухания. Эти, а также другие переменные, о которых ничего неизвестно (*неизвестные неизвестные*), составляют *недостающие* переменные z в модели ослабления движения грунта, которые выражаются только в терминах магнитуды землетрясения и расстояния, которые составляют вектор основных переменных x для модели. Теперь прогностическая модель y может быть записана в виде

$$y = \hat{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}_g) + \varepsilon, \quad (1.1.2)$$

где

$\hat{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}_g)$ – идеализированная математическая модель, включающая основные переменные x с $\boldsymbol{\alpha}_g$ в качестве параметров,

$\varepsilon = y - \hat{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}_g)$ – ошибка (невязка) модели, зависящая от x и z .

Параметры $\boldsymbol{\alpha}_g$ и ошибка модели ε обычно оцениваются посредством статистического сравнения модельных и наблюдаемых данных по y и x , что неизбежно приводит к неопределенности в этих оценках. Для представления этих неопределенностей, предполагаем, что $\boldsymbol{\alpha}_g$ и ε являются реализациями случайных величин $\boldsymbol{\alpha}_g$ и E . Ошибка модели E включает в себя: (1) неопределенное влияние отсутствующих переменных z и (2) влияние потенциально неточной формы модели (как в случае, когда используется линейная

модель для описания нелинейной связи между y и x). В этом случае параметры α_g оцениваются путем установления среднего значения E равным нулю, а получаемая при этом форма известна как *гомоскедастическая* модель.

Таким образом, модель полностью определена набором ее параметров (α_g, Σ_E) . Когда задействовано более одной субмодели, в дополнение ко всем параметрам α_g и стандартному отклонению Σ_E для каждой субмодели необходимо ещё оценить *коэффициенты корреляции* между членами ошибки для разных субмоделей. Поскольку может быть трудно наблюдать зависимую переменную y в интересующей исследователя задачи анализа риска, для оценки модели эти наблюдения обычно проводятся в рамках специальных лабораторных или натуральных исследований, нацеленных на разработку модели [14].

Процесс моделирования заменяет ошибку, которая обычно зависит от переменных x и z , на одну случайную величину E , которая не зависит от обоих наборов переменных. По сути, неизвестная, частично детерминированная функциональная связь свёртывается в одну СВ. Если представляет интерес конкретная область значений переменных x , например, расчетная точка предельного состояния в задаче надежности, то, естественно, имеет смысл оценить ошибку модели в этой области при условии, что соответствующие наблюдения y и x доступны (это подход, принятый в [10] и развитый в [15]).

Исследуем теперь природу неопределенностей в вероятностной модели $Y = \hat{g}(\mathbf{x}, \alpha_g) + E$, соответствующей уравнению (1.1.2). Поскольку E учитывает как неопределенные эффекты отсутствующих переменных z , так и потенциально неточную форму модели, то обе эти неопределенности могут быть уменьшены, если уточнить модель за счет включения одной или нескольких отсутствующих переменных и / или использовать аналитические или алгоритмические выражения, обеспечивающие лучшее приближение к истине. В этом смысле неопределенность E , по крайней мере, частично, эпистемная. Однако ограниченность научных знаний может не позволить уточнить форму модели, а неспособность измерить недостающие переменные может исключить возможность расширения модели.

В таких случаях та часть неопределенности в E , которая возникает из-за эффекта отсутствующих переменных, обоснованно классифицируется как случайная, если эти переменные, хотя и неизвестны, можно характеризовать как СВ. *Категоризация неопределенностей в параметрах* ($y = \hat{g}(\mathbf{x}, \alpha_g) + \varepsilon$ обсуждается ниже).

Вероятностная (суб)модель $f_x = (\mathbf{x}, \alpha_f)$ обычно выбирается путем подгонки теоретического распределения к имеющимся эмпирическим данным. Здесь доступны различные методы оценки качества приближения модели к эксперименту, однако, когда интерес представляют события с малой вероятностью, как это имеет место в большинстве задач конструкционной надежности и анализа рисков, критически важно правильно описать хвост распределения малых вероятностей.

Логично сделать это путём *вычисления вероятностей для всех жизнеспособных моделей распределения и оценить* изменчивость вычисленных значений вероятности (здесь возникает проблема оценки этой изменчивости) [16]. Второй подход, предложенный в [17], заключается в параметризации выбора распределения, когда *вся* неопределенность модели сосредоточивается в неопределенности *одного* параметра. Еще один подход состоит в том, чтобы представить выбор модели как проблему принятия решения [14]. Все эти подходы требуют большого объема вычислений. Произвольность в выборе модели распределения и чувствительность малых вероятностей в хвосте ФПВ привели к рекомендации о стандартизации распределения вероятностей для нагрузок и сопротивлений материалов в вероятностных нормах проектирования конструкций [18]. К сожалению, стандартные тесты согласия не гарантируют точности приближения хвоста ФПВ. Например, в [16] показано, что одинаково хорошо подогнанные конкурирующие распределения могут приводить к существенно различающимся оценкам малых вероятностей.

Одна из точек зрения на данную ситуацию состоит в том, что вычисленные вероятности следует рассматривать как *условные значения* и что следует проявлять осторожность при их использовании в абсолютном смысле, например, для вычисления ожидаемых затрат (ущерба) при редких авариях и катастрофах. Эта точка зрения предполагает, что абсолютная вероятность существует как физическая сущность вне математической модели, с помощью которой она вычисляется. Анализ показывает, что такое предположение может иметь место только в очень специальных задачах, где вероятность события действительно может трактоваться как относительная частота физического возникновения события в длинной серии независимых повторений *неизменного* эксперимента, в которых событие может произойти. В области конструкционной безопасности некоторые очень важные источники неопределенности не проявляют такого повторяющегося поведения при идентичных обстоятельствах.

Поэтому можно утверждать, что интерпретация стабильной долгосрочной частоты появления как абсолютной вероятности в физическом смысле неправильна и даже вредна/опасна. Следовательно, полезность концепции вероятности должна опираться на

другое рациональное основание. Однако в качестве конструкта разума (и инструмента моделирования) относительная частотная интерпретация математической вероятности имеет решающее значение для ее полезности в качестве средства выражения степени веры в наступление события. Чтобы сделать вероятностную модель степени веры предметом прагматической проверки на фальсификацию (концепция Матерона [19] на основе логики Поппера [20]) и, таким образом, оправдать ее как объективный инструмент, необходимо, чтобы некоторый тип относительной частоты поведения был связан с вероятностной моделью. Подробное обсуждение философии этой проблемы объективности дано в [7].

Упомянутая кодификация выбранных распределений вероятностей должна рассматриваться как *консенсус специалистов* по проектированию надежности конструкций в отношении элементов модели, к которым чувствительны вычисленные вероятности. В противном случае инженерная практика станет открытой для необоснованного выбора хвоста распределения, сделанного из соображений конкуренции. При наличии такого консенсуса становится возможным создание полезного банка общих знаний, в том числе, в отношении выбора распределений эпистемных неопределенностей, что и делается в рамках зонтичной науки инфранетики. Очевидно, что для распределений, основанных на выборочных данных, банк знаний должен подвергаться пересмотру по мере появления *доступа* к большему количеству данных и данным более высокого качества.

Из сказанного ясно, что при вычислении вероятностей, особенно для редких событий, неопределенной величины ошибка возникает из предполагаемой модели распределения. Эту ошибку можно отнести к категории эпистемных, поскольку сбор большего количества данных позволит лучше согласовать распределение и, следовательно, уменьшить неопределенность модели. Однако, в отличие от описанных выше физических моделей, трудно оценить величину ошибки, возникающей при выборе модели распределения, поскольку эти подходы требуют большого объема вычислений.

Чтобы преодолеть проблему произвольности выбора распределения, вероятностные нормы проектирования разрабатываются путем калибровки, в соответствии с принятой наилучшей практикой. В результате этого становится разумным использовать в моделях принятия оптимальных решений вероятность как *средство сравнения и корректировки*. Стандартизированные распределения имеет смысл использовать при условии, что значения нематериальной полезности откалиброваны так, что принятая наилучшая практика в среднем является оптимальной.

В последние годы значительное внимание уделяется развитию проектирования и инжиниринга, основанных на вероятностных характеристиках. Это особенно продвинуто в отношении трубопроводов, сейсмостойких зданий, сооружений и других инженерных

конструкций [21]. Центральным в этом подходе является заявленная способность вычислить риск на стадии проектирования, связанный с различными требованиями к характеристикам конструкции, включая такие редкие события, как экстремальное повреждение и обрушение. Однако в этой области недостаточно внимания уделяется проблеме чувствительности хвоста ФПВ, характеристикам неопределенностей, присущим моделированию, а также оценке и эффекту статистической зависимости, возникающему из эпистемных неопределенностей. Данный отчет является попыткой сформулировать основные вопросы и проблемы подхода, основанного на оценках вероятностей редких событий.

1.1.7 Неопределенность параметров

Параметры $\hat{g}(\mathbf{x}, \alpha_g)$, \mathbf{E} физических подмоделей и (\mathbf{x}, α_f) подмодели распределения оцениваются посредством статистического анализа данных наблюдений. В частности, $\hat{g}(\mathbf{x}, \alpha_g)$, \mathbf{E} оцениваются на основе попарных наблюдений Y и X , а (\mathbf{x}, α_f) оцениваются на основе наблюдений X . Предпочтительным подходом является байесовский анализ (см. например, [5, 11]), который позволяет включать предварительные информация о параметрах, в том числе, в виде субъективного экспертного заключения. Неопределенность оценок параметров, часто называемая статистической неопределенностью, напрямую связана с объемом (размер имеющихся выборок наблюдений) и качеством (точность наблюдений) доступной информации.

Любая ошибка измерения, присутствующая в наблюдениях, ухудшает их информационное содержание и, следовательно, качество данных, в том числе в полученных ранее данных. Неопределенности параметров обычно имеют эпистемный характер, поскольку неопределенность оценки уменьшается и может асимптотически исчезнуть с увеличением количества и качества доступных данных наблюдений. Во многих случаях объем дополнительной информации, который необходимо собрать, например размер выборки, является сам по себе отдельной проблемой. Обычно оптимальным является такое решение, которое оставляет некоторую *остаточную неопределенность* параметра, которую также следует отнести к категории эпистемных, поскольку существует возможность ее уменьшения путем дальнейшего сбора информации. Прозрачность в принятии решений требует, чтобы заинтересованные стороны, участвующие в решении проблеме, знали, что неопределенности параметров могут быть дополнительно уменьшены, хотя и с затратами, которые могут оказаться неоправданными.

Приведенные выше соображения могут вызвать философский вопрос, существует ли вообще какая-либо *случайная неопределенность*. Очевидно, что этот вопрос не имеет смысла вне множества рассматриваемых моделей. С точки зрения лингвистики все неопределенности равносильны незнанию. Однако, в рамках вероятностной модели (в частности, математической статистической модели) удобно ввести категоризацию неопределенностей на случайную (алеаторную) и эпистемную. Таким образом, в множестве моделей слово *эпистемный* имеет более узкое значение, чем просто недостаток знаний. Любая ошибка измерения, присутствующая в наблюдениях, ухудшает информационное содержание и, следовательно, качество данных.

Эту остаточную неопределенность параметра также следует отнести к категории эпистемных, поскольку, принципиально существует возможность ее уменьшения путем дальнейшего сбора информации. Возможно, что в ходе всеобщей цифровизации и автоматизации, развития искусственного интеллекта, производства наноразмерных датчиков и сенсоров, удешевления и упрощения сбора гигантских объемов первичных данных (Big Data), в обозримом будущем появится реальная возможность построения цифровых двойников физических объектов, и отслеживания их поведения в реальном масштабе времени. Эти цифровые двойники (ЦД) окажутся практически точными моделями (без недостающих переменных), основные переменные которых можно объяснить с помощью точных прогнозных моделей, а все существующие неопределенности будут исключительно эпистемными. Однако этот виртуальный цифровой мир пока еще далек от реалий повседневной инженерной практики сегодняшнего дня.

Разделение неопределенностей на случайные (алеаторные) и эпистемные позволяет прояснить, какие неопределенности могут быть уменьшены, а какие не могут быть уменьшены, по крайней мере, в краткосрочной перспективе (т.е., до того, как произойдет квантовый скачок в той или иной научной дисциплине). Эта категоризация помогает правильно распределить ресурсы и разработать оптимальные инженерные модели. Кроме того, для правильной формулировки проблем риска или надежности необходимо лучшее понимание категоризации неопределенностей. Например, эпистемные неопределенности могут вводить зависимость между оцененными характеристиками компонент системы или между последовательностью событий во времени или в пространстве. На практике этими зависимостями часто пренебрегают из-за неправильной (некорректной) трактовки неопределенностей. Существует неизбежная и неопределенная степень субъективности в выборе моделей и категоризации неопределенностей при решении инженерных проблем. Их удачный выбор на основе интуиции и опыта и составляет *искусство* инжиниринга.

1.1.8 Способы синтеза аналитических, цифровых и эмпирических подходов

В данном разделе кратко описаны существующие и перспективные методы синтеза/слияния (фьюжн–fusion) разнородных методов оценки надежности сложных физических инфраструктур, способных отказывать по разным видам физических отказов (прочность, устойчивость, деформации, перемещения и др.). Анализ риска редких событий требует наличия исходных данных разного уровня детализации (о материале, конструкции, инфраструктуре, системе, отрасли, городе, регионе, социуме как отдельной инфраструктуре и др.) и разного уровня неопределенности.

Рассматривая множество исходных данных со встроенными погрешностями, можно отметить, что для их анализа и построения соответствующих субмоделей и синтеза (фьюжн) получаемых данных используется теория вероятностей ТВ, теория нечетких множеств (ТНМ) и теория очевидности Демпстера-Шефера (Dempster-Shafer evidence theory–DSET). Функции плотности вероятности ФПВ отражают эпистемную неопределенность данных, ТНМ способна представить нечеткость (vagueness) данных, DSET является более общей гибкой процедурой/методикой, т.к. позволяет оценить не только неопределенность, но и нечеткость, и двусмысленность (ambiguity), которые невозможно смоделировать с помощью ФПВ, поскольку даже в реальных практических задачах распределение алеаторных неопределенностей в данных зачастую бывает неизвестно. Кроме того, цифровые данные от сенсоров и датчиков являются, как правило, четкими и не подпадают под область применения ТНМ. Кроме того, DSET является мощным инструментом управления и майнинга (mining) неопределенных данных. В частности, правило комбинаторики Демпстера способно синтезировать свидетельства от многих разнородных источников.

Поскольку в число существенных неопределенностей всегда и неизбежно входит человеческий фактор, одним из возможных выходов из этого положения является применение теории чувствительности, что позволяет *загрубить* систему с наименьшими потерями в точности конечной модели.

Для решения задач с неопределенностями наиболее подходящим инструментом являются Байесовские сети (БС, см. [3]). Подход байесовской сети (БС) используется для моделирования причин аварии. БС допускает как *индуктивные*, так и *абдуктивные* рассуждения, что помогает лучше понять и минимизировать неопределенность модели. Иерархический байесовский анализ (НБА) устраняет неопределенность между агрегированными данными для каждого события путем создания информативного априорного распределения для интересующего исследователя события. В данном отчете

предлагается интегрировать BN с НВА для моделирования редких событий. При этом НВА учитывает неопределенность данных, а BN использует адаптивную модель для лучшего представления и управления неопределенностью самой модели [20]. Предлагаемая методология позволяет разработать подход к динамическому анализу рисков для *редких* событий. Следовательно, очень важно идентифицировать, понимать и правильно учитывать неопределенности, которые сопровождают используемые данные.

1.1.9 Влияние неопределенностей на оценку конструкционной живучести и надежности компонент инфраструктур

В настоящее время эта проблема теории надежности, живучести и безопасности вышла на передний план. Ее сложность заключается в том, что не существует общего правила ее решения – оно зависит от многих факторов, таких как вид, тип и число неопределенностей, характер их влияния на конструкцию или сооружение и способ описания поведения системы, находящейся под действием, в общем случае, комбинации стрессоров. Поэтому необходимо решать конкретные практические случаи, которые потом допускают обобщение полученных результатов.

В связи с этим приведем иллюстративно-методический пример, относящийся к учету влияния неопределенностей на оценку надежности при проектировании и расчете функциональной надежности уникальных космических аппаратов. Пример демонстрирует влияние статистической зависимости, вносимой эпистемными неопределенностями между компонентами системы, на ее надежность. Показано, что пренебрежение или неправильная характеристика неопределенностей может привести к неправильной оценке этих влияний, что приводит к опасному завышению фактической надежности системы, или наоборот, занижению ее надежности (что потребует перепроектирования системы с увеличением ее массы).

Рассмотрим надежность произвольной многокомпонентной последовательно-параллельной структуры типа k из N , где $1 \leq k \leq N$. Экстремальные значения $k = 1$ и $k = N$, соответственно, определяют случаи чисто параллельной и последовательной систем (см. рисунок 1.1.2). Такая система сохраняет свою живучесть, если выживает, по крайней мере, k из N компонентов. Для упрощения дальнейших рассуждений примем, что несущие способности всех элементов рассматриваемого множества систем представлена случайной величиной СВ x_1 ; аналогично, случайные нагрузки на эти элементы представлены СВ x_2 . По сути, компоненты несущей способности и нагружения – это случайные реализации из

распределений x_1 и x_2 соответственно. Поэтому компоненты системы имеют идентичные функции предельного состояния ФПС, определяемые как

$$g(\mathbf{x}) = x_1 - x_2, \quad (1.1.3)$$

где

$g(\mathbf{x} \leq 0)$ – событие отказа.

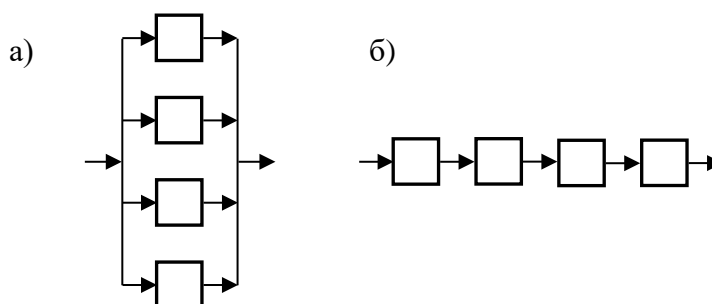


Рисунок 1.1.2 – Структуры типа k из N для случая, когда $N = 4$, $k = 4$ (а) и $k = 1$ (б)

Предполагается также, что x_1 и x_2 – нормальные СВ с неизвестными средними \bar{x}_1 и \bar{x}_2 и известными стандартными отклонениями (СКО) μ_1 и μ_2 соответственно. Согласно введенной выше терминологии, $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ – основные случайные величины, а $\Theta_f = (\mu_1, \mu_2)$ – параметры распределения, которые необходимо оценить. Предположим, что имеющаяся информация для оценки μ_1 и μ_2 – это выборки размера n значений несущей способности и нагружения с выборочными средними \bar{x}_1 и \bar{x}_2 соответственно. В данном случае удобно использовать *байесовское моделирование*, в котором μ_1 и μ_2 рассматриваются как реализации байесовских СВ M_1 и M_2 . Предположение о независимости M_1 и M_2 и не информативности их априорных распределений (взяты «с потолка»), подразумевает, что и апостериорные распределения M_1 и M_2 неизбежно нормальные, со средними значениями \bar{x}_1 и \bar{x}_2 и стандартными отклонениями σ_1/\sqrt{n} и σ_2/\sqrt{n} .

Поскольку статистическая неопределенность в параметрах распределения M_1 и M_2 носит *эпистемный* характер, а несущая способность элементов КА и нагрузки на них

распределены одинаково, эту неопределенность разделяют *все* компоненты системы. Поэтому статистическая неопределенность оценок параметров распределения *вводит статистическую зависимость* между оценочными состояниями компонент системы.

Для исследования этого эффекта воспользуемся тем, что для линейной ФПС и нормальных СВ условный индекс надежности β типичного компонента КА для заданных средних значений M_1 и M_2 равен

$$\beta(\mu_1, \mu_2) = (\mu_1 - \mu_2) / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (1.1.4)$$

Для случая линейной ФПС и нормальных СВ, условный индекс надежности элемента КА для заданных средних значений $M_1 = \mu_1$ и $M_2 = \mu_2$ равен $B = \beta(M_1, M_2)$. Поскольку M_1 и M_2 после получения эмпирических данных распределены нормально, легко показать, что $B = \beta(M_1, M_2)$ имеет нормальное распределение со средним $\mu_B = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ и стандартным отклонением СКО $\sigma_B = 1 / \sqrt{n}$.

Очевидно, что неопределенность показателя надежности из-за статистической неопределенности параметров распределения напрямую связана с размером n выборки наблюдений. Вероятность отказа ВО компонента, обусловленного распределением параметров, задается как $p_f(\mu_1, \mu_2) = \Phi[-\beta(\mu_1, \mu_2)]$. Рассматривая это как преобразование между β и p_f , легко определить, что распределение (Байесовской) вероятности отказа $P_f = p_f(M_1, M_2)$, отражающее влияние статистической неопределенности, равно

$$f_p(p) = \sqrt{n} \cdot \exp \left[-\frac{n}{2} \left(\Phi^{-1}(1-p) - \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[\Phi^{-1}(1-p) \right]^2. \quad (1.1.5)$$

Так называемая прогнозируемая ВО $\bar{p} = \Phi(1 - \bar{p}_f)$ суть среднее значение распределения (1.1.5). Её значение можно получить по следующей формуле:

$$\bar{p}_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_f(\mu_1, \mu_2) f_{M_1}(\mu_1) f_{M_2}(\mu_2) d\mu_1 d\mu_2 = \int_0^1 p f_{p_f}(p) dp. \quad (1.1.6)$$

Соответствующий показатель надежности прогноза равен $\bar{p} = \Phi(1 - \bar{p}_f)$.

Отметим, что с увеличением n как показатель надежности прогноза, так и прогнозируемая ВО асимптотически приближается к значениям этих величин, рассчитанным без учета статистической неопределенности. Увеличение статистической неопределенности (уменьшение размера выборки n) увеличивает прогнозируемую ВО и снижает прогнозную надежность.

Рассмотрим теперь ВО всей системы. Хотя состояния компонент системы статистически независимы, статистическая зависимость между оценками вероятности этих состояний все равно существует, из-за наличия неопределенных параметров M_1 и M_2 в ФПВ всех компонент. Таким образом, чтобы правильно учесть эту зависимость, необходимо сначала оценить условную ВО системы с учетом параметров распределения, а затем проинтегрировать её по всем возможным значениям этих параметров. Используя для этого интегральную биномиальную ФПВ, получим выражение для условной ВО в виде

$$P_{cf}(\mu_1, \mu_2) = \sum_{j=N-k+1}^N \frac{N!}{j!(N-j)!} P_f(\mu_1, \mu_2)^j \cdot [1 - P_f(\mu_1, \mu_2)]^{N-j}. \quad (1.1.7)$$

Используя распределение $P_f = p_f(M_1, M_2)$, приведенное в (1.1.5), прогнозируемая ВО системы получается как

$$\bar{P}_{sf} = \int_0^1 \sum_{j=N-k+1}^N \frac{N!}{j!(N-j)!} p^j (1-p)^{N-j} f_{p_f}(p) dp. \quad (1.1.8)$$

Когда $n \rightarrow \infty$, $\bar{P}_f = \Phi(-\mu_B)$. Соответствующее значение ВО системы получается при подстановке в (1.1.8) этого значения вместо $p_f(\mu_1, \mu_2)$. Вычисления показывают, что статистическая неопределенность (уменьшение размера выборки n) увеличивает прогнозируемую вероятность отказа для обеих систем. Для последовательных систем этот эффект относительно скромный, но для параллельных систем увеличение прогнозируемой ВО может достигать несколько порядков. Влияние статистической неопределенности увеличивается с увеличением избыточности системы (уменьшение k и роста ее энтропии). Это объясняется тем, что положительная корреляция, возникающая из-за статистической неопределенности, эффективно снижает избыточность системы (уменьшает ее энтропию).

В случае, когда рассматриваются исходные данные в виде случайных функций времени, необходимо учитывать такое их свойство (или отсутствие такового) как *эргодичность*. Дело в том, что неэргодические неопределенности вызывают статистическую зависимость при приложении каждой новой комбинации нагрузок на конструкцию или новой комбинации стрессоров на систему инфраструктур. Если, например, поток отказов в какой-либо системе подверженной ударным или пульсационным нагрузкам рассматривается как Пуассоновская функция времени, то он не может рассматриваться как эргодическая функция, поскольку для Пуассоновского потока отказы не являются статистически независимыми. Существующие в литературе оценки погрешности неучета неэргодичности случайных функций в исходных данных применительно к задачам сейсмостойкости зданий и сооружений показывают [23], что эта ошибка приводит к незначительной переоценке ВО. Этот результат можно объяснить тем, что данная задача является аналогом рассмотренной выше задачи для последовательной системы со случайным числом компонент. В задачах, относящихся к живучести сложно подчиненных систем инфраструктур, эта модель расчета может привести к более серьезным ошибкам.

1.1.10 Заключение к разделу 1.1

1) Дана классификация источников неопределенности и разделение неопределенностей на алеаторные (врожденные, случайные) и эпистемные (провалы, пробелы в знаниях) в анализе риска, живучести и надежности инфраструктур и в кодифицированном (основанных на нормах) проектировании или основанном на заданных функциональных характеристиках дизайна. Приведена обобщенная блок-схема оценки надежности сложной системы, отказывающей по ряду типов отказов с учетом алеаторных и эпистемных неопределенностей.

2) Категоризация неопределенностей как алеаторных или эпистемных, является прерогативой создателя модели и прагматическим выбором, зависящим от контекста и приложения. Различие между случайными и эпистемными неопределенностями определяется выбранной моделью объекта и технологией ее создания.

3) Эта дихотомия полезна для: (1) выявления источников неопределенности, которые могут быть уменьшены в ближайшем будущем (до значительного прогресса в научных знаниях), а также (2) при разработке состоятельных, робастных моделей риска, живучести и надежности. Различение также важно с точки зрения прозрачности принятия

решений, поскольку тогда становится ясно, какие уменьшаемые неопределенности не были уменьшены принятыми решениями.

4) Для правильной постановки задач риска и надежности следует уделять особое внимание категории неопределенностей (эпистемная, случайная, эргодическая или неэргодическая, редчайшая (черный лебедь), редкая, нередкая). Невыполнение этого требования может привести к недооценке или переоценке вероятности отказа, которая в некоторых случаях может быть весьма значительной (на несколько порядков).

5) Предлагается методология интеграции метода Байесовских сетей (BN) с иерархическим Байесовским анализом (НВА) для моделирования редких событий с учетом как исходных и собираемых в ходе эксплуатации системы данных, так и неопределенности исходной модели, отличающийся от [23, 24] тем, что иерархия осуществляется с привлечением понятия и аппарата энтропии разрушения.

6) В теории живучести, надежности и безопасности инфраструктур все ещё недостаточно внимания уделяется (1) чувствительности хвостов ФПВ, используемых при решении задач стохастической механики, надежности и безопасности; (2) характеристикам неопределенностей, возникающих при моделировании и оценке рисков, и (3) эффекту статистической зависимости, возникающей из эпистемных неопределенностей.

1.2 Разработка методов управления системами критичных инфраструктур на основе векторной энтропии

1.2.1 Введение

Одной из актуальных проблем в теории риска является построение адекватных моделей сложных систем, позволяющих разрабатывать простые и эффективные количественные методы исследования и управления для повышения безопасности их функционирования. Сложные системы характеризуются тем, что взаимодействие их элементов (подсистем) нельзя или крайне затруднительно представить в явном виде. Еще одним затруднением при моделировании является проблема разнородности входной информации о функционировании различных элементов. Поэтому традиционные модели представления, основанные на параллельно-последовательном структурировании систем [1] не всегда являются их адекватным описанием. Использование сценарных логико-вероятностных моделей [2, 3] и в виде графов [4] требует больших усилий и наличия значительной априорной информации об объекте исследования, что не всегда практически реализуемо.

Современная физика предоставляет полезный инструмент для свертывания всех значимых параметров задачи в один на основе использования понятия энтропии. Энтропия является универсальным физическим параметром, позволяющим объединять различные проявления физического мира в единое целое, то есть, служить общим знаменателем. Понятие энтропии является гибким и допускает четкую интерпретацию в терминах того раздела науки, где оно применяется. Оно все шире используется в современной науке для описания структурной дезорганизации, степени разрушения связей между элементами системы, и вообще, для описания степени деградации любой замкнутой системы, включая территориальные образования [5–12]. Поэтому представляется, что энтропия может выступать в роли универсального параметра и идеально подходит для решения рассматриваемых задач о поведении сложных систем, представляемых в виде совокупности взаимозависимых критичных инфраструктур. При этом взаимозависимые критичные инфраструктуры моделируются как система критичных инфраструктур. Данный подход позволяет оптимизировать стратегии восстановления и является шагом на пути к интегрированию моделей взаимозависимых инфраструктур в системы поддержки решений [4]. Просматривается, что при этом будет возможно создание принципиально новых способов ранней диагностики и мониторинга живучести систем, выявить корреляцию

между предельными состояниями конструкций взаимозависимых критичных инфраструктур и соответствующим уровнем их энтропии.

В математическом моделировании актуальна разработка единого подхода к энтропийному моделированию многомерных стохастических систем, которые бы учитывали энтропийный дуализм. С одной стороны, энтропия является мерой беспорядка, неопределенности, а с другой – характеризует степень организованности, упорядоченности системы.

Предметом исследования являются системы критичных инфраструктур. Цель исследования – разработка методов управления системами критичных инфраструктур в рамках векторного энтропийного моделирования, учитывающего энтропийный дуализм, а также создание на его основе комплекса алгоритмов и программ для практической реализации.

1.2.2 Дифференциальная энтропия как инструментарий моделирования систем критичных инфраструктур

В настоящее время достаточно распространено использование энтропии для описания поведения открытых стохастических систем в различных областях. Но, несмотря на частое использование этого термина, использование энтропии для моделирования открытых систем, в отличие от термодинамики, недостаточно формализовано и носит в основном качественный и частный характер, отсутствуют достаточно простые и адекватные математические модели, позволяющие связать энтропию с фактическими характеристиками состояний многомерных стохастических систем. Общим в этих работах является использование введенной К. Шенноном информационной энтропии [13]

$$H(S) = -\sum_{i=1}^L p_i \ln p_i, \quad (1.2.1)$$

где

p_1, \dots, p_L – вероятности того, что система принимает конечное число соответствующих состояний D_i , т.е. $p_i = P(S \in D_i)$.

Формула (1.2.1) применительно к исследованию реальных систем может быть проиллюстрирована в виде рисунка 1.2.1.

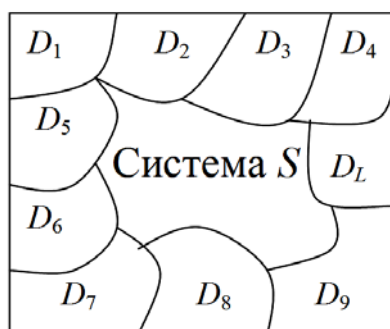


Рисунок 1.2.1 – Модель стохастической системы как функции от множества ее состояний

Здесь фактически модель системы представляется как функция от множества ее состояний $S(\mathbf{D})$. Однако использование информационной энтропии в качестве модели такой системы имеет ряд существенных недостатков:

- требуется оценить вероятности p_i ; это требует больших выборок, для некоторых состояний статистику получить практически невозможно,
- реальные системы обычно являются непрерывными,
- некоторые состояния систем заранее могут быть вообще не известны,
- затруднено моделирование взаимосвязей между элементами многомерных систем,
- не учитывается изменение дисперсии,
- формула информационной энтропии не объясняет наличие негэнтропии,
- адекватные энтропийные модели разработаны только для частных задач.

Более адекватным подходом к описанию реальных стохастических систем является использование модели «черного ящика», когда система определяется ее входами $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ и выходами $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, т.е. $S = S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$. Схематично такое представление показано на рисунке 1.2.2. Отметим, что не все входы и выходы таких систем могут быть наблюдаемыми.

В этом случае вместо информационной энтропии лучше воспользоваться дифференциальной энтропией

$$H(\mathbf{Y}) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\mathbf{Y}}(x_1, x_2, \dots, x_m) \ln p_{\mathbf{Y}}(x_1, x_2, \dots, x_m) dx_1 dx_2 \dots dx_m, \quad (1.2.2)$$

где

$p_{\mathbf{Y}}(x_1, x_2, \dots, x_m)$ – плотность распределения случайного вектора \mathbf{Y} .

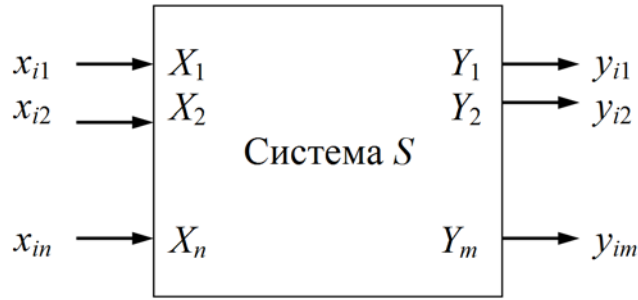


Рисунок 1.2.2 – Представление стохастической системы с помощью модели «черного ящика»

Формула (1.2.2) была предложена К. Шенноном в [13] как формальный аналог понятия информационной энтропии для m -мерного непрерывного случайного вектора \mathbf{Y} . Эта величина впоследствии А.Н. Колмогоровым совместно с И.М. Гельфандом и А.М. Ягломом была названа дифференциальной энтропией [14].

Предлагаемый подход основан на модели многомерной стохастической системы в виде случайного вектора \mathbf{Y} с взаимно зависимыми компонентами, являющимися непрерывными случайными величинами и использует дифференциальную энтропию: $S \rightarrow S(\mathbf{Y}) \rightarrow H(\mathbf{Y})$.

Каждая компонента Y_i вектора \mathbf{Y} является одномерной случайной величиной, характеризующей функционирование соответствующего элемента системы.

В [15] доказано, что если все компоненты Y_i имеют дисперсии $\sigma_{Y_i}^2$, то дифференциальная энтропия $H(\mathbf{Y})$ случайного вектора \mathbf{Y} равна

$$H(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2), \quad (1.2.3)$$

где

$$\kappa_i = H(Y_i / \sigma_{Y_i}) = H(\widehat{Y}_i) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\widehat{Y}_i}(x) \ln p_{\widehat{Y}_i}(x) dx \quad - \text{энтропийный показатель типа}$$

закона распределения случайной величины Y_i ,

$R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2$ – индексы детерминации регрессионных зависимостей.

Первые два слагаемых $H(\mathbf{Y})_V = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i$ названы энтропией хаотичности, а

третье $H(\mathbf{Y})_R = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2)$ – энтропией самоорганизации.

Если \mathbf{Y}° – гауссовский случайный вектор, то

$$H(\mathbf{Y}^\circ) = H(\mathbf{Y}^\circ)_V + H(\mathbf{Y}^\circ)_R, \quad (1.2.4)$$

где

$$H(\mathbf{Y}^\circ)_V = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + m \ln \sqrt{2\pi e},$$

$$H(\mathbf{Y}^\circ)_R = \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}|,$$

$\mathbf{R} = \{\rho_{Y_i^\circ Y_j^\circ}\}_{m \times m}$ – корреляционная матрица.

1.2.3 Взаимосвязь между энтропийным моделированием и корреляционно-регрессионным анализом в задачах исследования

Природа многомерна, и одномерные методы статистического анализа часто оказываются малоэффективными при изучении сложных явлений [16]. Основной целью многомерного статистического анализа является выявление характера и структуры взаимосвязей между компонентами исследуемого многомерного признака [17–19]. В рамках этой цели представляет интерес проблема количественного оценивания тесноты совместной взаимосвязи (корреляционной зависимости) между многомерными случайными величинами.

В настоящее время данная проблема решена лишь частично – для случая тесноты взаимосвязи между компонентами случайного вектора. Для гауссовских случайных векторов в [20] предложена скалярная мера – коэффициент тесноты совместной линейной корреляционной связи, равный

$$D_{e,m}(\mathbf{X}) = 1 - |\mathbf{R}_X|^{1/m}, \quad (1.2.5)$$

где

$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ – многомерная случайная величина, имеющая совместное нормальное распределение и корреляционную матрицу \mathbf{R}_X .

Для оценки взаимозависимости, как линейной, так и нелинейной, в [21] предложен коэффициент

$$d_{e,m}(\mathbf{X}) = 1 - \exp[-2I(\mathbf{X})/m], \quad (1.2.6)$$

где

$I(\mathbf{X}) = H(\tilde{\mathbf{X}}) - H(\mathbf{X})$ – разность дифференциальных энтропий многомерных случайных величин \mathbf{X} и $\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_m)$, компоненты \tilde{X}_i которой являются взаимно независимыми и имеют те же распределения, что и X_i .

Основным недостатком формулы (1.2.6) является необходимость вычисления оценок дифференциальных энтропий, т.к. требуется оценивать по ограниченным выборкам одномерные и многомерные плотности распределений непрерывных случайных величин. Результатом является низкая точность оценивания коэффициента $d_e(\mathbf{X})$. Это делает возможным использовать соотношение (1.2.6) лишь для модельных случаев, когда законы распределений известны заранее. С целью практической реализуемости в [22] вместо (1.2.6) была предложена эквивалентная ей формула

$$d_{e,m}(\mathbf{X}) = 1 - \left[\prod_{k=2}^m (1 - R_{X_k/X_1X_2\dots X_{k-1}}^2) \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (1.2.7)$$

где

$R_{X_k/X_1X_2\dots X_{k-1}}^2$ – индексы детерминации соответствующих регрессионных зависимостей, $k = 2, 3, \dots, m$.

Вопросы непараметрического оценивания индексов детерминации по многомерным выборочным данным рассмотрены в [15].

Предложенная в [20, 21] нормировка (возведение в степень $1/m$) формально не обоснована даже для совместного нормального распределения. Действительно, для гауссовского случайного вектора \mathbf{X} имеем

$$I(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^m H(X_i) + \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{x}}}| - \sum_{i=1}^m H(X_i) - \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_{\mathbf{x}}| = \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_{\mathbf{x}}|,$$

следовательно, величина $I(\mathbf{X})$ не зависит в явной форме от размерности m вектора \mathbf{X} . Поэтому наряду с (1.2.5) и (1.2.7) представляются оправданными формулы

$$D_e(\mathbf{X}) = 1 - |\mathbf{R}_X|, \quad (1.2.8)$$

$$d_e(\mathbf{X}) = 1 - \left[\prod_{k=2}^m (1 - R_{X_k / X_1 X_2 \dots X_{k-1}}^2) \right]. \quad (1.2.9)$$

Кроме оценки тесноты взаимосвязи между компонентами случайного вектора также необходимо оценивать тесноту взаимозависимости между случайными векторами. Во многих приложениях выходных переменных бывает несколько. И возникает задача оценки связи между набором измеряемых (входных) переменных \mathbf{X} и интересующими нас свойствами (выходными переменными) \mathbf{Y} [16, 23]. Если число выходных переменных более одной, то оценку тесноты корреляционной связи между группами входных и выходных переменных осуществляют с помощью метода канонических корреляций [24, 25]. Этот метод является обобщением парной линейной корреляции и позволяет находить максимальные корреляционные связи между двумя группами случайных величин. Зависимость оценивают с помощью канонических переменных, вычисленных как линейные комбинации исходных признаков по каждой из групп. Эти канонические величины должны максимально коррелировать между собой, а их число определяется по числу переменных в меньшем множестве (если число переменных в них не одинаково). Данный метод имеет несколько существенных недостатков.

Во-первых, он рассчитан только на случай, когда все исследуемые признаки связаны друг с другом линейно, что фактически предполагает наличие совместного нормального распределения у каждого из случайных векторов.

Во-вторых, находится максимальная величина коэффициента корреляции между каноническими переменными, в то время как требуется оценить тесноту фактической взаимосвязи, которая может значительно отличаться от максимально возможной. Вместе с наличием множества (их число равно размерности вектора выходных переменных) определяемых коэффициентов корреляции это весьма затрудняет интерпретацию результатов, делая ее слишком общей и малоинформативной для практических задач.

В-третьих, представление канонических переменных в виде только линейных комбинаций каждой из групп переменных также существенно ограничивает результаты максимизации.

В-четвертых, требуется чтобы $m \geq l$, что также является еще одним ограничением.

На основе энтропийного подхода обобщим меры (1.2.5) – (1.2.9) на случай оценки тесноты взаимозависимости между двумя группами переменных, устранив недостатки и ограничения, присущие методу канонических корреляций.

Пусть заданы два произвольно распределенных непрерывных случайных вектора $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ и $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_l)$, причем $m > 1$ и $l > 1$. Введем для них векторы $\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_m)$ и $\tilde{\mathbf{Y}} = (\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \dots, \tilde{Y}_l)$, такие что все компоненты \tilde{X}_i являются взаимно независимыми и имеют те же распределения, что и X_i , а все \tilde{Y}_j – взаимно независимы и имеют те же распределения, что и Y_j . Также зададим два случайных вектора размера $m + l$ как $\mathbf{Z} = \mathbf{X} \cup \mathbf{Y} = (X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_l)$ и $\tilde{\mathbf{Z}} = \tilde{\mathbf{X}} \cup \tilde{\mathbf{Y}} = (\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_m, \tilde{Y}_1, \dots, \tilde{Y}_l)$.

Скалярная мера $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ тесноты взаимозависимости между случайными векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} должна удовлетворять следующим очевидным требованиям:

1°. $0 \leq d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq 1$.

2°. Случай $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0$ соответствует независимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

3°. Случай $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1$ означает наличие функциональной зависимости между случайными векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} , т.е. хотя бы одна из компонент вектора \mathbf{Y} функционально (не случайным образом) связана с компонентами вектора \mathbf{X} .

4°. Мера $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ должна быть непрерывной.

Введем величину $I(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = I(\mathbf{Z}) - I(\mathbf{X}) - I(\mathbf{Y})$, где $I(\mathbf{Z}) = H(\tilde{\mathbf{Z}}) - H(\mathbf{Z})$, $I(\mathbf{X}) = H(\tilde{\mathbf{X}}) - H(\mathbf{X})$, $I(\mathbf{Y}) = H(\tilde{\mathbf{Y}}) - H(\mathbf{Y})$.

В [22] получено, что $I(\mathbf{X}) = -\frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{X_k/X_1 X_2 \dots X_{k-1}}^2)$, $I(\mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \sum_{k=2}^l \ln(1 - R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2)$

Очевидно, что

$$I(\mathbf{Z}) = -\frac{1}{2} \left(\sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{X_k/X_1 \dots X_{k-1}}^2) + \ln(1 - R_{Y_1/X_1 \dots X_m}^2) + \sum_{k=2}^l \ln(1 - R_{Y_k/X_1 \dots X_m Y_1 \dots Y_{k-1}}^2) \right).$$

Тогда имеем

$$I(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \left(\ln(1 - R_{Y_1/X_1 \dots X_m}^2) + \sum_{k=2}^l \ln \frac{1 - R_{Y_k/X_1 \dots X_m Y_1 \dots Y_{k-1}}^2}{1 - R_{Y_k/Y_1 \dots Y_{k-1}}^2} \right). \quad (1.2.10)$$

Введем коэффициент $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ тесноты взаимозависимости между случайными векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} как

$$d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1 - e^{-2I(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}. \quad (1.2.11)$$

С учетом (1.2.10) формула (1.2.11) примет вид

$$d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1 - (1 - R_{Y_1/X_1 \dots X_m}^2) \prod_{k=2}^l \frac{1 - R_{Y_k/X_1 \dots X_m Y_1 \dots Y_{k-1}}^2}{1 - R_{Y_k/Y_1 \dots Y_{k-1}}^2}. \quad (1.2.12)$$

Формула (1.2.12) не имеет ясной интерпретации. Поэтому преобразуем ее с помощью эквивалентных преобразований. Умножив и разделив произведение справа в (1.2.12) на $\prod_{i=2}^m (1 - R_{X_i/X_1 X_2 \dots X_{i-1}}^2)$, и учитывая (1.2.9), получим

$$\begin{aligned} & (1 - R_{Y_1/X_1 X_2 \dots X_m}^2) \prod_{k=2}^l \frac{1 - R_{Y_k/X_1 X_2 \dots X_m Y_1 \dots Y_{k-1}}^2}{1 - R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2} = \\ &= \frac{\prod_{i=2}^m (1 - R_{X_i/X_1 \dots X_{i-1}}^2) \cdot (1 - R_{Y_1/X_1 \dots X_m}^2) \cdot \prod_{k=2}^l (1 - R_{Y_k/X_1 \dots X_m Y_1 \dots Y_{k-1}}^2)}{\prod_{i=2}^m (1 - R_{X_i/X_1 \dots X_{i-1}}^2) \cdot \prod_{k=2}^l (1 - R_{Y_k/Y_1 \dots Y_{k-1}}^2)} = \\ &= \frac{(1 - d_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}))}{(1 - d_e(\mathbf{X}))(1 - d_e(\mathbf{Y}))} \end{aligned}$$

следовательно,

$$d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1 - \frac{(1 - d_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}))}{(1 - d_e(\mathbf{X}))(1 - d_e(\mathbf{Y}))}. \quad (1.2.13)$$

В частности, для гауссовских векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} $d_e(\mathbf{X}) = D_e(\mathbf{X}) = 1 - |\mathbf{R}_X|$, $d_e(\mathbf{Y}) = D_e(\mathbf{Y}) = 1 - |\mathbf{R}_Y|$, $d_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}) = D_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}) = 1 - |\mathbf{R}_{X \cup Y}|$, т.е. формула (1.2.13) примет вид

$$D_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1 - \frac{|\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}|}{|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}| \cdot |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}|}. \quad (1.2.14)$$

Проверим соответствие коэффициента $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ условиям 1°–4°.

Теорема. Скалярная мера $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ тесноты взаимозависимости между случайными векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} удовлетворяет условиям 1°–4°.

Доказательство. Известно [26], что $1 \geq R_{Y_k / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2 \geq R_{Y_k / Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2 \geq 0$, или

$$0 \leq 1 - R_{Y_k / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2 \leq 1 - R_{Y_k / Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2 \leq 1. \quad (1.2.15)$$

Пусть между компонентами векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} отсутствует функциональная связь, т.е. все индексы детерминации, включая $R_{Y_1 / X_1 X_2 \dots X_m}^2$ меньше 1. Это означает, что $\forall k \geq 2$

$$0 < \frac{1 - R_{Y_k / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2}{1 - R_{Y_k / Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2} \leq 1, \text{ т.е.}$$

$$0 < (1 - R_{Y_1 / X_1 X_2 \dots X_m}^2) \prod_{k=2}^l \frac{1 - R_{Y_k / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2}{1 - R_{Y_k / Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2} \leq 1,$$

следовательно, $0 \leq d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < 1$.

Рассмотрим теперь наличие функциональной связи. Пусть $\exists j \geq 2$, для которого $R_{Y_j / Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2 \rightarrow 1$, т.е. $1 - R_{Y_j / Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2 \rightarrow 0$ – бесконечно малая величина. С учетом (1.2.15) получим, что $1 - R_{Y_j / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2$ – бесконечно малая величина порядка не ниже чем

$$1 - R_{Y_j / Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2, \text{ т.е., } 0 < \frac{1 - R_{Y_j / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2}{1 - R_{Y_j / Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2} \leq 1.$$

Если $R_{Y_j / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2 \rightarrow 1$, а $R_{Y_j / Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2 < 1$, то $\frac{1 - R_{Y_j / X_1 X_2 \dots X_m Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2}{1 - R_{Y_j / Y_1 Y_2 \dots Y_{j-1}}^2} = 0$ и

$d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1$ – случай функциональной зависимости между одной или несколькими компонентами вектора \mathbf{Y} и компонентами вектора \mathbf{X} .

Если $R_{Y_1/X_1X_2\dots X_m}^2 \rightarrow 1$, то также $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 1$ и компонента Y_1 функционально зависит от случайного вектора \mathbf{X} .

Из формулы (1.2.12) видим, что случай $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0$ возможен тогда и только тогда, когда $R_{Y_1/X_1X_2\dots X_m}^2 = 0$ и $R_{Y_k/X_1X_2\dots X_mY_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2 = 0$, $k = 2, 3, \dots, l$. Из $R_{Y_k/X_1X_2\dots X_mY_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2 = 0$ следует, что $R_{Y_k/X_1X_2\dots X_m}^2 = 0$, $k = 2, 3, \dots, l$. Это означает, что каждая из компонент вектора \mathbf{Y} не зависит от вектора \mathbf{X} , т.е. имеем случай независимости между векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Мера $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ является функцией от переменных $R_{Y_1/X_1\dots X_m}^2$, $R_{Y_k/X_1\dots X_mY_1\dots Y_{k-1}}^2$, $R_{Y_k/Y_1\dots Y_{k-1}}^2$, $k = 2, 3, \dots, l$, которые заданы на гиперкубе $\prod_{i=1}^{2l-1} [0; 1]$. Проверим непрерывность на его внутренней области $U = \prod_{i=1}^{2l-1} (0; 1)$. Очевидно, что в этом случае все знаменатели

$(1 - R_{Y_k/Y_1\dots Y_{k-1}}^2)$ в (1.2.12) будут больше нуля, поэтому функция $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ определена всюду на множестве U , следовательно является непрерывной на U .

Таким образом, введенная величина $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ удовлетворяет всем условиям 1°–4°.

Рассмотрим некоторые свойства коэффициента $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$.

1. Введем случайный вектор $\widehat{\mathbf{Y}} = (\widehat{Y}_1, \widehat{Y}_2, \dots, \widehat{Y}_l)$. Пусть $\forall k$
 $R_{Y_k/Y_1Y_2\dots Y_{k-1}}^2 = R_{\widehat{Y}_k/\widehat{Y}_1\widehat{Y}_2\dots\widehat{Y}_{k-1}}^2$, $\forall k \neq j$ $R_{Y_k/X_1X_2\dots X_m}^2 = R_{\widehat{Y}_k/X_1X_2\dots X_m}^2$ и
 $R_{Y_j/X_1X_2\dots X_m}^2 < R_{\widehat{Y}_j/X_1X_2\dots X_m}^2$. Поскольку номер j компоненты не влияет на величины $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ и $d_e(\mathbf{X}, \widehat{\mathbf{Y}})$, то зададим без потери общности $j = 1$. Тогда

$$\frac{1 - d_e(\mathbf{X}, \widehat{\mathbf{Y}})}{1 - d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})} = \frac{1 - R_{\widehat{Y}_1/X_1\dots X_m}^2}{1 - R_{Y_1/X_1\dots X_m}^2} < 1,$$

отсюда $1 - d_e(\mathbf{X}, \widehat{\mathbf{Y}}) < 1 - d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$, т.е. $d_e(\mathbf{X}, \widehat{\mathbf{Y}}) > d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$.

2. Пусть имеем случайный вектор $\widehat{\mathbf{Y}} = (\widehat{Y}_1, \widehat{Y}_2, \dots, \widehat{Y}_l)$, для которого $d_e(\mathbf{X} \cup \widehat{\mathbf{Y}}) = d_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y})$ и $d_e(\widehat{\mathbf{Y}}) > d_e(\mathbf{Y})$. Тогда $d_e(\mathbf{X}, \widehat{\mathbf{Y}}) < d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$.

3. Пусть имеем случайный вектор $\widehat{\mathbf{Y}} = (\widehat{Y}_1, \widehat{Y}_2, \dots, \widehat{Y}_l)$, для которого $d_e(\mathbf{X} \cup \widehat{\mathbf{Y}}) > d_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y})$ и $d_e(\widehat{\mathbf{Y}}) = d_e(\mathbf{Y})$. Тогда $d_e(\mathbf{X}, \widehat{\mathbf{Y}}) > d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$.

4. Пусть имеем случайный вектор $\widehat{\mathbf{X}} = (\widehat{X}_1, \widehat{X}_2, \dots, \widehat{X}_m)$, для которого $d_e(\widehat{\mathbf{X}} \cup \mathbf{Y}) = d_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y})$ и $d_e(\widehat{\mathbf{X}}) > d_e(\mathbf{X})$. Тогда $d_e(\widehat{\mathbf{X}}, \mathbf{Y}) < d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$.

Свойства 2–4 непосредственно следуют из (1.2.13).

Для коэффициентов $d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ и $D_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ также можно ввести нормировку. Поскольку размерности m и l могут меняться одновременно, сохраняя при этом $(m+l)$ постоянной, то нормировку проведем относительно средней размерности векторов, равной $(m+l)/2$. Поэтому формулам (1.2.12)–(1.2.14) поставим в соответствие выражения

$$\begin{aligned} d_{e,m,l}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) &= 1 - \left((1 - R_{Y_1/X_1 \dots X_m}^2) \prod_{k=2}^l \frac{1 - R_{Y_k/X_1 \dots X_m Y_1 \dots Y_{k-1}}^2}{1 - R_{Y_k/Y_1 \dots Y_{k-1}}^2} \right)^{\frac{2}{m+l}}, \\ d_{e,m,l}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) &= 1 - \left(\frac{(1 - d_e(\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}))}{(1 - d_e(\mathbf{X}))(1 - d_e(\mathbf{Y}))} \right)^{\frac{2}{m+l}}, \\ D_{e,m,l}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) &= 1 - \left(\frac{|\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}|}{|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}| \cdot |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}|} \right)^{\frac{2}{m+l}}. \end{aligned} \quad (1.2.16)$$

С целью лучшей интерпретируемости и наглядности результатов исследуем случай гауссовских случайных векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} . Рассмотрим два примера: $m = l = 2$ и $m = l = 3$.

Пример 1. Пусть $\mathbf{X} = (X_1, X_2)$, $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2)$, $\mathbf{X} \cup \mathbf{Y} = (X_1, X_2, Y_1, Y_2)$. Для определенности зададим

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(0)} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{X_1 X_2} & \rho_{X_1 Y_1} & \rho_{X_1 Y_2} \\ \rho_{X_1 X_2} & 1 & \rho_{X_2 Y_1} & \rho_{X_2 Y_2} \\ \rho_{X_1 Y_1} & \rho_{X_2 Y_1} & 1 & \rho_{Y_1 Y_2} \\ \rho_{X_1 Y_2} & \rho_{X_2 Y_2} & \rho_{Y_1 Y_2} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & -0,7 & 0,6 \\ 0,5 & 1 & -0,5 & 0,3 \\ -0,7 & -0,5 & 1 & -0,5 \\ 0,6 & 0,3 & -0,5 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$\text{определители } |\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(0)}| = 0,75, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(0)}| = 0,75, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(0)}| = 0,226,$$

коэффициенты детерминации (имеем совместное нормальное распределение, т.е. линейный вид регрессионной зависимости) $\rho_{Y_1/X_1 X_2}^2 = 0,52$, $\rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,25$, $\rho_{Y_2/X_1 X_2 Y_1}^2 = 0,373$.

Согласно (1.2.14) и (1.2.16) получили $D_e^{(0)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,599$, $D_{e,2,2}^{(0)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,367$.

Увеличим тесноту взаимосвязи между компонентами X_2 и Y_2 (за счет увеличения $\rho_{X_2Y_2}$ с 0,3 до 0,9) при сохранении неизменными остальных значений корреляционной матрицы

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & -0,7 & 0,6 \\ 0,5 & 1 & -0,5 & 0,9 \\ -0,7 & -0,5 & 1 & -0,5 \\ 0,6 & 0,9 & -0,5 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(1)}| = 0,75, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(1)}| = 0,75, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(1)}| = 0,056,$$

$$\rho_{Y_1/X_1X_2}^2 = 0,52, \quad \rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,25, \quad \rho_{Y_2/X_1X_2Y_1}^2 = 0,843,$$

$$D_e^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,900, \quad D_{e,2,2}^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,683.$$

Получили рост тесноты взаимозависимости между векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Теперь для исходных векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} уменьшим тесноту корреляционной связи между компонентами \mathbf{Y} (за счет изменения $\rho_{Y_1Y_2}$ с $-0,5$ до $-0,1$), сохранив остальные значения корреляционной матрицы теми же:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & -0,7 & 0,6 \\ 0,5 & 1 & -0,5 & 0,3 \\ -0,7 & -0,5 & 1 & -0,1 \\ 0,6 & 0,3 & -0,1 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(2)}| = 0,75, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(2)}| = 0,99, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(2)}| = 0,154,$$

$$\rho_{Y_1/X_1X_2}^2 = 0,52, \quad \rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,01, \quad \rho_{Y_2/X_1X_2Y_1}^2 = 0,573,$$

$$D_e^{(2)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,793, \quad D_{e,2,2}^{(0)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,545.$$

Так же наблюдаем увеличение тесноты взаимозависимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Уменьшим для предыдущего случая тесноту корреляционной связи между компонентами вектора \mathbf{X} (за счет изменения $\rho_{X_1X_2}$ с 0,5 до 0,1), сохранив остальные значения корреляционной матрицы теми же:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0,1 & -0,7 & 0,6 \\ 0,1 & 1 & -0,5 & 0,3 \\ -0,7 & -0,5 & 1 & -0,1 \\ 0,6 & 0,3 & -0,1 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(3)}| = 0,99, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(3)}| = 0,99, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(3)}| = 0,008,$$

$$\rho_{Y_1/X_1X_2}^2 = 0,677, \quad \rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,01, \quad \rho_{Y_2/X_1X_2Y_1}^2 = 0,975,$$

$$D_e^{(3)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,992, \quad D_{e,2,2}^{(3)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,910.$$

То есть теснота взаимозависимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y} стала еще выше.

Пример 2. $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)$, $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3)$, $\mathbf{X} \cup \mathbf{Y} = (X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3)$. Зададим, например,

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(0)} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,5 \\ 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,2 & -0,3 \\ 0,5 & 0,5 & 1 & 0,7 & 0,6 & 0,3 \\ 0,7 & 0,5 & 0,7 & 1 & 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,2 & 0,6 & 0,5 & 1 & 0,5 \\ 0,5 & -0,3 & 0,3 & 0,5 & 0,5 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(0)}| = 0,5, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(0)}| = 0,5, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(0)}| = 0,0137,$$

$$\rho_{Y_1/X_1X_2X_3}^2 = 0,655, \quad \rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,25, \quad \rho_{Y_2/X_1X_2X_3Y_1}^2 = 0,396, \quad \rho_{Y_3/Y_1Y_2}^2 = 0,333,$$

$$\rho_{Y_3/X_1X_2X_3Y_1Y_2}^2 = 0,869,$$

$$D_e^{(0)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,945, \quad D_{e,3,3}^{(0)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,620.$$

Увеличим тесноту взаимосвязи между компонентами X_3 и Y_3 (за счет изменения $\rho_{X_3Y_3}$ с 0,3 до 0,45) при сохранении неизменными остальных значений корреляционной матрицы:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,5 \\ 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,2 & -0,3 \\ 0,5 & 0,5 & 1 & 0,7 & 0,6 & 0,45 \\ 0,7 & 0,5 & 0,7 & 1 & 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,2 & 0,6 & 0,5 & 1 & 0,5 \\ 0,5 & -0,3 & 0,45 & 0,5 & 0,5 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(1)}| = 0,5, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(1)}| = 0,5, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(1)}| = 0,00852,$$

$$\rho_{Y_1/X_1X_2X_3}^2 = 0,655, \quad \rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,25, \quad \rho_{Y_2/X_1X_2X_3Y_1}^2 = 0,396, \quad \rho_{Y_3/Y_1Y_2}^2 = 0,333,$$

$$\rho_{Y_3/X_1X_2X_3Y_1Y_2}^2 = 0,918,$$

$$D_e^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,966, \quad D_{e,3,3}^{(1)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,676.$$

Получили увеличение тесноты взаимозависимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Теперь для исходных векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} уменьшим тесноту корреляционной связи между компонентами вектора \mathbf{Y} (за счет изменения $\rho_{Y_2Y_3}$ с 0,5 до 0,1), оставив без изменения остальные значения корреляционной матрицы

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,5 \\ 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,2 & -0,3 \\ 0,5 & 0,5 & 1 & 0,7 & 0,6 & 0,3 \\ 0,7 & 0,5 & 0,7 & 1 & 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,2 & 0,6 & 0,5 & 1 & 0,1 \\ 0,5 & -0,3 & 0,3 & 0,5 & 0,1 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(2)}| = 0,5, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(2)}| = 0,54, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(2)}| = 0,0132,$$

$$\rho_{Y_1/X_1X_2X_3}^2 = 0,655, \quad \rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,25, \quad \rho_{Y_2/X_1X_2X_3Y_1}^2 = 0,396, \quad \rho_{Y_3/Y_1Y_2}^2 = 0,280,$$

$$\rho_{Y_3/X_1X_2X_3Y_1Y_2}^2 = 0,873,$$

$$D_e^{(2)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,951, \quad D_{e,3,3}^{(2)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,634.$$

Так же наблюдаем рост тесноты взаимозависимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Уменьшим для предыдущего случая тесноту корреляционной связи между компонентами вектора \mathbf{X} (за счет изменения $\rho_{X_2X_3}$ с 0,5 до 0,1), сохранив остальные значения корреляционной матрицы теми же:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,5 \\ 0,5 & 1 & 0,1 & 0,5 & 0,2 & -0,3 \\ 0,5 & 0,1 & 1 & 0,7 & 0,6 & 0,3 \\ 0,7 & 0,5 & 0,7 & 1 & 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,2 & 0,6 & 0,5 & 1 & 0,1 \\ 0,5 & -0,3 & 0,3 & 0,5 & 0,1 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}^{(3)}| = 0,54, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}^{(3)}| = 0,54, \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}^{(3)}| = 0,00339,$$

$$\rho_{Y_1/X_1X_2X_3}^2 = 0,721, \quad \rho_{Y_2/Y_1}^2 = 0,25, \quad \rho_{Y_2/X_1X_2X_3Y_1}^2 = 0,392, \quad \rho_{Y_3/Y_1Y_2}^2 = 0,280, \quad \rho_{Y_3/X_1X_2X_3Y_1Y_2}^2 = 0,963$$

$$D_e^{(3)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,988, \quad D_{e,3,3}^{(3)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0,774.$$

Так же видим рост тесноты взаимозависимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Рассмотренные примеры наглядно иллюстрируют введенную меру взаимозависимости между случайными векторами.

Вид формул (1.2.3) и (1.2.4) наводит на мысль о наличии взаимосвязи между дифференциальной энтропией (1.2.2) и корреляционно-регрессионным анализом. Ниже приведем полученные результаты, раскрывающие эту взаимосвязь.

Пусть заданы два непрерывных случайных вектора $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, $n \geq 1$ и $m \geq 1$. Введем еще одну энтропийную величину – энтропию взаимосвязи между \mathbf{X} и \mathbf{Y} , определяемую как

$$H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = H(\mathbf{X}) + H(\mathbf{Y}) - H(\mathbf{Z}) = H(\mathbf{X})_R + H(\mathbf{Y})_R - H(\mathbf{Z})_R \geq 0,$$

где

$\mathbf{Z} = \mathbf{X} \cup \mathbf{Y} = (X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_m)$, $H(\mathbf{X})_R$, $H(\mathbf{Y})_R$, $H(\mathbf{Z})_R$ – энтропии самоорганизации стохастических систем \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} .

Нетрудно заметить, что $H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = 0$ при взаимной независимости случайных векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} , чем выше теснота корреляционной взаимосвязи между \mathbf{X} и \mathbf{Y} , тем больше значение $H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$, и $H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = +\infty$ при наличии строгой функциональной взаимосвязью между хотя бы двумя компонентами у векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Пусть у всех компонент векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} существуют дисперсии. Тогда можно получить, что [27]

$$H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \ln d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}), \quad (1.2.17)$$

где

$d_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ – коэффициент тесноты корреляционной взаимозависимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y} , вычисляемый по формуле (1.2.13),

$d_e(\mathbf{Y}), d_e(\mathbf{Z})$ – коэффициенты тесноты совместной корреляционной связи $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ [7].

Из (1.2.17) с учетом (1.2.3) и (1.2.4) можно получить следующие результаты.

1°. Пусть U и V – непрерывные случайные величины, у которых существуют дисперсии. Тогда энтропии взаимосвязи между U и V и между \mathbf{X} и U равны

$$H(U \cap V) = -\frac{1}{2} \ln(1 - R_{V/U}^2) = -\frac{1}{2} \ln(1 - R_{U/V}^2),$$

$$H(\mathbf{X} \cap U) = 1 - \frac{1 - d_e(\mathbf{X} \cup U)}{1 - d_e(\mathbf{X})},$$

где

$R_{U/V}, R_{V/U}$ – теоретические корреляционные отношения между U и V .

2°. Если \mathbf{X}° и \mathbf{Y}° – гауссовские случайные векторы, то

$$H(\mathbf{X}^\circ \cap \mathbf{Y}^\circ) = -\frac{1}{2} \ln \frac{|\mathbf{R}_{\mathbf{X}^\circ \cup \mathbf{Y}^\circ}|}{|\mathbf{R}_{\mathbf{X}^\circ}| \cdot |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}^\circ}|}, \quad H(X_i^\circ \cap Y_j^\circ) = -\frac{1}{2} \ln(1 - \rho_{X_i^\circ Y_j^\circ}^2).$$

3°. Пусть имеем уравнение регрессии $\bar{Y}_k(\mathbf{X}) = \hat{Y}_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} X_i$ и считаем, что $\forall i \neq j$ $\text{cov}(X_i, X_j) = 0$. Тогда будут справедливы формулы

$$\rho_{Y_k X_i}^2 = \exp\{-2H(Y_k \cap X_i)\},$$

$$a_{ki} = \rho_{Y_k X_i} \frac{\sigma_{Y_k}}{\sigma_{X_i}} = \exp\{H(Y_k) - H(X_i) - H(Y_k \cap X_i)\},$$

где

$$H(Y_k) = \ln(\sigma_{Y_k} \sqrt{2\pi e}), \quad H(X_i) = \ln(\sigma_{X_i} \sqrt{2\pi e}).$$

Пример 3. Оценка эффективности финансирования социальной сферы в регионах.

Рассмотрим применение показателя взаимозависимости между случайными векторами для оценки эффективности финансирования социальной сферы в регионах России с 2007 г. по 2016 г. В качестве общего индикатора развития регионов был использован индекс человеческого развития (ИЧР) [28]. С целью учета региональной специфики развития субъекты РФ разбиты на 3 группы на основе значения ИЧР. Для обеспечения статистической устойчивости результатов не учтены при построении модели 17 субъектов РФ с наиболее высокими и наименее низкими значениями ИЧР, а также с аномальными значениями или с отсутствующими статистическими данными по отдельным показателям. Также в модель вошли показатели финансирования социальной сферы в регионах (расходы консолидированного бюджета субъекта РФ и территориального государственного внебюджетного фонда на здравоохранение (X_1), образование (X_2) и жилищно-коммунальное хозяйство (X_3) – входные показатели) и 9 результирующих показателей развития регионов: ожидаемая продолжительность жизни (Y_1); среднедушевые денежные доходы, руб. (Y_2); стоимость фиксированного набора потребительских товаров и услуг на конец года, руб. (Y_3); численность населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума, % от общей численности населения (Y_4); суммарный коэффициент рождаемости, ед. (Y_5); количество зарегистрированных преступлений, сл. на 100 тыс. человек населения (Y_6); валовой региональный продукт на душу населения, руб. (Y_7); уровень безработицы (по методологии МОТ), % (Y_8); смертность населения от внешних причин, чел. на 100 тыс. человек населения (Y_9).

Условием отбора результирующих показателей финансирования социальной сферы регионов, помимо их широкого использования в качестве индикаторов качества жизни (в т.ч. в нормативно-правовых документах), стало наличие статистической связи между ними и ИЧР. Был проведен дискриминантный анализ [24] для ежегодных данных результирующих показателей Y_1, Y_2, \dots, Y_9 для трех групп ($IND = 1, IND = 2, IND = 3$) за ретроспективный период. Результаты показали устойчивое распознавание трех групп.

Анализ стабильности пребывания регионов в трех группах и результатов оценивания тесноты корреляционной взаимосвязи между показателями финансирования социальной сферы в регионе и между показателями регионального социально-экономического развития позволяет сформулировать следующие выводы.

- 1) Теснота взаимосвязи между показателями финансирования социальной сферы в регионе растет с повышением ИЧР, т.е. у развитых регионов расходы бюджетных средств более эффективны.
- 2) Теснота взаимосвязи между результирующими показателями социально-экономического развития уменьшается с повышением ИЧР. Это можно объяснить замедлением скоординированного развития регионов. Данный вывод согласуется с нестабильностью пребывания регионов в одной и той же группе, особенно для субъектов II (со средними значениями ИЧР) и III (с высокими значениями ИЧР) групп.
- 3) Таким образом, наблюдаются противоположные тенденции у тесноты взаимосвязи между показателями финансирования социальной сферы в регионе и между результирующими показателями регионального социально-экономического развития с изменением ИЧР.

Далее определим тесноту корреляционной взаимосвязи между финансированием системы здравоохранения, образования и ЖКХ и результирующими показателями по трем группам регионов и в среднем по ним. Результаты оценивания представлены на рисунке 1.2.3.

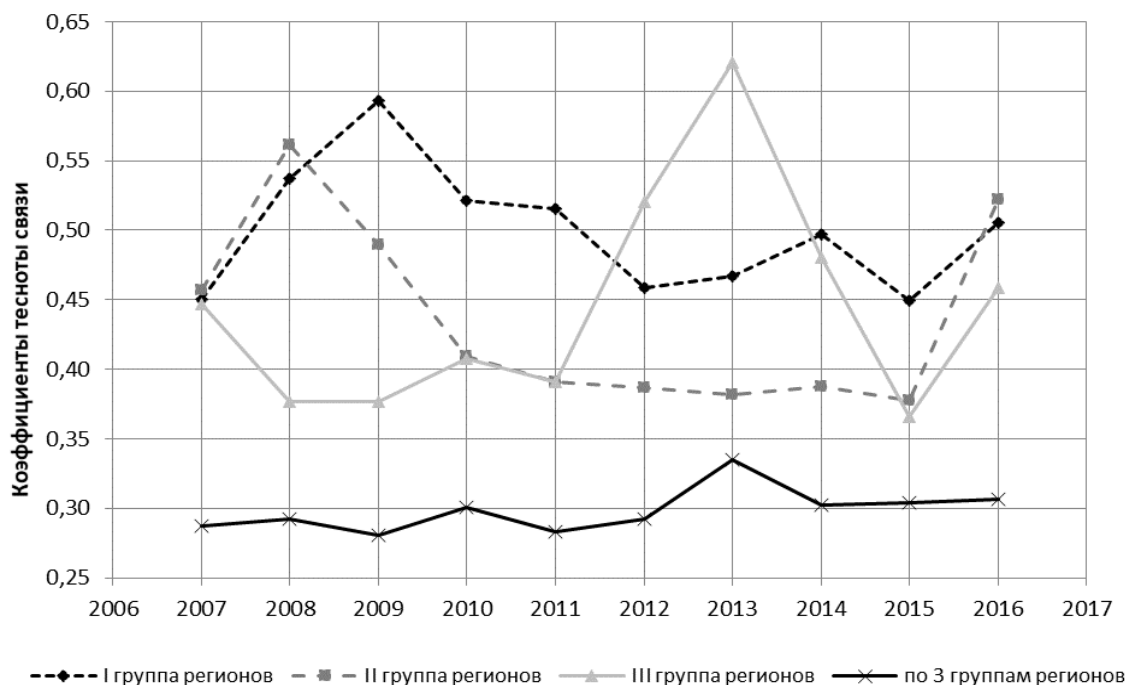


Рисунок 1.2.3 – Результаты оценивания взаимосвязи между финансированием системы здравоохранения, образования и ЖКХ и результирующими показателями

В целом результаты исследования показали невысокую эффективность финансирования социальной сферы. Социально-экономическое развитие регионов скорее

определяется не региональной политикой и уровнем ее финансирования, а уровнем и характеристиками самого региона (наличием ресурсов и благоприятной конъюнктуры). Основываясь на полученных оценках, можно сделать вывод, что эффективность финансирования социальной сферы для регионов с различным уровнем социально-экономического развития носит четко выраженный дифференцированный характер в периоды экономической нестабильности. Финансирование антикризисных мер, направленных не на социально-экономическое развитие, а на поддержание текущей ситуации и смягчение негативных последствий, эффективнее для менее развитых регионов России. Как это произошло в 2009 г. и 2014 г. Противоположная картина наблюдалась в 2012 г. и 2016 г. относительно благополучных регионов России. Поэтому по мере решения кризисных явлений в социально-экономическом развитии слаборазвитого региона (высокая безработица, сверхвысокая смертность и др.) повышается актуальность расходов на развитие человеческого капитала. Однако это не означает, что только при достижении минимальных критериев социально-экономического развития необходимо финансировать долгосрочные проекты, просто они будут менее эффективными. В стабильные же периоды развития (2007 г., 2016 г.) эффективность финансирования социальной сферы в различных регионах находится примерно на одном уровне. Представленные расчеты продемонстрировали, что у регионов с невысокими значениями ИЧР (I группа) теснота корреляционной связи между множествами результирующих и финансовых показателей выше, чем у более развитых регионов. С увеличением значения ИЧР региона уменьшается влияние бюджетного финансирования на качество жизни его населения, что объясняется снижением эффективности финансирования социальной сферы у развитых регионов. Поэтому сложившийся механизм поощрения субъектов РФ, достигших максимального уровня социально-экономического развития, как уже отмечали многие исследователи, без учета дополнительных параметров эффективности финансирования, является не совсем справедливым.

1.2.4 Векторное энтропийное управление: задачи и методы решения

В открытых системах энтропия может, как возрастать, так и уменьшаться. Кроме того, системы с различными значениями энтропий хаотичности $H(Y)_V$ и самоорганизации $H(Y)_R$ могут иметь одинаковые значения энтропии $H(Y)$. Поэтому управление в форме максимизации или минимизации энтропии (1.2.3) может не привести к улучшению состояния стохастической системы, и необходимо рассматривать энтропию (1.2.3) в векторной форме

$$\mathbf{h}(\mathbf{Y}) = (h_V; h_R) = (H(\mathbf{Y})_V; H(\mathbf{Y})_R). \quad (1.2.18)$$

В этом случае управление заключается в переводе вектора энтропии системы из состояния $\mathbf{h}(\mathbf{Y}^0) = (h_V^0; h_R^0)$ в состояние $\mathbf{h}(\mathbf{Y}^*) = (h_V^*; h_R^*)$, соответствующее эффективному функционированию стохастической системы.

В общем случае задача управления имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m ((\sigma_i - \sigma_i^0)^2 + (\kappa_i - \kappa_i^0)^2) + \sum_{i=2}^m \left((R_{Y_m/Y_1 Y_2 \dots Y_{m-1}}^2 - R_{Y_m^0/Y_1^0 Y_2^0 \dots Y_{m-1}^0}^2) \right)^2 \rightarrow \min. \\ H(\mathbf{Y})_V = h_V^*; \\ H(\mathbf{Y})_R = h_R^* \end{array} \right.$$

Задача векторного энтропийного управления гауссовской стохастической системой состоит в том, чтобы направить энтропию из некоторой начальной точки $(h_V^0; h_R^0) = (H(\mathbf{Y}^0)_V; H(\mathbf{Y}^0)_R)$ с ковариационной матрицей Σ_0 в конечную точку $(h_V^*; h_R^*)$ при минимальном изменении ковариационной матрицы (см. рисунок 1.2.4). Задача имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(\Sigma) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m (\sigma_{ij}^0 - \sigma_{ij})^2 \rightarrow \min, \\ H(\mathbf{Y})_V = h_V^*, \\ H(\mathbf{Y})_R = h_R^*, \\ \sigma_{ij}^2 < \sigma_{ii}\sigma_{jj}, \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \sigma_{ii} > 0, \quad \forall 1 \leq i, j \leq m, \\ \Sigma > 0. \end{array} \right. \quad (1.2.19)$$

Последнее ограничение в (1.2.19) означает положительную определенность матрицы Σ . Отметим, что критерий эффективности в (1.2.19) может быть и иным, в зависимости от особенностей конкретной системы S .

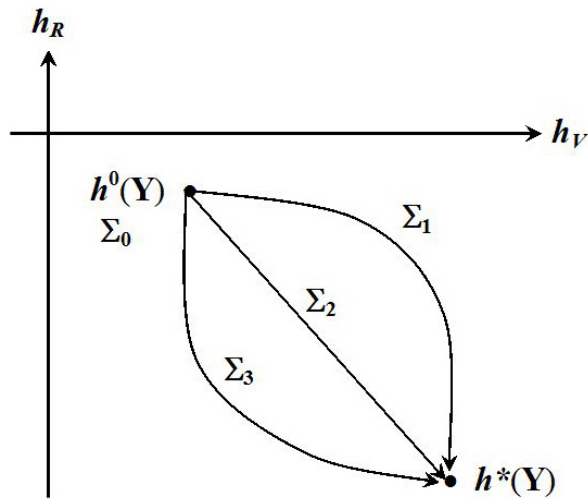


Рисунок 1.2.4 – Иллюстрация векторного энтропийного управления гауссовской стохастической системой

Для гауссовской стохастической системы задача (1.2.19) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} G(\Sigma) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m (\sigma_{ij}^0 - \sigma_{ij})^2 \rightarrow \min_{\sigma_{ij}} \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \ln((2\pi e)\sigma_{ii}) = h_v^*, \\ \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{\prod_{i=1}^m \sigma_{ii}} \cdot |\Sigma|\right) = h_R^*, \\ \sigma_{ij}^2 < \sigma_{ii}\sigma_{jj}, \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \sigma_{ii} > 0, \quad \forall 1 \leq i, j \leq m, \\ \Sigma > 0 \end{array} \right. \quad (1.2.20)$$

В результате решения задачи (1.2.20) мы получим новую ковариационную матрицу Σ^* , соответствующую эффективному состоянию системы и позволяющую с минимальными изменениями элементов ковариационной матрицы осуществить энтропийное управление. Однако реализовать управление непосредственно на основе ковариационной матрицы затруднительно из-за того, что ковариация зависит от трех величин – двух дисперсий и коэффициента корреляции Пирсона. Поэтому результат решения задачи (1.2.20) удобнее интерпретировать в терминах дисперсий и корреляционной матрицы, и вместо ковариационной матрицы Σ^* будем рассматривать вектор \mathbf{V}^* дисперсий компонент (элементы главной диагонали корреляционной матрицы) и корреляционную матрицу \mathbf{R}^* :

$$\mathbf{V}^* = (\sigma_{11}^*, \sigma_{22}^*, \dots, \sigma_{mm}^*), \quad \mathbf{R}^* = \begin{pmatrix} 1 & r_{12}^* & \dots & r_{1m}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1}^* & r_{m2}^* & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$r_{ij}^* = \frac{\sigma_{ij}^*}{\sqrt{\sigma_{ii}^* \sigma_{jj}^*}}; \quad i, j = 1, 2, \dots, m.$$

Сравнивая векторы дисперсий и корреляционные матрицы начального и конечного состояния, можно сделать вывод: дисперсии каких компонент нужно увеличить или уменьшить, или между какими компонентами необходимо усилить или ослабить взаимосвязь.

Отметим, что введенное энтропийное управление по сути представляет собой выработку управленческих рекомендаций с целью улучшения состояния исследуемой сложной системы.

Рассмотрим подробно частный случай двумерной гауссовской стохастической системы $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2)$ с ковариационной матрицей $\Sigma = \{\sigma_{ij}\}_{2 \times 2}$. Тогда энтропия вектора \mathbf{Y} равна

$$H(\mathbf{Y}) = H(\mathbf{Y})_V + H(\mathbf{Y})_R,$$

где

$$H(\mathbf{Y})_V = \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)^2 \sigma_{11} \sigma_{22}], \quad H(\mathbf{Y})_R = \frac{1}{2} \ln \left[1 - \frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \right].$$

В результате задача (1.2.20) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} G(\Sigma) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i}^2 (\sigma_{ij}^0 - \sigma_{ij})^2 \rightarrow \min_{\sigma_{ij}} \\ \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)^2 \sigma_{11} \sigma_{22}] = h_V^*, \\ \frac{1}{2} \ln \left[1 - \frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \right] = h_R^*, \\ \sigma_{12} = \sigma_{21}, \quad \sigma_{ii} > 0, \quad i = 1, 2. \end{array} \right. \quad (1.2.21)$$

Пример 4. Как пример, иллюстрирующий разницу между векторным и скалярным энтропийным управлением, рассмотрим моделирование системы, характеризующей безопасность производства, описанной в [15]. Были исследованы 17 угледобывающих

предприятий. Все предприятия были разделены на две группы: 1) предприятия с низким уровнем травматизма; 2) предприятия с высоким уровнем травматизма. Расчеты показали следующие результаты.

Для первой группы шахт с низким уровнем травматизма: $(h_V^{(1)}; h_R^{(1)}) = (2.417; -0.311)$, $H(Y^{(1)}) = 2.106$; для второй группы шахт с высоким уровнем травматизма: $(h_V^{(2)}; h_R^{(2)}) = (3.736; -0.7)$, $H(Y^{(2)}) = 3.036$.

Наша цель направить вектор энтропии для первой группы в точку соответствующей второй группе (точка эффективного функционирования системы).

Решив задачу векторного энтропийного управления (1.2.21), получим

$$(h_V^*; h_R^*) = (2.417; -0.311), H(Y^*) = 2.106. \quad (1.2.22)$$

А изменение ковариационной матрицы составит $G = 2.92$.

Далее, решив задачу минимизации скалярной энтропии (1.2.3) с условием, что изменение ковариационной матрицы не больше 2.92, получим:

$$(h_V^{**}; h_R^{**}) = (3.396; -2.778), H(Y^{**}) = 0.618. \quad (1.2.23)$$

Видим, что решения (1.2.22) и (1.2.23) задач энтропийного управления существенно различаются. Решение (1.2.22) дает результат, позволяющий с минимальными изменениями элементов ковариационной матрицы осуществить энтропийное управление. Полученное решение (1.2.23) не соответствуют приемлемым величинам энтропий хаотичности и самоорганизации. Действительно, энтропия хаотичности h_V^{**} оказалась слишком завышенной, а энтропия самоорганизации h_R^{**} – слишком заниженной по сравнению с требуемыми значениями.

Данный пример показывает, что скалярное энтропийное управление в ряде случаев оказывается не эффективным и нужно пользоваться векторным управлением. Более детально данный пример описан в четвертой главе.

Таким образом, установлено, что векторное энтропийное управление, в отличие от скалярного управления, позволяет реализовать предложенную в первой главе гипотезу устойчивого развития сложной системы. Это оказалось возможным благодаря тому, что при управлении энтропии хаотичности и самоорганизации рассматриваются независимо друг от друга.

1.2.5 Структура комплекса программ для исследования эффективности алгоритмов векторного энтропийного управления стохастическими системами

Для исследования эффективности предложенных алгоритмов векторного энтропийного управления многомерными стохастическими системами был разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов на языке R.

R – язык программирования и свободная программная среда для статистических вычислений и визуализации данных. R и его библиотеки реализуют широкий спектр статистических и графических методов, включая линейное и нелинейное моделирование, анализ временных рядов, классификацию, кластеризацию и другие. R легко расширяется через расширения и пакеты.

В сегодняшний день R широко применяется там, где принято использовать специализированные математические программы, такие как MATLAB или Mathematica. Географически R распространен тоже очень широко. Многие известные компании (например, Boeing, Яндекс, Samsung) используют R для машинного обучения и анализа данных. В последнее время R также стал завоевывать популярность и в России [29, 30].

Как интегрированная среда разработки для программирования на R используется RStudio [31]. RStudio Desktop доступен для всех современных операционных систем – для Linux, OS X и Windows. Среда разработки на языке R RStudio показана на рисунке 1.2.5.

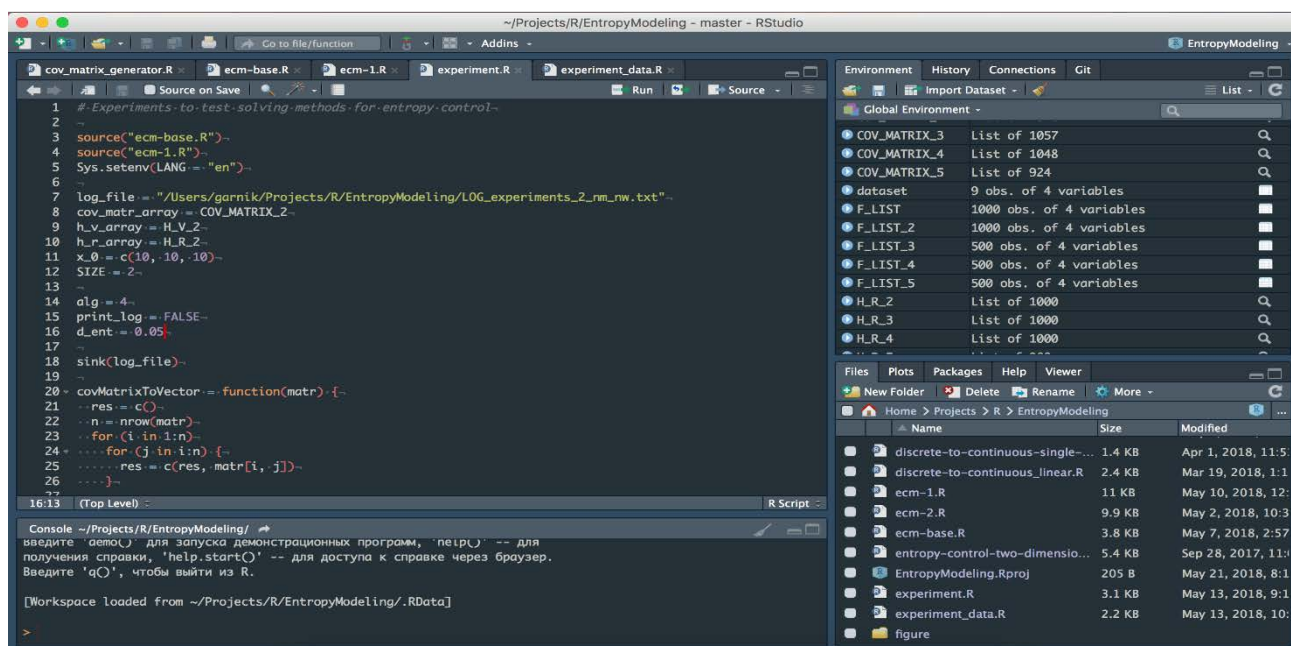


Рисунок 1.2.5 – Среда разработки на языке R RStudio

Структура проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов приведена на рисунке 1.2.6. Комплекс состоит из пяти отдельных программных компонент, написанных на языке R, три из которых взаимосвязаны. Перечислим их:

- cov_matrix_generator.R – программа, которая генерирует необходимые входные данные для проведения вычислительного эксперимента: ковариационные матрицы разных размерностей и векторы энтропии самоорганизации и хаотичности. Сгенерированные данные сохраняются в глобальной окружности данных;
- est-base.R – программный компонент, содержащий методы для вычисления целевой функции и ее градиента, а также методы для вычисления ограничений равенств и их градиентов. Здесь находятся еще и методы для вычисления энтропии хаотичности и энтропии самоорганизации;
- est-1.R – программный компонент, который содержит разные методы для решения задач нелинейной оптимизации без ограничений, и реализует несколько вариантов штрафных функций с применением этих методов;
- experiment.R – программа, которая применяет методы штрафных функций для решения задачи векторного энтропийного управления с разными входными данными. Статусы выполнения записываются в соответствующий лог-файл, а результаты сохраняются в глобальной окружности данных;
- experiment_data.R – программа для обработки выходных данных после выполнения программы experiment.R. Результаты обработки записываются в лог-файл.

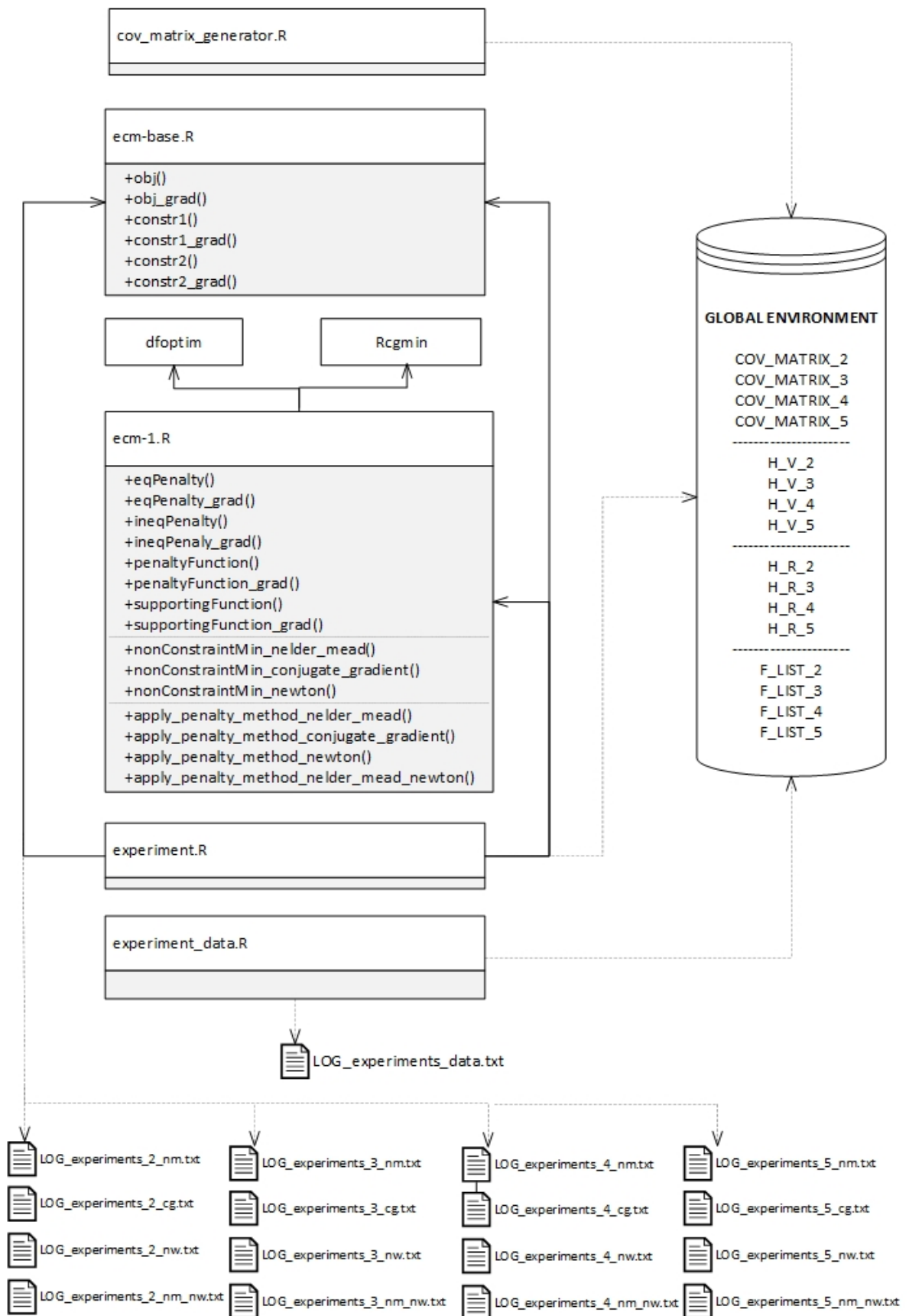


Рисунок 1.2.6 – Часть комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов

1.2.6 Алгоритмическое и программное обеспечение для векторного энтропийного управления гауссовскими стохастическими системами

Выше в (1.2.20) была сформулирована задача векторного энтропийного управления гауссовской стохастической системой. Отметим, что в (1.2.20) левая часть первого ограничения представляет собой вогнутую (выпуклую вверх) функцию. Это означает, что в задаче (1.2.20) ищется минимум выпуклой функции на невыпуклом множестве.

Для численного решения задачи (1.2.20) будет удобно преобразовать ограничения таким образом, чтобы они были определены на R^n .

Первое ограничение можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \ln((2\pi e)\sigma_{ii}) &= h_v^*, \\ \ln((2\pi e)^m \sigma_{11}\sigma_{22} \dots \sigma_{mm}) &= 2h_v^*, \\ (2\pi e)^m \sigma_{11}\sigma_{22} \dots \sigma_{mm} - e^{2h_v^*} &= 0, \\ \prod_{i=1}^m \sigma_{ii} - \frac{e^{2h_v^* - m}}{(2\pi)^m} &= 0. \end{aligned}$$

Второе ограничение преобразуем так:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{\prod_{i=1}^m \sigma_{ii}} \cdot |\Sigma|\right) &= h_R^*, \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^m \sigma_{ii}} \cdot |\Sigma| &= e^{2h_R^*}, \\ |\Sigma| - e^{2h_R^*} \prod_{i=1}^m \sigma_{ii} &= 0. \end{aligned}$$

После преобразований задача нелинейного программирования (1.2.20) примет следующий вид

$$\left\{ \begin{aligned} f(\Sigma) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m (\sigma_{ij}^0 - \sigma_{ij})^2 \rightarrow \min_{\sigma_{ij}}, \\ g_1(x) &= \prod_{i=1}^m \sigma_{ii} - \frac{e^{2h_v^* - m}}{(2\pi)^m} = 0, \\ g_2(x) &= |\Sigma| - e^{2h_R^*} \prod_{i=1}^m \sigma_{ii} = 0, \\ \sigma_{ij}^2 &< \sigma_{ii}\sigma_{jj}, \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \sigma_{ii} > 0, \quad \forall 1 \leq i, j \leq m, \\ \Sigma &> 0. \end{aligned} \right. \quad (1.2.24)$$

Преимущество задачи (1.2.24) в том, что для решения задачи нелинейного программирования без ограничений можно будет пользоваться численными методами поиска безусловного экстремума любого порядка.

Методы первого и второго порядка поиска безусловного экстремума работают эффективнее при наличии аналитических производных целевой функции и функций ограничений. Вычислим их.

Вначале вычислим производную определителя ковариационной матрицы

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nn} \end{pmatrix}; \sigma_{ij} = \sigma_{ji}; i, j = \overline{1, n}.$$

Вычислим производную $|\Sigma|$ по σ_{ii} :

$$\begin{aligned} |\Sigma|'_{\sigma_{ii}} &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} + \cdots + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} + \cdots \\ &\cdots + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot A_{ij} = \\ &= \begin{vmatrix} a_{ij} = 0; i \neq j \\ a_{ij} = 1; i = j \\ A_{ij} - \text{алгебраическое дополнение} \end{vmatrix} = A_{ii}. \end{aligned}$$

Затем вычислим производную $|\Sigma|$ по $\sigma_{ij}; i \neq j$:

$$\begin{aligned}
|\Sigma|'_{\sigma_{ij}} &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{k1} & \sigma_{k2} & \dots & \sigma_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} + \dots + \\
&\begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{m1} & \sigma_{m2} & \dots & \sigma_{mn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{k1} & \sigma_{k2} & \dots & \sigma_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} + \dots + \\
&\begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{m1} & \sigma_{m2} & \dots & \sigma_{mn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{vmatrix} = A_{ij} + A_{ji} = \left| \begin{array}{l} \text{От симметричности матрицы } \Sigma \\ \text{вытекает, что } A_{ij} = A_{ji} \end{array} \right| = 2 \cdot A_{ij}.
\end{aligned}$$

Для целевой функции получим:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m (\sigma_{ij}^0 - \sigma_{ij})^2 \right)'_{\sigma_{ij}} = 2 \cdot (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0).$$

Для первого ограничения имеем:

$$\frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{ij}} = \begin{cases} 0; & i \neq j \\ \sigma_{11} \dots \sigma_{i-1, i-1} \cdot \sigma_{i+1, i+1} \dots \sigma_{nn}; & i = j. \end{cases}$$

Для второго ограничения получим:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{ij}} &= \begin{cases} |\Sigma|'_{\sigma_{ij}}; & i \neq j \\ (|\Sigma|'_{\sigma_{ij}} - e^{2h_R^*}(\sigma_{11} \dots \sigma_{i-1, i-1} \cdot \sigma_{i+1, i+1} \dots \sigma_{nn})); & i = j \end{cases} = \\
&= \begin{cases} 2 \cdot A_{ij}; & i \neq j \\ A_{ij} - e^{2h_R^*}(\sigma_{11} \dots \sigma_{i-1, i-1} \cdot \sigma_{i+1, i+1} \dots \sigma_{nn}); & i = j. \end{cases}
\end{aligned}$$

Задачу (1.2.19) решаем с помощью метода штрафных функций [32]. Задачу нелинейного программирования без ограничений можно решать численными методами поиска безусловного экстремума любого порядка [33].

Пусть даны дважды непрерывно дифференцируемые целевая функция $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$ и функции ограничений $g_j(x) = 0, j = 1, \dots, m; g_j(x) \leq 0, j = m + 1, \dots, p$, определяющее множество допустимых решений X .

Идея метода штрафных функций заключается в сведении задачи на условный минимум к решению последовательности задач поиска безусловного минимума вспомогательной функции [32]:

$$F(x, r^k) = f(x) + P(x, r^k) \rightarrow \min_{x \in R^n},$$

где

$P(x, r^k)$ – штрафная функция,

r^k – параметр штрафа, задаваемый на каждой k -й итерации.

Это связано с возможностью применения эффективных и надежных методов поиска безусловного экстремума.

Удобство метода внешних штрафных функций состоит в том, что он обеспечивает решение из любой начальной точки.

На модельных данных выполним сравнение численных методов нелинейной оптимизации для решения задачи (1.2.24) векторного энтропийного управления. Воспользуемся методом статистического моделирования Монте-Карло.

Для проведения экспериментов необходимо сгенерировать ковариационные матрицы, которые соответствуют неэффективному состоянию системы, и конечные точки энтропии (h_V, h_R) , которые соответствуют эффективному состоянию и в которые надо направить вектор энтропии.

Для генерации вышеописанных ковариационных матриц предположим у нас есть независимые нормально распределенные случайные величины $U_1, U_2, U_3 \sim N(0; 1)$ с параметром сдвига (математическое ожидание) $m_{U_i} = 0$ и с параметром масштаба (дисперсия) $\sigma_{U_i}^2 = 1$.

Построим новые нормально распределенные случайные величины следующим образом:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}U_1, \\ X_2 = a_{21}U_1 + a_{22}U_2, \\ X_3 = a_{31}U_1 + a_{32}U_2 + a_{33}U_3, \end{cases}$$

где

$a_{ij} \neq 0$ случайные числа, например $a_{ij} \sim R[-5,5]$.

Заметим, что случайные величины X_1, X_2 и X_3 уже зависимые. Построим ковариационную матрицу для системы $\{X_1, X_2, X_3\}$.

$$\sigma_{11} = \text{cov}(X_1, X_1) = \text{cov}(a_{11}U_1, a_{11}U_1) = a_{11}^2 \cdot \text{cov}(U_1, U_1) = a_{11}^2,$$

$$\begin{aligned} \sigma_{12} = \sigma_{21} &= \text{cov}(X_1, X_2) = \text{cov}(a_{11}U_1, a_{21}U_1 + a_{22}U_2) = \\ &= \text{cov}(a_{11}U_1, a_{21}U_1) + \text{cov}(a_{11}U_1, a_{22}U_2) = \\ &= a_{11} \cdot a_{21} \cdot \text{cov}(U_1, U_1) + a_{11} \cdot a_{22} \cdot \text{cov}(U_1, U_2) = |\text{cov}(U_1, U_2) = \\ &0, \text{ поскольку } U_1 \text{ и } U_2 \text{ независимы} | = a_{11} \cdot a_{21}. \end{aligned}$$

Таким же образом:

$$\sigma_{13} = \sigma_{31} = \text{cov}(X_1, X_3) = \text{cov}(a_{11}U_1, a_{31}U_1 + a_{32}U_2 + a_{33}U_3) = a_{11} \cdot a_{31},$$

$$\sigma_{22} = \text{cov}(X_2, X_2) = \text{cov}(a_{21}U_1 + a_{22}U_2, a_{21}U_1 + a_{22}U_2) = a_{21}^2 + a_{22}^2,$$

$$\begin{aligned} \sigma_{23} = \sigma_{32} &= \text{cov}(X_2, X_3) = \text{cov}(a_{21}U_1 + a_{22}U_2, a_{31}U_1 + a_{32}U_2 + a_{33}U_3) = \\ &= a_{21} \cdot a_{31} + a_{22} \cdot a_{32}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{33} &= \text{cov}(X_3, X_3) = \text{cov}(a_{31}U_1 + a_{32}U_2 + a_{33}U_3, a_{31}U_1 + a_{32}U_2 + a_{33}U_3) = \\ &= a_{31}^2 + a_{32}^2 + a_{33}^2. \end{aligned}$$

С помощью вышеперечисленных вычислений мы получим ковариационную матрицу для трехмерной гауссовской случайной величины:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}. \quad (1.2.25)$$

Обратим внимание, что для построения ковариационной матрицы (1.2.25) не потребовалось сгенерировать нормально распределенные случайные величины U_1, U_2, U_3 .

Следующий шаг – построение конечной эффективной точки энтропии (h_V^*, h_R^*) для заданной ковариационной матрицы Σ^0 со соответствующим вектором энтропии (h_V^0, h_R^0) . Возьмем $\Delta h_V > 0$ и $\Delta h_R < 0$, например $\Delta h_V \sim R[4; 8]$; $\Delta h_R \sim R[-8; -4]$. Тогда: $h_V^* = h_V^0 + \Delta h_V$, $h_R^* = h_R^0 + \Delta h_R$.

Таким образом, мы построили вектор (h_V^*, h_R^*) , соответствующей эффективной точки энтропии.

Для вычислительного эксперимента по вышеописанному методу было сгенерировано порядка тысячи ковариационных матриц Σ^0 , и соответствующие этим матрицам конечные эффективные точки энтропии (h_V^*, h_R^*) . Такие матрицы и точки энтропии были сгенерированы для двухмерных, трехмерных, четырехмерных и пятимерных систем. Таким образом, задача состоит в том, чтобы направить вектор энтропии в точку (h_V^*, h_R^*) с минимальными изменениями ковариационной матрицы Σ^0 .

Задача нелинейной оптимизации с ограничениями (1.2.24) решается с помощью метода штрафных функций. С учетом замечания о не выпуклости множества допустимых решений, сделанного после формулировки задачи (1.2.20), выбор порядка численного метода решения задачи нелинейной оптимизации требует проведения исследования. Поэтому для решения задачи без ограничений были использованы методы разного порядка – нулевого, первого и второго. Из методов нулевого порядка был выбран метод Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника), из методов первого порядка – метод сопряженных градиентов, из методов второго порядка – метод Ньютона. Для реализации этих методов оптимизации без ограничений были применены готовые функции, присутствующие в языке R и в его пакетах.

Для сравнения рассматриваемых алгоритмов используем метод статистических испытаний. Как уже описали, был сгенерирован большой набор задач вида (1.2.20) для двухмерных, трехмерных, четырехмерных и пятимерных систем.

В начале исследования определим задаваемые параметры для метода штрафных функций. Эмпирическим путем были выбраны следующие значения:

- $r^0 = 1; C = 3; \varepsilon = 10^{-4}$,
- максимальное количество итераций – 100,
- начальная точка поиска была выбрана вне множества допустимых решений – для всех размерностей это вектор, где каждый элемент равно 10,
- решение считается найденным, если для целевого вектора энтропии (h_V^*, h_R^*) и для вектора найденного решения $(\widehat{h}_V, \widehat{h}_R)$ $|h_V^* - \widehat{h}_V| < 0.05$ и $|h_R^* - \widehat{h}_R| < 0.05$.

На основе выбранных параметров проведем сравнение эффективности их работы для задачи (1.2.19). Для этого все методы были применены для всех размерностей для 500 разных начальных ковариационных матриц и конечных точек. Полученные сравнительные характеристики результатов работы алгоритмов приведены в таблицах 1.2.1–1.2.3.

Таблица 1.2.1 – Проценты успешных попыток

Размерность	Процент успешных попыток				
	Метод Нелдера-Мида	Метод сопряженных градиентов	Метод Ньютона	Методы Нелдера-Мида и Ньютона	Методы сопряженных градиентов и Ньютона
2	98.2	95.8	48.2	94	88.4
3	99.6	80.2	31.4	93	81.2
4	96.8	78.8	18	93.2	86.2
5	93.4	85.4	7.2	88.8	89.2

Таблица 1.2.2 – Среднее время расчета в секундах

Размерность	Среднее время расчета, с				
	Метод Нелдера-Мида	Метод сопряженных градиентов	Метод Ньютона	Методы Нелдера-Мида и Ньютона	Методы сопряженных градиентов и Ньютона
2	0.732	0.657	0.08	0.449	0.428
3	1.382	1.687	0.273	0.641	0.728
4	1.622	0.956	0.253	0.92	0.727
5	3.97	1.008	0.362	1.605	0.604

Таблица 1.2.3 – Средние расчетные оценки изменений каждой компоненты ковариационной матрицы

Размерность	Средняя расчетная оценка изменений каждой компоненты ковариационной матрицы				
	Метод Нелдера-Мида	Метод сопряженных градиентов	Метод Ньютона	Методы Нелдера-Мида и Ньютона	Методы сопряженных градиентов и Ньютона
2	88.8	95.15	97.2	91	100
3	8.95	28.8	20.3	9.32	29
4	3.1	5.1	10.8	3.16	5.1
5	1.77	2.6	3.5	1.75	2.65

Анализируя данные первых трех колонок, приведенные в таблице 1.2.1, можно сделать вывод, что наивысший процент успешных попыток показывает метод нулевого порядка Нелдера-Мида. Чем выше порядок метода, тем ниже процент успешных попыток.

Посмотрев на первые три колонки таблице 1.2.2, можем сделать вывод, что метод Нелдера-Мида находит более эффективные решения, чем методы высшего порядка. Это связано с тем, что методы первого и второго порядка гарантируют сходимость последовательности решений к точке минимума для сильно выпуклых функций [31]. А при наличии «овражностей» у целевой функции эти методы начинают работать нестабильно.

Несмотря на недостатки, методы первого и второго порядка, а особенно метод Ньютона, работают быстрее, чем метод Нелдера-Мида. На практике принят следующий подход. При первых нескольких итераций метода штрафных функций для решения задачи безусловной оптимизации использовать методы нулевого или первого порядка, а потом продолжить с применением методов второго порядка. Был исследован такой подход тоже. Для первых 7 итераций был использован метод Нелдера-Мида или метод сопряженных градиентов, а затем метод Ньютона. Данные для такого подхода приведены в четвертой и пятой колонках таблиц 1.2.1–1.2.3. Можно заметить, что комплексный метод Нелдера-Мида и Ньютона работает намного быстрее метода Нелдера-Мида, и не сильно уступает по проценту успешных попыток и по средним расчетным оценкам изменений компонент.

Таким образом, можно заключить:

- 1) Метод Нелдера-Мида выигрывает у остальных по точности, но проигрывает по быстродействию. В задачах, где быстродействие не играет важную роль и время выполнения программы не критично, то стоит пользоваться методом Нелдера-Мида.
- 2) Комплексный метод Нелдера-Мида и Ньютона работает быстрее метода Нелдера-Мида, и не сильно уступает по точности. Поэтому, если метод используется в системах реального времени, где необходимо быстрое выполнение алгоритма, то стоит пользоваться именно такой подход.
- 3) Не советуется использовать отдельно взятые методы высших порядков, особенно для систем больших размерностей.

Поскольку у нас задача многоэкстремальная, то целесообразно для нахождения глобального экстремума выбрать разные начальные точки. Для этого был использован метод наилучшей пробы. Суть метода состоит в следующем. Задается начальная точка \mathbf{x}^0 . Каждая последующая точка находится по формуле: $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + t_k \xi^k$, где $t_k > 0$ – величина шага; ξ^k – случайный вектор единичной длины, определяющий направление поиска; k – номер итерации. На текущей итерации при помощи генерирования случайных векторов ξ^* получается M точек, лежащих на гиперсфере радиуса t_k с центром в точке \mathbf{x}^k . Среди полученных точек выбирается точка, в которой значение функции наименьшее. Если в выбранной точке значение функции меньше, чем в центре, то дальнейший поиск

продолжается из этой точки. Иначе центр считается самой эффективной начальной точкой. Для нашей задачи эмпирическим путем был выбран для двухмерной системы $M = 12$, для трехмерной системы $M = 24$ и $t_k = 3$. Исследования для методов Нелдера-Мида и сопряженных градиентов показали, что получаем более высокий процент успешных попыток и более низкие оценки изменений компонент, но алгоритм работает намного медленнее. Результаты приведены в таблице 1.2.4.

Таблица 1.2.4 – Расчетные показатели для методов Нелдера-Мида и сопряженных градиентов

Размерность	Метод Нелдера-Мида			Метод сопряженных градиентов		
	Процент успешных попыток	Среднее время расчета, сек	Средняя расчетная оценка изменений каждой компоненты ковариационной матрицы	Процент успешных попыток	Среднее время расчета, сек	Средняя расчетная оценка изменений каждой компоненты ковариационной матрицы
2	99.1	10.54	76.7	97	9.24	87.15
3	99.75	19.382	7.4	84.6	18.92	21.8

1.2.7 Практическое применение векторного энтропийного управления

Ниже рассмотрим два примера практического применения векторного энтропийного управления сложными стохастическими системами.

В первом примере приведены численные результаты решения задачи векторного энтропийного управления гауссовскими стохастическими системами разных размерностей.

Во втором примере рассмотрен пример повышения безопасности производства на угледобывающих предприятиях за счет векторного энтропийного управления.

1.2.7.1 Численные примеры задачи векторного энтропийного управления

Рассмотрим конкретные численные примеры задачи векторного энтропийного управления гауссовскими стохастическими системами. Применим рассмотренные методы решения этой задачи для трехмерных и пятимерных систем.

1. Рассмотрим трехмерную гауссовскую стохастическую систему со следующей ковариационной матрицей:

$$\begin{pmatrix} 1.08 & -1.41 & 0.73 \\ -1.41 & 10.38 & -2.38 \\ 0.73 & -2.38 & 1.02 \end{pmatrix}.$$

Тогда вектор энтропии для этой системы будет

$$(h_v, h_R) = (5.47; -0.73).$$

Предположим наша цель направить вектор энтропии в конечную точку (10.67; -5.74), соответствующая эффективному состоянию системы, при минимальном изменении ковариационной матрицы.

Результаты выполнения программ приведены в таблице 1.2.5.

Таблица 1.2.5 – Результаты векторного энтропийного управления для трехмерной гауссовской системы

Алгоритм решения	Ковариационная матрица, соответствующая эффективному состоянию системы	Значение целевой функции	Время выполнения, сек
1	2	3	4
Метод Нелдера-Мида	$\begin{pmatrix} 62.3 & 30.12 & 54.36 \\ 30.12 & 80.63 & -15.49 \\ 54.36 & -15.49 & 73.95 \end{pmatrix}$	18049.76	2.52
Метод сопряженных градиентов	$\begin{pmatrix} 70.58 & 67.88 & 28.77 \\ 67.88 & 68.13 & 14 \\ 28.77 & 14 & 77.25 \end{pmatrix}$	19833.89	0.72
Метод Ньютона	$\begin{pmatrix} 105 & 78.6 & 85.99 \\ 78.6 & 58.81 & 63.87 \\ 85.99 & 63.87 & 60.16 \end{pmatrix}$	34706.25	0.25
Методы Нелдера-Мида и Ньютона	$\begin{pmatrix} 62.51 & 30.94 & 54.29 \\ 30.94 & 80.81 & -14.69 \\ 54.29 & -14.69 & 73.53 \end{pmatrix}$	18060.99	1.55
Методы сопряженных градиентов и Ньютона	$\begin{pmatrix} 70.58 & 67.88 & 28.77 \\ 67.88 & 68.13 & 14 \\ 28.77 & 14 & 77.25 \end{pmatrix}$	19833.88	0.7

2. Рассмотрим пятимерную гауссовскую стохастическую систему со следующей ковариационной матрицей:

$$\begin{pmatrix} 3.36 & -5.02 & -3.89 & 1.35 & -8.29 \\ -5.02 & 9.96 & 1.65 & 0.86 & 5.88 \\ -3.89 & 1.65 & 14.7 & -12.16 & 25.33 \\ 1.35 & 0.86 & -12.16 & 22.41 & -15.28 \\ -8.29 & 5.88 & 25.33 & -15.28 & 62.18 \end{pmatrix}.$$

Тогда вектор энтропии для этой системы будет

$$(h_v, h_R) = (13.81; -2.68).$$

Предположим наша цель направить вектор энтропии в конечную точку (18.45; -9.75), соответствующая эффективному состоянию системы, при минимальном изменении ковариационной матрицы.

Результаты выполнения программ приведены в таблице 1.2.6.

Таблица 1.2.6 – Результаты расчета для пятимерной гауссовской системы

Алгоритм решения	Ковариационная матрица, соответствующая эффективному состоянию системы	Значение целевой функции	Время выполнения, сек
1	2	3	4
Метод Нелдера-Мида	$\begin{pmatrix} 81.83 & 26.36 & 16.89 & 60.52 & 28.24 \\ 26.36 & 93.43 & 33.41 & 49.16 & 65.67 \\ 16.89 & 33.41 & 90.68 & 41.33 & 68.62 \\ 60.52 & 49.16 & 41.33 & 88.52 & 15.15 \\ 28.24 & 65.67 & 68.62 & 15.15 & 118.28 \end{pmatrix}$	45245.38	0.89
Метод сопряженных градиентов	$\begin{pmatrix} 207.28 & 1.75 & 1.17 & 6.66 & -18.67 \\ 1.75 & 86.14 & 9.04 & 20.38 & 24.7 \\ 1.17 & 9.04 & 90.89 & -9.34 & 33.4 \\ 6.66 & 20.38 & -9.34 & 64.43 & -52.48 \\ -18.67 & 24.7 & 33.4 & -52.48 & 69.41 \end{pmatrix}$	57468.18	0.61
Метод Ньютона	Решение не найдено		
Методы Нелдера-Мида и Ньютона	$\begin{pmatrix} 81.83 & 26.36 & 16.89 & 60.52 & 28.24 \\ 26.36 & 93.43 & 33.41 & 49.16 & 65.67 \\ 16.89 & 33.41 & 90.68 & 41.33 & 68.62 \\ 60.52 & 49.16 & 41.33 & 88.56 & 15.15 \\ 28.24 & 65.67 & 68.62 & 15.15 & 118.28 \end{pmatrix}$	45245.38	0.8

Продолжение таблицы 1.2.6

1	2	3	4
Методы сопряженных градиентов и Ньютона	$\begin{pmatrix} 207.28 & 1.75 & 1.17 & 6.66 & -18.67 \\ 1.75 & 86.14 & 9.03 & 20.38 & 24.7 \\ 1.17 & 9.03 & 90.89 & -9.34 & 33.40 \\ 6.66 & 20.38 & -9.34 & 64.43 & -52.48 \\ -18.67 & 24.7 & 33.40 & -52.48 & 69.41 \end{pmatrix}$	57468.18	0.58

Из таблиц 1.2.5 и 1.2.6 можно сделать вывод, что по качеству и быстрдействию лучший результат показывает комплексный метод Нелдера-Мида и Ньютона. Но, как было показано выше, в общем случае метод Нелдера-Мида по качеству выигрывает у комплексного метода.

1.2.7.2 Повышение безопасности производства на угледобывающих предприятиях

Вернемся к примеру 4 (см. п. 1.2.4) векторного энтропийного управления, характеризующего безопасность производства. По системе первичных показателей с помощью факторного анализа сформированы два обобщенных фактора (главных компонент), объясняющие 88% всей вариации исходных признаков: Y_1 – фактор, характеризующий организацию безопасного производства; Y_2 – фактор, отражающий профессионализм персонала.

Все предприятия были разделены на две группы: 1) предприятия с низким уровнем травматизма (коэффициент частоты травмирования от 5,8 до 16,5 случаев на 1000 человек); 2) предприятия с высоким уровнем травматизма (коэффициент частоты травмирования от 21,7 до 49,7 случаев на 1000 человек. Результаты расчета по группам предприятий:

$$H(\mathbf{Y}^{(1)}) = H(\mathbf{Y}^{(1)})_V + H(\mathbf{Y}^{(1)})_R = 2.417 - 0.3117 = 2.106,$$

$$H(\mathbf{Y}^{(2)}) = H(\mathbf{Y}^{(2)})_V + H(\mathbf{Y}^{(2)})_R = 3.736 - 0.7 = 3.036.$$

В целом получили, что у предприятий второй группы энтропия выше, чем в первой. Для энтропии самоорганизации $H(\mathbf{Y}^{(2)})_R < H(\mathbf{Y}^{(1)})_R$, нестабильность работы во 2-й группе в некоторой степени компенсируется за счет более активного вмешательства руководства («административного ресурса»).

Продолжим рассмотрение примера. Для первой группы шахт с низким уровнем травматизма имеем:

$$\Sigma^{(1)} = \begin{pmatrix} 0.067 & 0.447 \\ 0.447 & 6.414 \end{pmatrix}, (h_V^{(1)}; h_R^{(1)}) = (2.417; -0.311), H(\mathbf{Y}^{(1)}) = 2.106.$$

Для второй группы шахт с высоким уровнем травматизма:

$$\Sigma^{(2)} = \begin{pmatrix} 0.325 & 2.13 \\ 2.13 & 18.53 \end{pmatrix}, (h_V^{(2)}; h_R^{(2)}) = (3.736; -0.7), H(Y^{(2)}) = 3.036.$$

Приведем векторы дисперсий и корреляционные матрицы для первой и второй группы:

$$V^{(1)} = (0.067; 6.414), R^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0.68 \\ 0.68 & 1 \end{pmatrix},$$

$$V^{(2)} = (0.325; 18.52), R^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0.87 \\ 0.87 & 1 \end{pmatrix}.$$

Сравнивая векторы дисперсий и корреляционные матрицы, можно заметить, что разница между группами в том, что для первой группы более низкий разброс у факторов, чем и объясняется более низкое значение энтропии хаотичности для этой группы, и, что у первой группы более слабая взаимосвязь между факторами, этим объясняется более низкое значение энтропии самоорганизации.

Решив задачу (1.2.21) векторного энтропийного управления получим:

$$\Sigma^* = \begin{pmatrix} 0.023 & 0.447 \\ 0.447 & 18.53 \end{pmatrix}, \quad (1.2.26)$$

$$(h_V^*; h_R^*) = (2.417; -0.311), H(Y^*) = 2.106.$$

Изменение ковариационной матрицы составило

$$G(\Sigma^*) = (0.023 - 0.325)^2 + (0.447 - 2.13)^2 + (18.523 - 18.53)^2 = 2.92.$$

Приведем вектор дисперсий и корреляционную матрицу для решения (1.2.26):

$$V^* = (0.023; 18.53), R^* = \begin{pmatrix} 1 & 0.68 \\ 0.68 & 1 \end{pmatrix}.$$

Можем сделать вывод: чтобы приблизить состояние второй группы шахт к состоянию первой группы необходимо уменьшить дисперсию фактора Y_1 и ослабить взаимосвязь между Y_1 и Y_2 , то есть надо уменьшить разброс фактора, характеризующего организацию безопасного производства, и уменьшить взаимосвязь с фактором, отражающим профессионализм персонала примерно на 20%. Это означает более конкретную и четкую организацию производства. Организация безопасного производства должна быть более системной и не должна сильно зависеть от степени профессионализма и компетентности персонала. Для этого в целом требуется решения следующих задач:

- выявление опасностей и вредностей на каждом рабочем месте и в каждой технологической операции,
- исключение опасностей путем выбора более безопасных вариантов технологии и оборудования,
- защита от оставшихся опасностей и вредностей путем подбора наиболее эффективных средств коллективной и индивидуальной защиты, применения автоматизации и дистанционного управления,
- оценка возможных аварийных ситуаций, локализация и ликвидация опасностей и вредностей при авариях.

Решение (1.2.26) дает результат, позволяющий с минимальными изменениями элементов ковариационной матрицы $\Sigma^{(2)}$ осуществить энтропийное управление.

Далее, решая задачу минимизации энтропии, получим:

$$\Sigma^{**} = \begin{pmatrix} 0.165 & 1.744 \\ 1.744 & 18.49 \end{pmatrix}, \quad (1.2.27)$$

$$(h_V^{**}; h_R^{**}) = (3.396; -2.778), H(\mathbf{Y}^{**}) = 0.618.$$

Видим, что решения задач (1.2.26) и (1.2.27) существенно различаются. Полученное решение (1.2.27) задачи минимизации энтропии не соответствуют приемлемым величинам энтропий хаотичности и самоорганизации. Действительно, энтропия хаотичности $H(\mathbf{Y}^{**})_V = 3.396$ оказалась завышенной, энтропия самоорганизации $H(\mathbf{Y}^{**})_R = -2.778$ – заниженной по сравнению с требуемыми значениями. Еще мы получили, что наоборот, надо сильно усилить связь между компонентами, и что дисперсии не так сильно меняются.

Данный пример показывает, что скалярное энтропийное управление в ряде случаев оказывается не эффективным и нужно при выработке управленческих решений пользоваться векторным управлением.

1.2.8 Выводы к разделу 1.2

- 1) Введена энтропия взаимосвязи двух случайных векторов, количественно характеризующая тесноту их корреляционной взаимосвязи.
- 2) Показана взаимосвязь между дифференциальной энтропией и корреляционно-регрессионным анализом, приведены формулы, раскрывающие эту взаимосвязь.

- 3) Приведен пример практического использования показателя взаимозависимости между случайными векторами на примере оценки эффективности финансирования социальной сферы в регионах.
- 4) Введена скалярная мера взаимозависимости между непрерывными произвольно распределенными случайными векторами.
- 5) Введенная мера достаточно просто интерпретируема, позволяет однозначно оценивать тесноту взаимозависимости между случайными векторами произвольных размерностей.
- 6) Простота полученных аналитических выражений позволяет практически применять предложенную меру на выборках достаточно малого объема.
- 7) Предложено энтропийное управление многомерными стохастическими системами на основе векторной энтропийной модели.
- 8) Для распространенного класса гауссовских стохастических систем описана задача векторного энтропийного управления на основе входной информации в виде ковариационной матрицы случайного вектора.
- 9) Показано, что векторное энтропийное управление во многих случаях оказывается эффективнее скалярного управления. Приведен содержательный пример, иллюстрирующий преимущества векторного энтропийного управления перед скалярным.
- 10) Разработан алгоритм численного решения задачи векторного энтропийного управления.

2 Программное обеспечение, позволяющее синтезировать анализ потока данных мониторинга с датчиков и сенсоров умных городских инфраструктур с результатами комплексных оценок их текущего состояния и безопасности компетентными экспертными группами, и алгоритмами принятия решений по минимизации последствий природных и техногенных аварий

2.1 Введение

Концепция умных городов активно обсуждается последние 10 лет. Рыночные игроки и общественные институты рассматривают умные города как общую тему для обсуждения и новую зону кооперации. Заявления городских властей о стратегии развития умного города повышает его статус, привлекает инвестиции и локализует высокотехнологичный бизнес, а перед компаниями встает задача решения локальных проблем в городском хозяйстве.

Поэтому больше 10 лет назад глобальные IT-компании вышли на рынок умных городов, предлагая городским администрациям комплексные многофункциональные решения «под ключ» для управления городской средой. На практике реализовать и масштабировать на различные города данный холистический подход удалось не в полной мере. Пока концепция умного города – это набор изолированных вертикальных решений, не учитывающий взаимозависимость инфраструктур, тем самым не позволяющий говорить об устойчивости и «живучести» каждой из них. Интегрировать их на базе единых цифровых платформ – актуальная и сложная задача для бизнеса и городских властей [1].

В России интерес к тематике умного города растет с каждым годом, в том числе потому, что многие города подходят к пределам надежности и функциональности существующей инфраструктуры. Уже опробованные решения были точечными, а опыт интеллектуализации одной из городских систем сложно перенести на другие. Напротив, в концепции умного города последний рассматривается как единая система, который проектируется и управляется на новом уровне эффективности, будь то в сугубо технологическом или социально-урбанистическом аспекте [2].

В современных тенденциях концепция умного города не замыкается только на технологиях как главном факторе развития. По-настоящему умными считаются города, в которых созданы условия для роста человеческого капитала [3]. Чем больше возможностей и чем благоприятнее условия для развития, тем выше уровень умного города. Данный подход лег в основу европейского видения умного города и был в 2007 г. описан Центром региональной науки Венского технологического университета (рисунок 2.1).

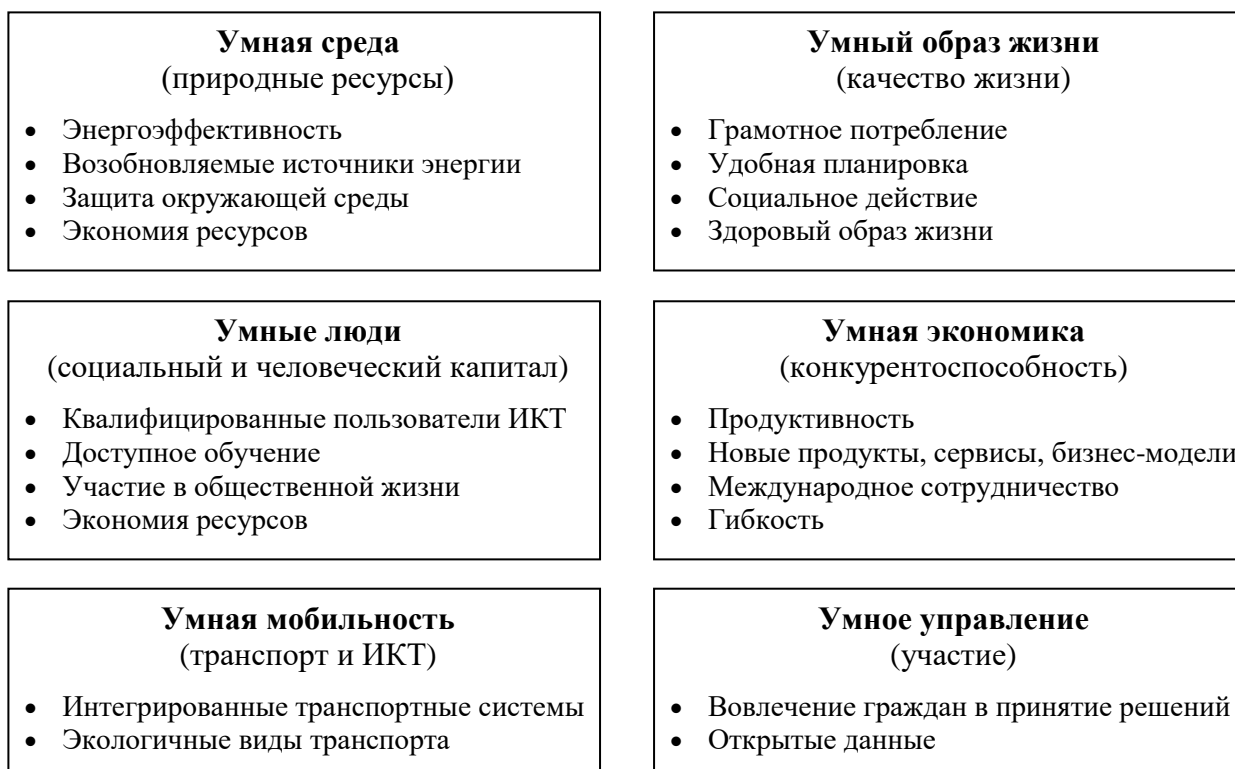


Рисунок 2.1 – Схема европейского видения умного города

Умный город стратегически подходит к развитию этих шести сфер, при этом разумно использует ресурсы и активность своих жителей, действующих осознанно и независимо. Разработчики подхода отмечают, что главный принцип – придерживаться комплексного подхода к развитию, а количество компонентов может варьироваться.

По определению сообщества и форума «Мировые умные города» (World Smart City, 2016), созданному Международной организацией по стандартизации (ISO), Международной электротехнической комиссией (IEC) и Международным союзом электросвязи (ITU), *умный город устойчив (sustainable) и способен к восстановлению (resilient)*. Устойчивость подразумевает, что текущие потребности можно удовлетворить, не подрывая возможностей будущих поколений, – в экологическом, социальном и экономическом аспекте. Способность к восстановлению означает, что город успешно адаптируется к изменению условий, в которых существует [2].

Руководители регионов стран во всем мире сталкиваются с все возрастающей проблемой обеспечения благополучия своих территорий, городов и общин в связи с ростом широкого спектра природных и техногенных угроз (землетрясения, сели, наводнения, ураганы, засухи, загазованность, промышленные аварии и катастрофы, социальная напряженность, террористическая деятельность и т.п.). Как добиться заявляемой цели –

сделать свои регионы инклюзивными, безопасными, живучими и устойчивыми к развитию, что позволит им стать умными?

В настоящее время наблюдаются четыре глобальные тенденции: (1) цифровизация (BigData); (2) урбанизация; (3) мобильность; (4) увеличение продолжительности жизни в добром здравии. Самыми крупномасштабными сдвигами характеризуется глобальная цифровизация (ГЦ).

ГЦ характеризуется активной интернетизацией транспорта, энергетики, строительства, ЖКХ, медицины, образования, а также всех отраслей сельского хозяйства. Она привела к появлению *локального интернета* (предприятия) – симбиоза последних достижений микроэлектроники, компьютерной техники, искусственного интеллекта и цифровой технологии. В результате этого возник Интернет вещей (ИВ) (Internet of things – IoT) или интернет-индустрия, *базовой инфраструктурой* которой становится интернет-цифровая платформа, которая обеспечивает эффективное взаимодействие всех объектов промышленного (и сельскохозяйственного) производства на основе Интернета. Одновременно с этим были разработано множество специализированных платформ для обеспечения взаимовыгодного взаимодействия между производителями и потребителями в широком смысле этих слов. Так родилась платформенная модель бизнеса, которая упразднила посредников в бизнесе. Частным случаем этого стала так называемая *блокчейн технология*, изначально предназначавшаяся для надежного учета активов и операций с ними. Она становится надежной экономической оболочкой в сети Интернет, обслуживающей онлайн платежи, обмен активами, выпуск и исполнение умных контрактов. В связи с этим возникла и новая прикладная наука количественной оценки уровня доверия к человеку (theory of trust).

Цифровизация позволила реализоваться идее *цифровых двойников*, когда стало возможным наряду с физическими (реальными) технологиями производства и эксплуатации изделий создать их цифровые двойники с целью обеспечения их надежности и безопасности (к примеру, так был создан президентский автомобиль *Аурус* из серии «Кортеж» для Президента РФ В.В. Путина).

Развитие всеобщей цифровизации имеет и свою негативную сторону. Согласно теории больших систем, чем сложнее система (в нашем случае, регион, который в ходе цифровизации приобретает все большее число умных сервисов), тем она более уязвима по отношению к внешним и внутренним воздействиям, нагрузкам и стрессорам. По мере «поумнения» регион будет становиться все более *сложной системой систем*. При этом каждая служба региона, сама по себе, является *критичной инфраструктурой*, так как без ее нормального функционирования эффективность всего региона будет под угрозой.

В ходе цифровизации всех социальных структур и служб региона и его экономики, они будут постепенно превращаться во все более сложные автоматизированные инфраструктурные системы, всецело зависящие от бесперебойного потока информации, ее обработки в реальном масштабе времени и своевременного принятия научно-обоснованных решений. Цифровизация региона будет неизбежно сопровождаться ростом *уязвимости* этих взаимозависимых критичных инфраструктур, масштаба хаоса и величины ущерба от неизбежных аварий и катастроф, в том числе, каскадного типа. В результате могут возникнуть такие новые угрозы как:

- резкое усложнение региональной системы инфраструктур и неизбежный рост энтропии хаоса;
- появление новых типов каскадных аварий, связанных с:
 - 1) нарушением непрерывности или искажением потока информации;
 - 2) прерыванием снабжения цепочки взаимозависимых сервисов продуктами (материальными компонентами), необходимых для бесперебойного их функционирования;
 - 3) прерыванием снабжения взаимозависимых инфраструктур сервисами (в том числе, электроэнергией, водой, теплом);
- увеличение ущербов от сельскохозяйственных, биологических, промышленных и транспортных (в том числе, каскадных) аварий, происходящих в «умной среде»;
- появление синхронных отказов (одновременное появление нескольких независимых инцидентов);
- возможные проявления *социальной напряженности* из-за сложности идентификации места и размера бедствия и достоверных и полных оценок всех его материальных и социальных последствий.

Цифровизация сама по себе не способна ликвидировать эти угрозы, она для этого вообще не предназначена и может только создавать новые, ранее не существовавшие риски. Необходимо до или в ходе цифровизации придать уже существующим и вновь создаваемым компонентам инфраструктуры свойства живучести при их функционировании в условиях постоянно обновляемой среды.

Создание всеобъемлющей, но невидимой вычислительной сети (ambient computing) всей ноосферы создает предпосылки к тому что в ближайшем будущем ею начнет управлять сверхразум – искусственный интеллект, превосходящий человеческий в невообразимое число раз.

Описанный выше экзистенциальный фон мировой цивилизации объективно показывает, что лицам, принимающим решения (ЛПР) на уровне регионов, необходимо

учитывать перечисленные выше мировые тенденции при планировании своей деятельности и для позитивной дальней перспективы развития своего региона.

В условиях, когда способность общества предотвратить гибель людей и ухудшение качества окружающей среды конечна и ограничена его способностью создавать общественное богатство, глобальной проблемой, требующей своего решения, является минимизация территориального, регионального ущерба. Это эквивалентно уменьшению интегральных последствий аварий и катастроф за счет применения всей гаммы методов и средств защиты от вновь возникающих, в том числе, климатических и возможных социально-экономических угроз.

Для России, объективно отстающей от развитых держав в плане инноваций, возник абсолютный императив ускоренного создания целенаправленных фундаментальных и прикладных знаний и, на их основе, умных устройств, инфраструктур и целых систем. Это также предъявило к фундаментальной и прикладной науке гораздо более высокие требования по качеству и скорости производства новых знаний.

Наиболее важным следствием цифровизации в контексте рассматриваемой нами проблемы является проблема создания умных регионов, где проживающее там население осуществляет свою креативную, когнитивную и социальную деятельность. Речь идет о методологии придания региону свойств живучести для превращения его в умный устойчивый к развитию регион на основе использования программно-аппаратного комплекса, состоящего из умных сенсоров, датчиков и пакета алгоритмов.

2.2 Концепция «живой лаборатории» для управления умным городом

Для создания умного города необходимо иметь *его цифровую виртуальную модель*, на которой можно отрабатывать методом компьютерного моделирования все свойства, относящиеся к живучести и безопасности.

Цифровая виртуальная модель города состоит из так называемых сервисов и служб, которым принадлежат все инфраструктуры города. Сервис – это группа мероприятий с целью удовлетворения потребностей и увеличения качества жизни жителей территории. Например: интернет, мобильная связь, электро- и водоснабжение, канализация, больницы и т.д. Сервисы также разделяются по секторам, например, интернет и мобильная связь относятся к сектору «телекоммуникации», электро-, водоснабжение и канализация – к «инженерным сетям», больницы и поликлиники – к «здравоохранению» и т.д. Сервисам принадлежат инфраструктуры, это ключевые объекты территории, предоставляющие определенные услуги. Например, конкретная больница или поликлиника, АЗС, силовой

трансформатор, вышка сотовой связи, водопроводная или канализационная сеть и т.д. Каждая инфраструктура привязывается к территории с помощью географических координат.

Неотъемлемой частью виртуальной модели умного города является человеческий фактор в виде живой лаборатории (рисунок 2.2) в составе [4]:

- Стратегического Совета стейкхолдеров города, включая Администрацию (Главу) города, полномочного представителя Правительства РФ по региону, и главного специалиста города по живучести (Region Chief Resilient Officer – RCRO),
- Совета руководителей всех служб и бизнесов города,
- группы исполнения дорожной карты Стратегического Совета,
- активных жителей города.

В ситуационной комнате группа специалистов по живучести обеспечивает полноценную и всестороннюю поддержку принятия стратегических и тактических решений, вырабатываемых на всех этажах городской власти.

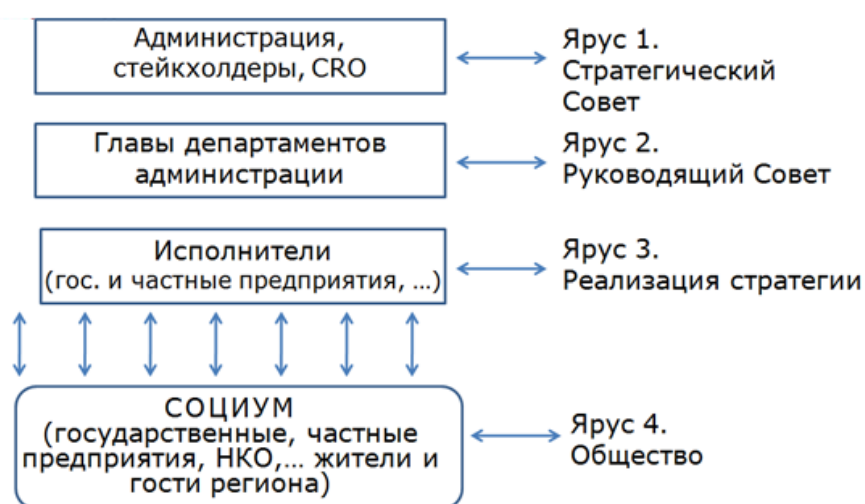


Рисунок 2.2 – Живая лаборатория

2.3 Определение взаимозависимости инфраструктур

Инфраструктуры создаются для обеспечения безопасности и защиты жизни и стабильного развития экономики и общества. Такие системы призваны обеспечивать:

- стабильное функционирование какого-либо потенциально опасного объекта

(ПОО), кластера или целой отрасли сельского хозяйства или индустрии,

- поддерживать жизнедеятельность населения и устойчивое развитие территории его проживания.

Критичные инфраструктуры являются одновременно своего рода *посредником и проводником* между окружающей средой и обществом. Катастрофа или авария, произошедшая на взаимозависимых критичных инфраструктурах (ВКИ), немедленно распространяется как на окружающую среду, так и на население региона.

Типовой регион (город) является сложной системой с неоднородной скоростью роста и иерархической инфраструктурой, каждый элемент которой адаптировался к нуждам региона в момент своей постройки (десятки, а то и сотни лет тому назад).

С ростом числа служб и сервисов, других систем критичных инфраструктур повышается вероятность проявления каскадных аварий с высокими скрытыми затратами (экономический и неэкономический ущерб от наводнений, засухи, эпизоотий, разрывов газо- водопроводов, нарушения целостности линий электропередач и т.д.). Риски проявления таких аварий могут быть смягчены и минимизированы путем их анализа.

Для анализа каскадного развития аварии необходима *оценка взаимозависимости инфраструктур*. Процесс выявления зависимостей между *сервисами* и/или их *инфраструктурами* (для оценки их критичности) производится на основе матрицы взаимозависимостей. Эта матрица симметрична, в ее строках и столбцах находятся названия сервисов. Каждая ячейка определяет степень зависимости услуг потребителей (представленных в строках) от услуг поставщиков (представленных в столбцах), То есть, в ячейках указано влияние одного сервиса на другой, столбец считается поставщиком услуг, а строка – потребителем.

Изначально матрица взаимозависимостей пустая. Представителям (экспертам) каждого сервиса (службы) предлагается заполнить матрицу взаимозависимостей. Предлагается несколько вариантов заполнения матрицы:

- связь отсутствует: указывает, что потребитель не зависит от поставщика услуг,
- минимум: указывает, что у потребителя останется минимальное количество служб, если поставщик услуг перестанет работать,
- отказ: указывает на то, что потребитель услуг перестанет работать в случае отказа поставщика.

Если зависимость не может быть выражена на простом уровне, ее можно определить на более глубоком уровне, используя следующие варианты:

Связь ИНФ → СЕРВ: позволяет определить состояние сервиса, когда инфраструктура сервиса-поставщика перестала работать. Так как у сервиса может быть

несколько инфраструктур, то поочередно для каждой инфраструктуры сервиса-поставщика, необходимо определить состояние сервиса-потребителя при отказе этой инфраструктуры.

Связь СЕРВ → ИНФ: используется для определения того, что происходит с инфраструктурами сервиса-потребителя, когда сервис-поставщик перестает работать. Здесь для каждой инфраструктуры сервиса-потребителя необходимо определить ее состояние в случае отказа сервиса-поставщика.

Связь ИНФ → ИНФ: используется для определения того, что происходит с инфраструктурами сервиса-потребителя, когда инфраструктуры сервиса-поставщика отказывают. Поочередно для каждой инфраструктуры сервиса-поставщика, необходимо определить состояние всех инфраструктур сервиса-потребителя при отказе этой инфраструктуры.

Такая матрица с установленными связями между отдельными сервисами города позволит создать единый устойчивый живучий механизм, т.к. при заранее известных зависимостях есть возможность предусмотреть и минимизировать влияние при возникновении чрезвычайной ситуации на одном объекте на другие зависимые от него. В этом состоит основная цель применения технологии живой лаборатории – оценить и выявить взаимозависимости городских сервисов.

Заполнение конечной матрицы взаимозависимости по всем экспертам производится с помощью метода экспертных оценок.

2.4 Методы экспертных оценок в «живой лаборатории»

Методы экспертных оценок – обширная часть теории принятия решений, а само *экспертное оценивание* – процедура получения оценки на основе мнения специалистов (экспертов) с целью последующего выбора. Применяется в случаях:

- проблем высокой сложности,
- ранее не возникающих прецедентах,
- недостатка имеющейся информации,
- невозможности математической формализации процесса решения.

В таких ситуациях приходится обращаться к рекомендациям компетентных специалистов (экспертов), отлично знающих проблему. Их решение задачи, аргументация, формирование количественных оценок, обработка последних формальными методами получили название метода экспертных оценок.

Существует две группы экспертных оценок:

- 1) индивидуальные оценки – основаны на использовании мнения отдельных экспертов, независимых друг от друга,
- 2) коллективные оценки – основаны на использовании коллективного мнения экспертов.

Методы коллективной работы экспертной группы предполагают получение общего мнения в ходе совместного обсуждения решаемой проблемы. Иногда эти методы называют методами прямого получения коллективного мнения. Основное преимущество этих методов заключается в возможности разностороннего анализа проблем. Недостатками этих методов является сложность процедуры получения информации, сложность формирования группового мнения по индивидуальным суждениям экспертов, возможность давления авторитетов в группе. Методы коллективной работы включают методы «мозговой атаки», сценариев, деловых игр, совещаний и «суда», «дерева целей» [5].

Методы получения индивидуального мнения членов экспертной группы основаны на предварительном сборе информации от экспертов, опрашиваемых независимо друг от друга, с последующей обработкой полученных данных. К этим методам можно отнести методы анкетного опроса, интервью и методы Дельфи. Основные преимущества этих методов состоят в их оперативности, возможности в полной мере использовать индивидуальные способности эксперта, отсутствие давления авторитетов и в низких затратах на экспертизу. Главным их недостатком является высокая степень субъективности получаемых оценок из-за ограниченности знаний одного эксперта.

В работе методы экспертных оценок разделены на группы по аудиториям, к которым они применимы. Группы сформированы согласно четырехъярусной структуре модели живой лаборатории.

2.4.1 Методы экспертных оценок стратегического совета: администрация, стейкхолдеры (Ярус 1)

Метод «мозговой атаки». Этот метод получил распространение как «метод систематической тренировки творческого мышления», нацеленный на открытие новых идей и достижение согласия группы людей на основе интуитивного мышления. Методы этого типа известны также под названием коллективной генерации идей, мозгового штурма, дискуссионные методы. Все эти методы основаны на свободном выдвижении идей, направленных на решение проблемы. Затем из этих идей отбираются наиболее ценные.

Суть метода. Создаются две группы экспертов: генераторов идей и аналитиков. В состав первой группы включаются люди с богатым воображением, как правило,

специалисты из смежных, с решаемой проблемой, областей. Организуется собрание группы, которым руководит ведущий. Основной задачей ведущего является всемерное поощрение инициативы и творчества, свободы выдвижения новых идей, даже на первый взгляд сомнительных или абсурдных, недопущение критики. Все выдвинутые идеи фиксируются и передаются группе аналитиков. Группа аналитиков включает в основном специалистов по данной проблеме, анализирующих предложения и выбирающих среди них наиболее ценные.

«Мозговой штурм» проводится в два этапа: этап генерации идей и этап практического анализа выдвинутых идей. Каждый из этапов осуществляется по конкретным принципам, отражающим его назначение и суть, определяющим его эффективность.

Разновидности метода «мозговой атаки». Одним из них является *метод коллективного обсуждения фиксированных идей.* Суть его заключается в том, что все участники творческого процесса фиксируют на специальных карточках свои идеи относительно решения какой-либо проблемы. Далее карточки смешиваются и раздаются в случайном порядке всем участникам. Каждый из них должен дать гласную оценку попавшей к нему идее. Вокруг этого может возникнуть полемика, которая позволяет уточнить идею или отбросить ее как нереальную. В процессе полемики могут возникать и новые идеи.

Существует также метод *«обратного мозгового штурма»*, при котором группа генерации идей проводит как бы обратную работу. Она выявляет проблемы при оценке ситуации, не оценивая возможности их решения. Метод *«двойного мозгового штурма»* предполагает подготовительную работу в генерации идей, затем их постановку без анализа и оценки, и, наконец, аналитическое обсуждение. Здесь, как правило, параллельно с творческой группой работает группа экспертов, следящих за ходом полемики и улавливающих ценные мысли.

Также существует и метод *«конференции идей»*, который реализуется по специальной технологии их презентации.

Достоинством метода «мозговой атаки» является высокая оперативность получения требуемого решения. Основной его недостаток – сложность организации экспертизы, так как иногда невозможно собрать вместе требуемых специалистов, создать непринужденную атмосферу и исключить влияние должностных взаимоотношений.

Метод сценариев. Метод сценариев представляет собой совокупность правил по изложению в письменном виде предложений специалистов по решаемой проблеме. Сценарий представляет собой документ, содержащий анализ проблемы и предложения по

ее реализации. Предложения вначале пишут эксперты индивидуально, а затем они согласуются и излагаются в форме единого документа.

Сценарий – это гипотетическая картина последовательного развития во времени и пространстве событий, составляющих эволюцию объектов управления. Обычно сценарии разрабатываются для прогнозирования развития различных систем, предварительной оценки эффективности и возможного хода выполнения сложной операции и включают описание всех этапов жизненного цикла системы или операции. В дальнейшем такое описание является основой для разработки формализованных моделей различных этапов развития системы. Иначе говоря, сценарий является своеобразной описательной моделью, с которой начинается исследование любой системы в соответствии с этапами моделирования.

Сценарий предусматривает не только содержательные рассуждения, помогающие не упустить детали, которые невозможно учесть в формальной модели (в этом собственно и заключается основная роль сценария), но и содержит, как правило, результаты количественного технико-экономического или статистического анализа с предварительными выводами. Группа экспертов, подготавливающая сценарий, пользуется обычно правом получения необходимых справок от предприятий и организаций, необходимых консультаций. Написание сценария – это метод, который устанавливает логическую последовательность событий, чтобы показать, как, исходя из существующей ситуации, может шаг за шагом разворачиваться будущее состояние.

Цель метода – получение научно обоснованного прогноза для принятия управленческих решений.

Процедура метода – определение гарантированного прогноза, т.е. границ, за которые развитие системы выйти не может по объективным причинам.

В целях снижения трудоемкости расчетов для дальнейшего анализа может быть отобрано лишь небольшое число сценариев. Часто ограничиваются тремя сценариями: пессимистическим, наиболее вероятным и оптимистическим. Предположим, что вероятности этих сценариев установлены. Тогда схема расчета показателей, устанавливающих соотношение уровней доходности и риска, будет следующая:

Каждому сценарию присваивается вероятность их осуществления – ρ_n, ρ_v, ρ_o , причем $\rho_n + \rho_v + \rho_o = 1$. По каждому сценарию рассчитывается показатель эффективности P (среднее ожидаемое значение проекта) – P_n, P_v, P_o . Рассчитывается среднее ожидаемое значение проекта, являющееся математическим ожиданием показателя P по трем сценариям, взвешенным по присвоенным вероятностям:

$$\bar{P} = P_B \cdot \rho_{\Pi} + P_B \cdot \rho_B + P_0 \cdot \rho_0, \quad (2.1)$$

где

\bar{P} – среднее ожидаемое значение показателя проекта.

Формула (1) может быть обобщена и на случай произвольного числа (m) анализируемых сценариев:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^{i=m} P_i \cdot \rho_i, \quad \sum_{i=1}^{i=m} \rho_i = 1, \quad (2.2)$$

где

P_i – показатель P по i -му сценарию,

ρ_i – вероятность осуществления i -го сценария.

Рассчитывается среднеквадратичное отклонение σ показателя P по m сценариям:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=m} (\bar{P} - P_i)^2 \cdot \rho_i}. \quad (2.3)$$

Рассчитывается коэффициент вариации показателя P по формуле

$$k_B = \frac{\sigma}{\bar{P}}. \quad (2.4)$$

Основным критериальным показателем экономической эффективности проекта в условиях неопределенности и риска является математическое ожидание P , рассчитываемое по формуле (2.1) или (2.2).

Если:

1) $P > 0$, то проект следует считать эффективным,

2) $P < 0$ – неэффективным.

При выборе оптимального варианта проекта из нескольких рассматриваемых с учетом факторов неопределенности и риска могут использоваться показатели оценки уровня риска – среднеквадратическое отклонение σ и коэффициент вариации k_B . Чем выше σ (и соответственно k_B), тем выше уровень риска проекта и наоборот.

Метод «дерева целей». Идея метода впервые была предложена У. Черменом в связи с проблемами принятия решений в промышленности. Термин «дерево» подразумевает использование иерархической структуры, полученной путем деления общей цели на

подцели, а их, в свою очередь, на более детальные составляющие, которые можно называть подцелями нижележащих уровней или, начиная с некоторого уровня, – функциями. Как правило, термин «дерево целей» используется для иерархических структур, имеющих отношения строго древовидного порядка. При использовании метода «дерева целей» в качестве средства принятия решений часто вводят термин «дерево решений».

Процесс разработки дерева целей напоминает строительство пирамиды, только в отличие от каменных пирамид эта строится не снизу вверх, а сверху вниз. Строя «пирамиду целей», разработчик от ее вершины передвигается вниз, каждый раз с учетом новой точки зрения возвращается к сделанному ранее, корректируя и подправляя его. При этом имеется в виду сложный характер взаимосвязей между целями каждого уровня и различных уровней, так что дерево целей приходится корректировать все время по мере его построения.

В процессе формулировки каждой цели необходимо с самого начала проверять построенную пирамиду по следующим вопросам: имеются ли в принципе средства достижения этих целей; имеются ли в принципе ресурсы для создания этих средств.

2.4.2 Методы экспертных оценок руководящего совета: Главы департаментов (Ярус 2)

Метод совещаний. Метод совещаний (комиссий, круглого стола) – самый простой и традиционный. Он предполагает проведение совещания или дискуссии с целью выработки единого коллективного мнения по решаемой проблеме. В отличие от метода «мозговой атаки» каждый эксперт может не только высказывать свое мнение, но и критиковать предложения других. В результате такого тщательного обсуждения уменьшается возможность ошибок при выработке решения.

Достоинством метода является простота его реализации. Однако на совещании может быть принято ошибочное мнение одного из участников в силу его авторитета, служебного положения, настойчивости или ораторских способностей.

Метод «суда». Метод «суда» является разновидностью метода совещаний и реализуется по аналогии с ведением судебного процесса. В роли «подсудимых» выступают выбираемые варианты решения; в роли «судей» – лица, принимающие решение; в роли «прокуроров» и «защитников» – члены экспертной группы. Роль «свидетелей» выполняют различные условия выбора и доводы экспертов. При ведении такого «судебного процесса» отклоняются или принимаются те или иные решения.

Метод «суда» целесообразно использовать при наличии нескольких групп экспертов, придерживающихся различных вариантов решения.

2.4.3 Методы экспертных оценок исполнителей: государственные и частные предприятия (Ярус 3)

Деловые игры. Деловые игры основаны на моделировании функционирования социальной системы управления при выполнении операций, направленных на достижение поставленной цели. В отличие от предыдущих методов, где экспертные оценки формируются в ходе коллективного обсуждения, деловые игры предполагают активную деятельность экспертной группы, за каждым членом которой закреплена определенная обязанность в соответствии с заранее составленными правилами и программой.

Деловые игры широко используются для принятия решений при управлении промышленными предприятиями и другими организациями и направлены также на исследование поведения и обучение специалистов в заданной обстановке.

Основным достоинством деловых игр является возможность выработки решения в динамике с учетом всех этапов исследуемого процесса при взаимодействии всех элементов общественной системы управления. Недостаток заключается в сложности организации деловой игры в условиях, приближенных к реальной проблемной ситуации.

Метод интервью. Предполагает беседу руководителя экспертизы с экспертом, в ходе которой перед ним по заранее разработанной программе ставятся сформулированные вопросы. Особенностью метода интервью является то, что руководитель и эксперт находятся в непосредственном контакте.

Условно выделяют три формы интервью: свободная беседа, когда дополнительные вопросы формируются в ходе интервью; беседа по типу «вопрос – ответ», когда определен ограниченный круг вопросов и на них необходимо дать четкий ответ; перекрестный опрос, когда эксперта спрашивают несколько исследователей.

Достоинством метода интервью является возможность получить сведения, малодоступные анкетному опросу. Однако на результаты опроса может оказать влияние личность руководителя, способность эксперта к контакту, быстрота и острота его мышления и другие факторы.

Метод Дельфи. Этот метод представляет собой итеративную процедуру анкетного опроса. Название этого метода обязано древнегреческому городу Дельфи, известному своими мудрецами – предсказателями будущего. Этот метод относится к классу методов групповых экспертных оценок и представляет собой итеративную процедуру анкетного

опроса. Он был разработан в США в 1964 г. сотрудниками научно-исследовательской корпорации РЭНД О. Хелмером и Т. Гордоном [7].

При этом соблюдается требование отсутствия личных контактов между экспертами и обеспечения их полной информацией по всем результатам оценок после каждого тура опроса с сохранением анонимности оценок, аргументации и критики.

Процедура метода включает несколько последовательных этапов (туров) опроса. На первом этапе производится индивидуальный опрос экспертов, обычно в форме анкет. Эксперты дают ответы, не аргументируя их. Затем результаты опроса обрабатываются, и формируется коллективное мнение группы экспертов, выявляются и обобщаются аргументации в пользу различных суждений. На втором – вся информация сообщается экспертам и, их просят пересмотреть оценки и объяснить причины своего несогласия с коллективным суждением. Новые оценки вновь обрабатываются, и осуществляется переход к следующему этапу. Практика показывает, что после трех-четырех этапов ответы экспертов стабилизируются и процедура прекращается.

При использовании метода Дельфи учитываются следующие требования:

- группы экспертов должны быть стабильными и численность их должна удерживаться в разумных рамках,
- время между турами опросов должно быть не более месяца,
- вопросы в анкетах должны быть тщательно продуманы и четко сформулированы,
- число туров должно быть достаточным, чтобы обеспечить всем участникам возможность ознакомиться с причиной той или иной оценки, а также для критики этих причин,
- должен проводиться систематический отбор экспертов.

Достоинством метода Дельфи является использование обратной связи в ходе опроса, что значительно повышает объективность экспертных оценок. Однако данный метод требует значительного времени на реализацию всей многоэтапной процедуры.

На первом этапе формируется представительная группа экспертов, перед которыми выдвигается комплекс задач (древо целей) и предлагается выставить свои оценки (в баллах) каждому элементу (фактору), влияющему на решение поставленных задач.

Затем мнения экспертов обобщаются с помощью формулы:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij} k_i}{\sum_{i=1}^m k_i}, \quad (2.5)$$

где

x_{ij} – оценка относительной важности (в баллах), выставленная i -м экспертом j -у элементу,

k_i – коэффициент компетентности i -го эксперта, учитывающий степень знакомства с обсуждаемым вопросом (k_3) и аргументированность ответа (k_a):

$$k_i = \frac{k_3 + k_a}{2}, \quad (2.6)$$

где

$i = 1, 2, \dots, m$ – номера экспертов,

m – число экспертов,

$j = 1, 2, \dots, n$ – номера изучаемых элементов,

n – число элементов древа целей.

Среднее значение ответа варьирует между 1 и 100 баллами. Чем больше \bar{x}_j , тем важнее элемент. Надежность результата определяется с помощью дисперсии экспертных оценок. Чем меньше дисперсия (разбросанность оценок), тем согласованнее ответы и надежнее результат.

Опрос экспертов является анонимным, каждый эксперт не знает, кто еще привлечен к этой работе, и не ознакомлен с ответами других экспертов.

Если разбросанность мнений слишком велика, то экспертов знакомят с противоположными точками зрения и их обоснованием. Затем каждому эксперту предлагается изменить свою оценку. Вся процедура повторяется заново до тех пор, пока оценки не сблизятся настолько, что их средняя может считаться надежной.

Показатель степени надежности эксперта исчисляется по формуле:

$$R = \frac{n}{N}, \quad (2.7)$$

где

N – общее число оценок, произведенных данным экспертом,

n – число правильных оценок.

2.4.4 Методы экспертных оценок общества (Ярус 4)

Метод анкетного опроса. Данный метод предполагает разработку специальных анкет, содержащих перечень вопросов по решаемой задаче. Анкеты размножаются по количеству экспертов и направляются по соответствующим адресам.

В процессе заполнения анкет необходимо выполнить следующие требования: обеспечить взаимную независимость суждений экспертов; при необходимости проверить однозначное понимание экспертами вопросов анкеты; не допускать заполнения одной анкеты несколькими экспертами; анкету заполнять и отправлять в заданные сроки.

Анкеты собирает руководитель экспертизы, обрабатываются они с использованием статистических методов обработки экспертной информации.

Основными достоинствами метода анкетного опроса являются возможность сбора большого объема информации за достаточно короткий срок и независимость суждений экспертов. К недостаткам следует отнести сложность разработки эффективной анкеты, содержащей обоснованный перечень вопросов.

2.5 Описание сервиса анализа экспертных оценок в «живой лаборатории»

Для начала расчета необходимо выбрать ярус живой лаборатории (рисунок 2.3), члены которого будут участвовать в оценке:

Ярус 1. Стейкхолдеры;

Ярус 2. Главы департаментов;

Ярус 3. Государственные и частные предприятия;

Ярус 4. Общество.

Выбираем соответствующий задаче ярус живой лаборатории.

Главная / Свердловская область / Екатеринбург

Выберите ярус

Государственные и частные предприятия

Выбрать

Рисунок 2.3 – Выбор яруса

В зависимости от выбранного яруса откроется поле для выбора соответствующей методологии расчета (таблица 2.1 и рисунок 2.4).

Таблица 2.1 – Методы расчета экспертных оценок в соответствии с ярусами

Ярус 1	На выбор: Метод сценариев Метод дельфи Метод анкетного опроса
Ярус 2	Метод сценариев
Ярус 3	Метод дельфи
Ярус 4	Метод анкетного опроса

Главная / Свердловская область / Екатеринбург
/ Государственные и частные предприятия

Выберите метод

Метод Дельфи

Рисунок 2.4 – Выбор метода

Ниже представлен алгоритм расчета для каждого сценария.

Метод сценариев.

Цель метода – получение научно-обоснованного прогноза для принятия управленческих решений.

Исходные данные (рисунок 2.5):

m – число экспертов,

x_{\min}, x_{\max} – диапазон оценок (например от 0 до 10).

После ввода числа экспертов появляется таблица (рисунок 2.6), где по каждому эксперту заполняются:

x – оценка эксперта,

$K_{1,i}$ – коэффициент компетентности i -го эксперта, учитывающий степень знакомства с обсуждаемым вопросом ($\sum_{i=1}^m K_{1,i} = 1$)

$K_{2,i}$ – коэффициент компетентности i -го эксперта, аргументированность оценки ($\sum_{i=1}^m K_{2,i} = 1$).

Главная / Свердловская область / Екатеринбург / Стейкхолдеры / Метод сценариев

Метод сценариев

Количество экспертов

5

Диапазон оценок эксперта

От 0 До 10

OK

Рисунок 2.5 – Ввод исходных данных метода сценариев

Главная / Свердловская область / Екатеринбург / Стейхолдеры / Метод сценариев / Расчеты

Метод сценариев - расчеты

Диапазон оценок экспертов: от 0 до 10

Сумма значений коэффициентов компетентности экспертов должна быть равной 1!

Показатели Эксперт	1	2	3	4	5
X	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
K ₁	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
K ₂	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
P	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Рисунок 2.6 – Ввод оценок экспертов

Далее автоматически выполняются расчеты: p_i – вероятность развития сценария i -го эксперта, $p_i = (K_{1,i} + K_{2,i})/2$ ($\sum_{i=1}^m p_i = 1$); математическое ожидание $M(X) = \sum_{i=1}^m x_i \cdot p_i$; дисперсия, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации оценки.

Результат выводится в виде таблицы.

Метод Дельфи.

Исходные данные (рисунок 2.7):

m – число экспертов,

$L_{\text{норм}}$ – целевая длина доверительного интервала.

Главная / Свердловская область / Екатеринбург
/ Государственные и частные предприятия / Метод Дельфи

Метод Дельфи

Количество экспертов
10

Целевая длина доверительного интервала $L_{норм}$
1

OK

Рисунок 2.7 – Ввод исходных данных метода Дельфи

В зависимости от количества экспертов, откроется таблица, в которую необходимо занести информацию об экспертах и их оценках.

Проводится первый тур голосования. Вводятся (рисунок 2.8):

- o – оценка эксперта – численная оценка по вопросу голосования; оценка может быть как из какого-то диапазона, так и без ограничений,
- s – самооценка эксперта – численное значение из заранее определённого диапазона, которое показывает, насколько объективным или весомым считает свое мнение эксперт (диапазон от 1 до 10),
- комментарий эксперта – для принятия решения другими экспертами в следующем туре.

Появляются подробные расчеты:

- среднее арифметическое всех самооценок

$$S = (\sum_{i=1}^m s_i) / m, \quad (2.8)$$

- среднее арифметическое поставленных оценок

$$O = (\sum_{i=1}^m o_i) / m, \quad (2.9)$$

- средневзвешенная оценка – вычисляется как сумма произведений оценки эксперта на его самооценку, деленная на сумму всех самооценок

$$B = (\sum_{i=1}^m o_i s_i) / (\sum_{i=1}^m s_i). \quad (2.10)$$

Главная / Свердловская область / Екатеринбург / Государственные и частные предприятия / Метод Дельфи / Расчеты

Метод Дельфи

Количество экспертов: 10
L_{норм}: 1

Номер эксперта	Самооценка	Оценка	Комментарий
1	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text" value="9"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text" value="8"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text"/>
4	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text"/>
5	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text"/>

Рисунок 2.8 – Ввод оценок экспертов

Максимальная o_{\max} и минимальная оценка o_{\min} . Определяются верхняя $o_{3/4}$ и нижняя $o_{1/4}$ выборочные квартили оценок. Рассчитывается доверительный интервал, нижней границей которого будет минимальная оценка + нижняя квартиль, верхней – максимальная оценка – верхняя квартиль:

$$D_{\text{верх}} = o_{\max} - o_{3/4}, \quad (2.11)$$

$$D_{\text{нижн}} = o_{\min} + o_{1/4}. \quad (2.12)$$

Вычисляется длина доверительного интервала L:

$$L = D_{\text{верх}} - D_{\text{нижн}}. \quad (2.13)$$

Далее всем экспертам рассылаются результаты. Они изучают их, в частности комментарии других экспертов. Проводится второй тур, в котором эксперт может остаться при своем мнении или поменять его. Свою новую оценку эксперт должен прокомментировать. После чего проводится второй тур голосования и вводятся новые оценки экспертов.

По новым данным вновь вычисляются все числовые характеристики и цикл повторяется до тех пор, пока эксперты не придут к общему мнению и будет выполняться неравенство $L \leq L_{\text{норм}}$.

Результатом будет средневзвешенная оценка последнего тура расчетов.

Метод анкетного опроса.

Исходные данные:

m – число экспертов,

n – число вопросов,

x_{\min}, x_{\max} – диапазон оценок (например, от 0 до 10).

После ввода числа экспертов появляется таблица, где по каждому j -му вопросу вводятся оценки экспертов x_{ij} .

Каждому сценарию присваивается равная вероятность осуществления

$$p_i = 1/m (\sum_{i=1}^m p_i = 1). \quad (2.14)$$

Далее автоматически по каждому j -му вопросу выполняются расчеты: математическое ожидание $M_j(X) = \sum_{i=1}^m x_{ij} \cdot p_i$, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации оценки.

Результат выводится в виде таблицы.

2.6 Использование датчиков/сенсоров для мониторинга и оперативной передачи информации

Датчики являются средством оценки индикаторов ключевых городских процессов. Их показания позволяют получить представление о состоянии и живучести города в реальном времени.

Для ввода датчика в систему (рисунок 2.9) используются следующие его параметры:

- название,
- единицы измерения,
- инфраструктура, которая контролируется датчиком,
- сервис, к которому относится инфраструктура датчика,
- описание датчика,
- структура порога: на выбор предоставляется три вида порога датчика (см. рисунок 2.9). После чего отображаются поля для ввода пороговых значений. В первом и во втором случае это будет два текстовых поля, а в случае последнего – четыре.

Рисунок 2.9 – Окно создания датчика инфраструктуры

Таким образом, датчики, как и их инфраструктуры, привязываются к территории с помощью географических координат их инфраструктур.

2.7 Передача информационных потоков от датчиков/сенсоров

2.7.1 Верификация показаний датчиков перед их передачей в «живую лабораторию»

Схема передачи информации ЛПР от датчиков/сенсоров производится с помощью блокчейн-технологии. Блокчейн – это определенный алгоритм, непрерывная последовательность (цепочка) блоков, хранящих информацию. Копии цепочек блоков хранятся и обрабатываются на множестве разных компьютеров. Блокчейн – инструмент, с помощью которого есть возможность хранить данные транзакций и верифицировать процессы любого рода. Главный принцип работы данной технологии – прозрачность совершаемых операций, с недоступностью их изменить лицам, не имеющим к ним санкционированного доступа.

В данном отчете используется блокчейн технология по версии *Эмеркоин*, которая в настоящее время используется для точного выполнения следующих функций: (1) подтверждение данных, кадастровый учет; (2) подтверждение аттестатов и дипломов, тайм-стемп (регистрация времени создания документов); (3) компьютерная безопасность (системы доступа пользователей, DNS-адресация сайтов в интернете, защищенная IP-телефония, товары и собственность, подлинность товаров и услуг, права владения цифровой собственностью).

С точки зрения городских инфраструктур блокчейн:

- сеть пользователей с полной историей транзакций между ними,
- состоит из цепочки блоков высокой защищенности,
- позволяет участникам обмениваться коинами, информацией и подтверждать историю транзакций.

Возможности платформы:

- верификация диагностики, мониторинга критичных региональных инфраструктур всех типов,
- временные цепочки показаний датчиков и приборов с полным доверием для участников сети,
- подтверждение оценок ущерба от инцидентов, аварий и катастроф,
- учет транзакций в IoT (интернете вещей), микроплатежи,
- оптимизация регионального говернанса, кибербезопасность.

Emercoin специализируется на криптовалюте и блокчейне. Начиная с 2013 года, Emercoin разработал широкий спектр простых в использовании инструментов – DSDK (Decentralized Software Development Kit), который представляет собой набор инструментов для разработки программного обеспечения, сервисов и решений. Обычно он включает в себя API, техническую документацию и фрагменты кода для быстрой и легкой разработки на определенной платформе.

DSDK успешно используются в многочисленных инновационных технических решениях, построенных на блокчейне, в том числе, средства для защиты данных, безопасного хранения информации и создания распределенных сервисов.

2.7.2 Описание технологии верификации показаний датчиков с помощью блокчейн-технологии

Структура блока. Первый шаг — определить элементы, которые должен содержать блок от датчика. Для простоты включают только самое необходимое (рисунок 2.10):

- индекс (index),
- временную метку (timestamp),
- данные (data),
- хеш,
- хеш предыдущего блока, который нужно записывать, чтобы сохранить структурную целостность цепи.



Рисунок 2.10 – Первоначальный состав блока

```
class Block { constructor(index, previousHash, timestamp, data, hash) { this.index = index;
this.previousHash = previousHash.toString();
this.timestamp = timestamp;
this.data = data;
this.hash = hash.toString(); }}
```

Хеш блока. Хеширование блоков нужно для сохранения целостности данных.

```
var calculateHash = (index, previousHash, timestamp, data) => {
return CryptoJS.SHA256(index + previousHash + timestamp + data).toString(); }
```

Генерация блока. Для генерации блока нужно знать хеш предыдущего блока и внести остальные элементы, которые обозначены в структуре блока.

```
var generateNextBlock=(blockData)=>{
  var previousBlock=getLatestBlock();
  var nextIndex=previousBlock.index+1;
  var nextTimestamp=new Date().getTime()/1000;
  var nextHash=calculateHash(nextIndex,previousBlock.hash,nextTimestamp,blockData);
  return new Block(nextIndex,previousBlock.hash,nextTimestamp,blockData,nextHash);};
```

Хранение блоков. Для хранения блокчейна используется массив. Первый блок всегда является жестко заданным «генезис-блоком».

```
var getGenesisBlock=()=>{
  return new Block(0,"0",1465154705,"my genesis
block!!","816534932c2b7154836da6afc367695e6337db8a921823784c14378abed4f7d7");
};
var blockchain=[getGenesisBlock()];
```

Подтверждение целостности блоков. Всегда должна быть возможность подтвердить целостность блока или цепи. Особенно, когда получены новые блоки с других узлов и нужно принять решение принимать их или нет.

```
var isValidNewBlock=(newBlock,previousBlock)=>{
  if(previousBlock.index+1!==newBlock.index){
    console.log('неверный индекс');
    return false;
  }elseif(previousBlock.hash!==newBlock.previousHash){
    console.log('неверный хеш предыдущего блока');
    return false;
  }elseif(calculateHashForBlock(newBlock)!==newBlock.hash){
    console.log('неверный хеш: '+calculateHashForBlock(newBlock)+' '+newBlock.hash);
    return false;
  }
  return true;};
```

Выбирается самая длинная цепь. Последовательность блоков в цепи (рисунок 2.11) всегда должна быть задана явно, поэтому в случае конфликтов (например, на двух узлах одновременно сгенерированы блоки под одним и тем же номером) выбирается цепь, в которой содержится большее количество блоков.

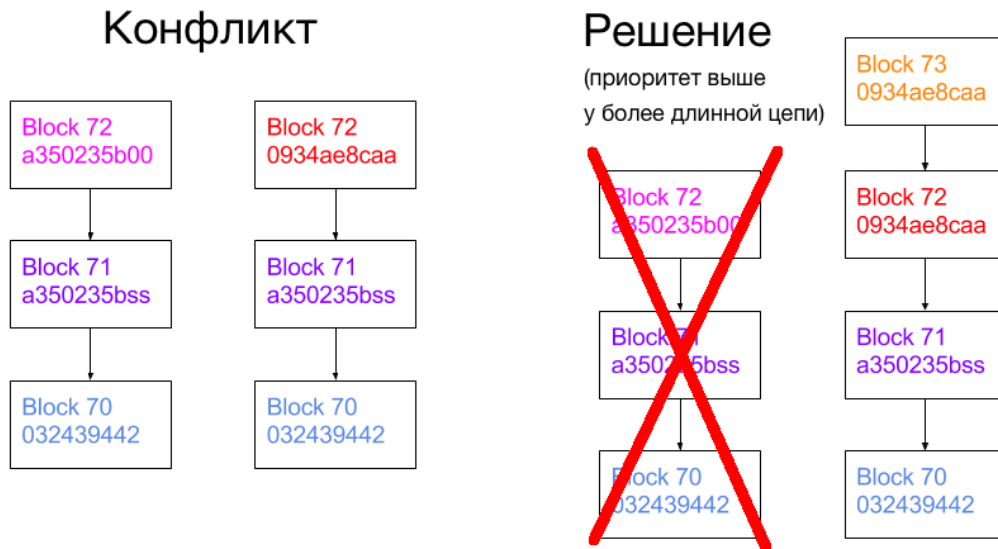


Рисунок 2.11 – Выбор цепи

```

var replaceChain=(newBlocks)=>{
  if(isValidChain(newBlocks)&&newBlocks.length>blockchain.length){
    console.log('Принятый блокчейн является валидным. Происходит замена текущего блокчейна на принятый');
    blockchain=newBlocks;
    broadcast(responseLatestMsg());
  }else{
    console.log('Принятый блокчейн не является валидным');
  }
};

```

Сообщение с другими узлами сети. Неотъемлемая часть узла — обмен данными с другими узлами. Следующие правила используются для поддержания синхронизации в сети:

- когда узел генерирует новый блок, он сообщает об этом в сеть,
- когда узел подключается к новому пиру (клиент, участвующий в раздаче в файлообменных сетях), он запрашивает информацию о последнем сгенерированном блоке,

- когда узел взаимодействует с блоком, у которого индекс больше, чем у него, он либо добавляет блок к своей цепи, либо запрашивает информацию о полной цепи (рисунок 2.12).

Автоматический поиск пиров не осуществляется, все ссылки добавляются вручную.

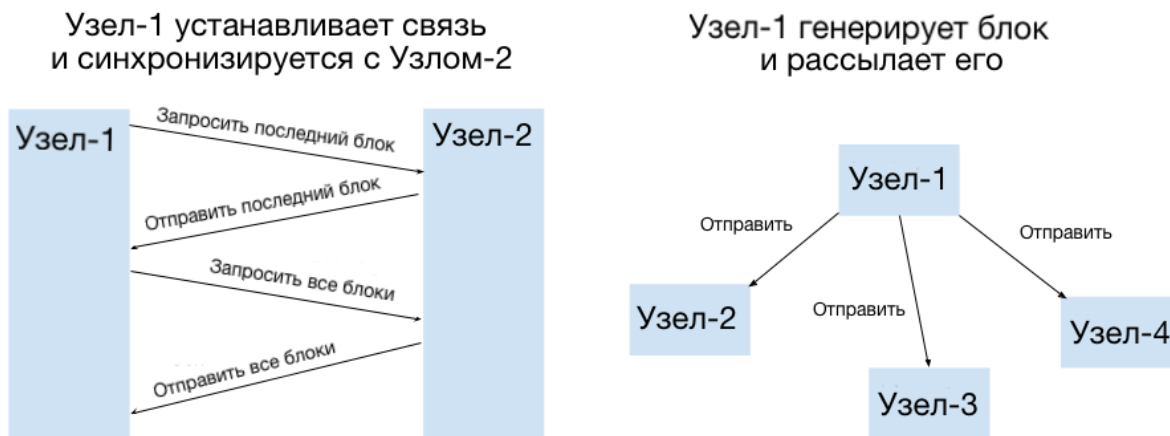


Рисунок 2.12 – Схема связи с другими узлами

Пользователь должен иметь возможность каким-то образом контролировать узел, что решается с помощью установки сервера HTTP. При взаимодействии с узлом доступны следующие функции:

- вывести список всех блоков,
- создать новый блок с пользовательским контентом,
- вывести список или добавить пиры.

Самый прямой путь взаимодействия – с помощью URL:

```
# вывести список всех блоков на узле
```

```
curl http://localhost:3001/blocks
```

Архитектура блокчейна. Когда узел обращается к двум веб-серверам (рисунок 2.13): к HTTP для пользовательского контроля за узлом и к WebSocket HTTP для установки соединения P2P между узлами.

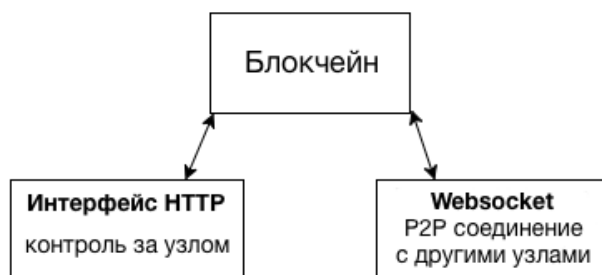


Рисунок 2.13 – Взаимодействие серверов с блокчейном

TIMESTAMP. Поскольку блокчейн – это база проверенных общедоступных временных меток, каждая транзакция сервиса живой лаборатории хранится в публичной книге, и эта книга проверяется и поддерживается всеми компьютерами, участвующими в сети. Эта «цепочка» транзакций известна как цепочка блоков, и каждая транзакция, по сути, является общедоступной временной меткой, которая может содержать данные.

Ключевые аспекты временных меток блокчейна состоит в том, что все они:

- децентрализованные (никто не контролирует базу данных временных меток, и все в сети подтверждают, что временная метка произошла – это «добыча»),
- неизменяемые (после проверки и записи временной метки, невозможно отменить это),
- общедоступные (все метки времени общедоступны, хотя некоторые аспекты данных зашифрованы),
- программируемые (можно написать код для блокчейна – например, запускать какое-то действие на основе деталей «умного контракта», встроенных во временную метку).

Важно отметить, что каждая из этих временных меток содержит пакет данных, который может содержать: подробности о финансовой транзакции, подробности о договоре между двумя или более сторонами, хешированную версию практически любого документа и др.

Один из описанных способов аналогичен тому, как люди используют конверты с почтовыми марками для проверки того, что что-то произошло в определенное время. Например, подписав завещание и положив его в конверт, и отправив его по почте себе – почтовый штемпель почтового отделения на конверте с датой печати подтверждает, что все, что было помещено в конверт, было сделано до даты марки (рисунок 2.14).

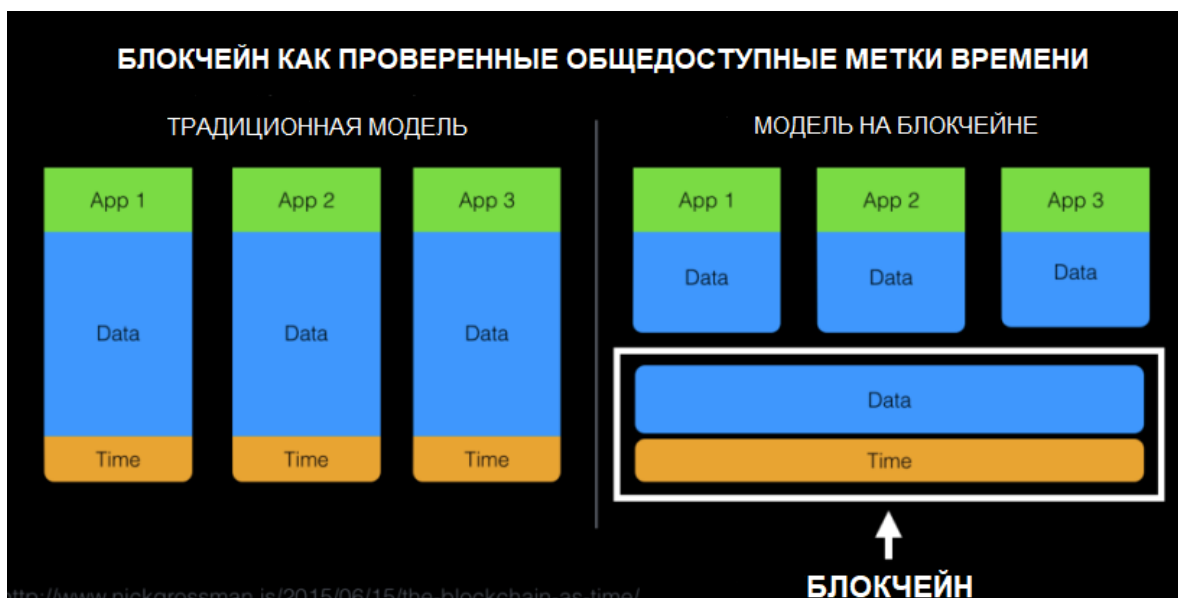


Рисунок 2.14 – Временная метка блокчейна

Таким образом, в некотором смысле блокчейн является общедоступной базой данных – он позволяет перемещать данные, которые ранее хранились в одном или нескольких приложениях, в общую общедоступную базу данных. Более конкретно, эта общедоступная база данных временных меток – новая возможность для любого, публично и неопровержимо заявить, что определенная вещь произошла в определенное время.

2.7.3 Схема передачи информационных потоков от датчиков/сенсоров

Схема передачи информации ЛПР от датчиков сенсоров с помощью блокчейн – технологии представлена на рисунке 2.15.

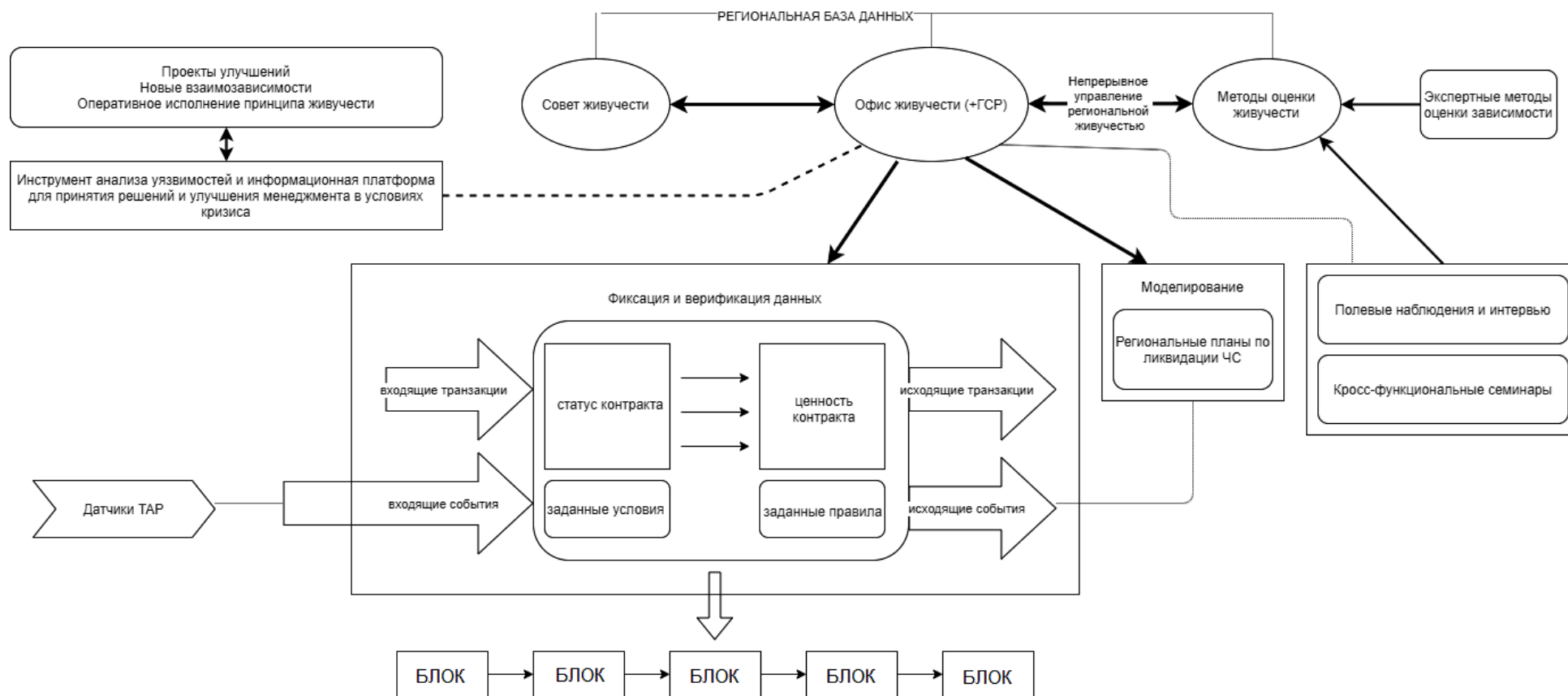


Рисунок 2.15 – Схема передачи информации ЛПР от датчиков сенсоров

2.7.4 Пример передачи информационных потоков на примере БАЭС

Рассмотрим последовательность событий и их взаимосвязь с помощью дерева отказов аварии на БАЭС (рисунок 2.16):



Рисунок 2.16 – Дерево отказов аварии на БАЭС

На каждом этапе возможен мониторинг измеримых показателей каждого ключевого сервиса/инфраструктуры и городской ситуации в целом с помощью датчиков и сенсоров для предотвращения аварии (рисунок 2.17). Например:

- датчик температуры (фиксирующий аномальную динамику температуры),
- тензометрический датчик (фиксация деформаций),
- датчик перемещений (фиксация прогибов и перемещений),
- датчик уровня жидкости,
- датчики-извещатели и т.д.



Рисунок 2.17 – Применение датчиков для предотвращения аварии на БАЭС

Таким образом, любое изменение, событие или вмешательство передается с помощью датчиков и сенсоров, фиксируется в цепочке блоков эмеркоина и далее поступает на обработку в офис живучести, который оперативно обрабатывает полученную информацию, а в чрезвычайных ситуациях получает от ЛПР указания к действию и своевременно отправляет инструкции всем задействованным подразделениям.

2.8 Пример применения «живой лаборатории» в Екатеринбурге

Рассмотрим пошаговый алгоритм функционирования живой лаборатории.

На начальном этапе происходит сбор и ввод информации о городских сервисах (разных уровней и масштабов) и входящих в них инфраструктур. Составляется матрица сервисов и их инфраструктур (рисунок 2.18).

На следующем этапе представителями сервисов (экспертами) формируется матрица взаимозависимостей, где цветами в ячейках обозначена степень влияния одной инфраструктуры на другую (рисунок 2.18).

- красный – сильное влияние,
- желтый – умеренное влияние;
- зеленый – незначительное влияние.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	аэ-рт "Кольцово"	метро	отопление	ЦГБ№1	Электрос танция	система газосн- ния	водоснаб жение	канализац ия	Адм-ция города	телеком- ции
аэ-рт "Кольцово"		зеленый	красный	зеленый	красный	желтый	красный	красный	зеленый	красный
метро	зеленый		желтый	зеленый	красный	зеленый	зеленый	желтый	зеленый	зеленый
Электростанция	зеленый	зеленый		зеленый	красный	красный	красный	красный	зеленый	зеленый
ЦГБ№1	зеленый	зеленый	красный		желтый	желтый	красный	красный	зеленый	желтый
Электростанция	зеленый	зеленый	желтый	зеленый		зеленый	красный	красный	зеленый	зеленый
система газосн-ния	зеленый	зеленый	зеленый	зеленый	желтый		красный	желтый	зеленый	зеленый
водоснабжение	зеленый	зеленый	желтый	зеленый	красный	желтый		красный	зеленый	зеленый
канализация	зеленый	зеленый	желтый	зеленый	красный	зеленый	красный		зеленый	зеленый
Адм-ция города	зеленый	зеленый	желтый	зеленый	желтый	зеленый	желтый	желтый		красный
телеком-ции	зеленый	зеленый	желтый	зеленый	желтый	зеленый	зеленый	зеленый	зеленый	

Рисунок 2.18 – Матрица инфраструктур г. Екатеринбурга и их взаимосвязи

Местоположение инфраструктур на ГИС-карте города (рисунок 2.19), определяется по их географическим координатам.

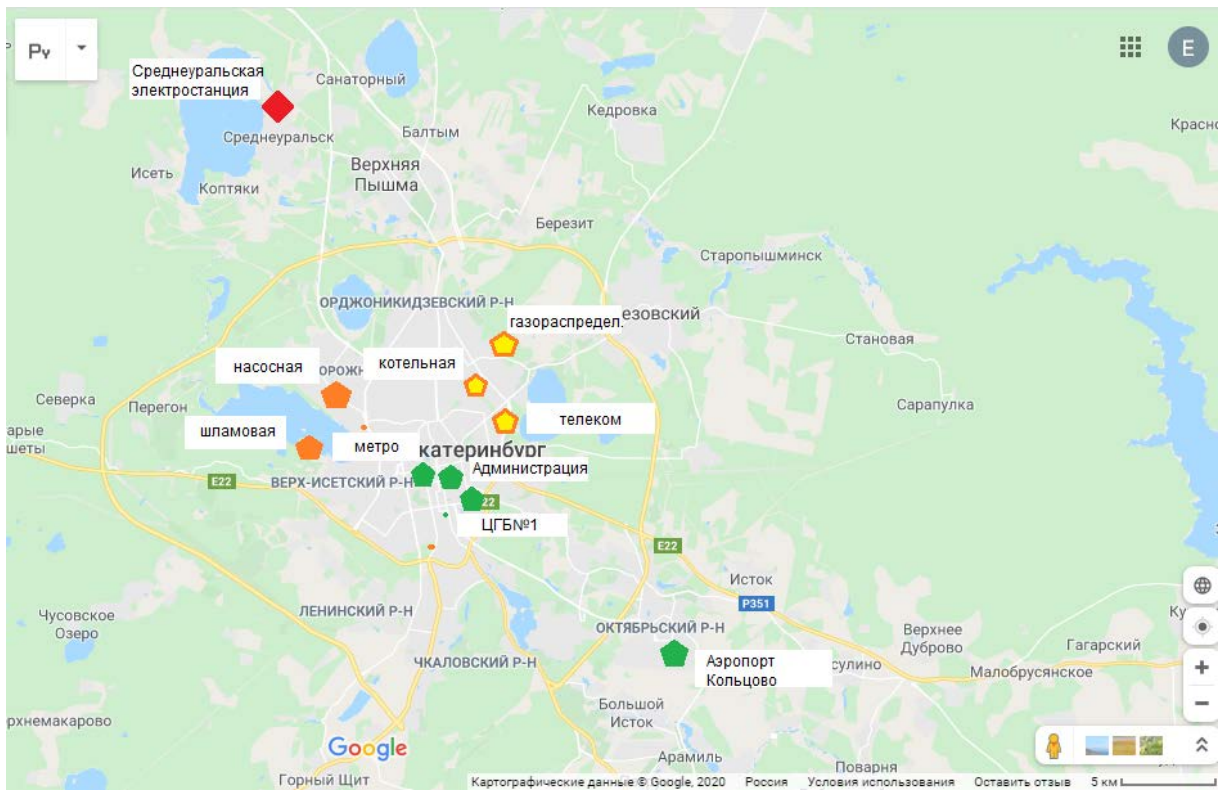


Рисунок 2.19 – ГИС-карта инфраструктур г. Екатеринбурга

На основе матрицы взаимозависимостей инфраструктур строится карта их взаимозависимостей (рисунок 2.20).

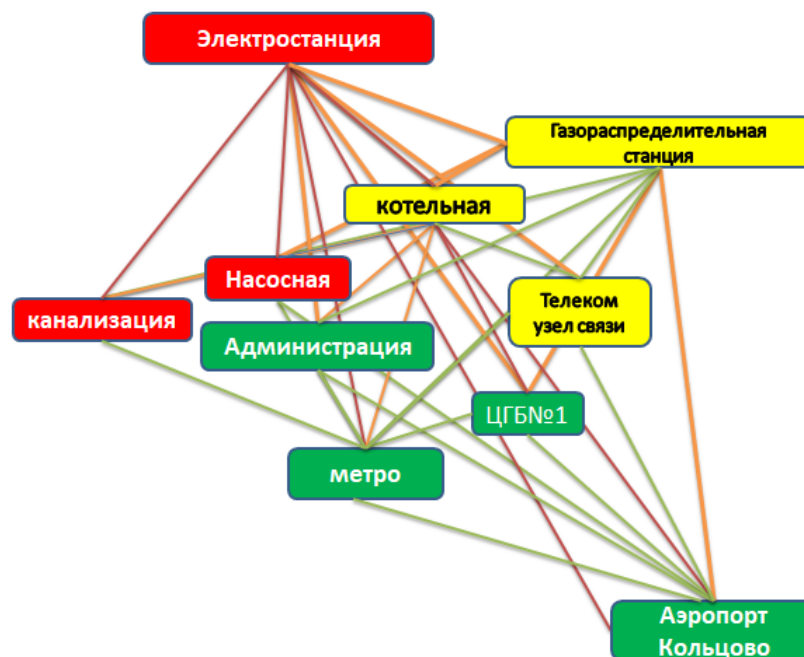


Рисунок 2.20 – Карта взаимозависимости инфраструктур г. Екатеринбурга

Каждая инфраструктура снабжается набором датчиков/сенсоров (рисунок 2.21) для мониторинга. Собираемая информация оперативно передается ЛПР для возможности быстрого реагирования.



Рисунок 2.21 – Датчики и сенсоры для мониторинга ситуации на ключевом объекте

Датчики и сенсоры передают потоки информации с помощью распределенной сети блокчейн-технологии (рисунок 2.22).

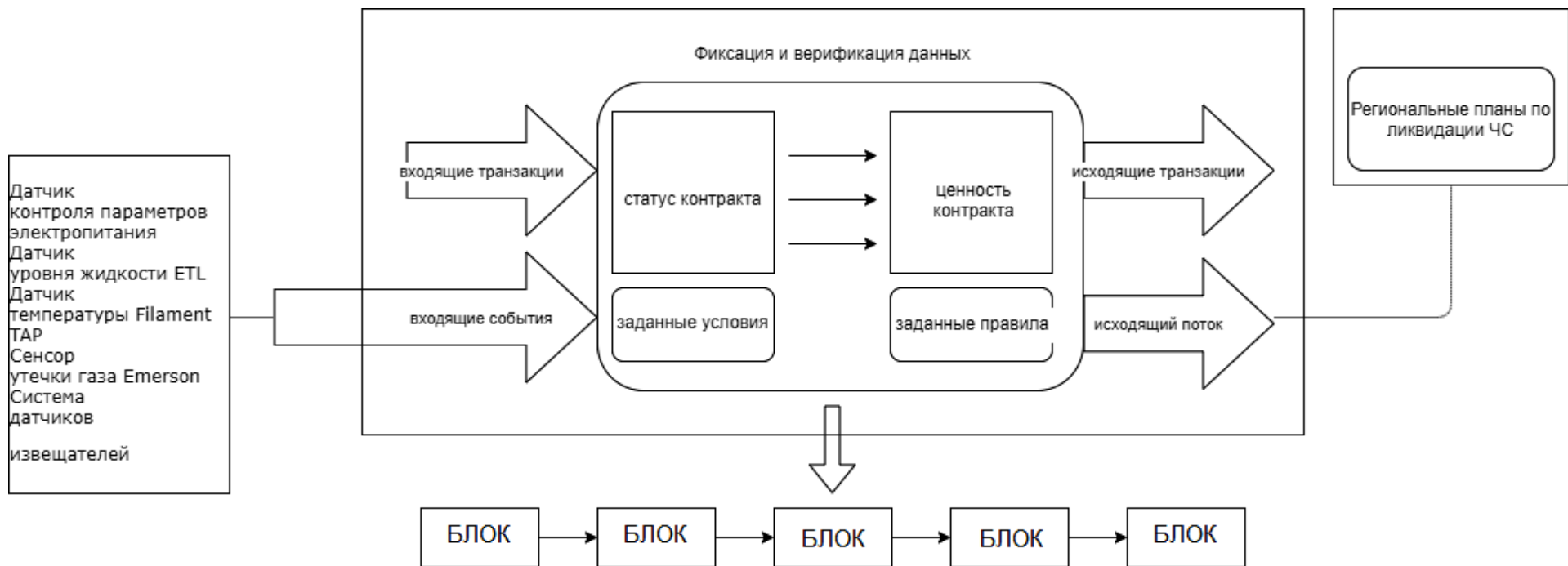


Рисунок 2.22 – Передача информационных потоков с датчиков/сенсоров по блокчейн-технологии

На основании переданной информации администратор в приложении (по указанию ЛПР) запускает определенные алгоритмы (рисунок 2.23), которые оповещают все зависимые сервисы и предупреждает их о возможных угрозах. Также в приложении можно присваивать алгоритмам разную приоритетность и запрограммировать многовариантный исход (рисунок 2.24).

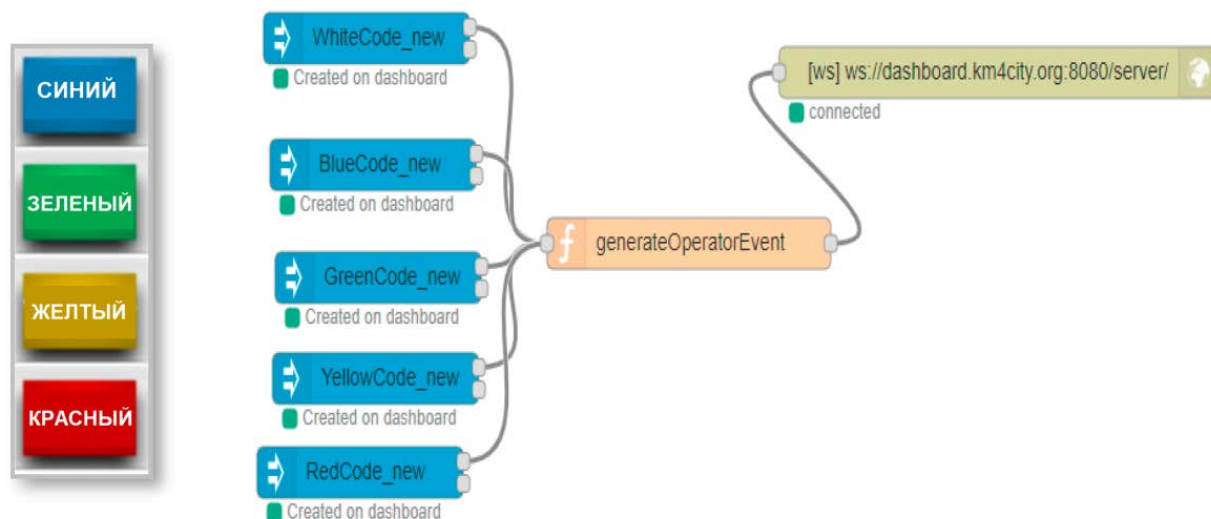


Рисунок 2.23 – Запуск механизмов реагирования

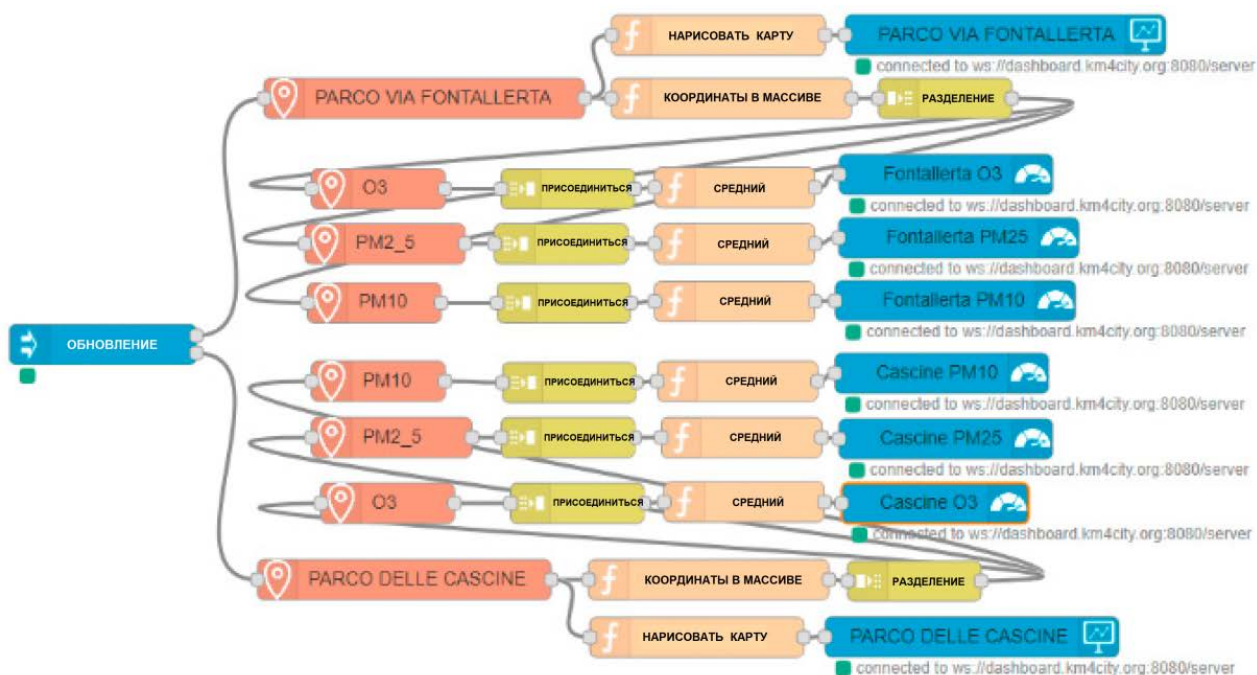


Рисунок 2.24 – Многовариантные исходы

После запуска механизма реагирования блокчейн фиксирует все изменения (рисунок 2.25). Удалить или подменить данные невозможно, т.к. записи распределенные и децентрализованные.

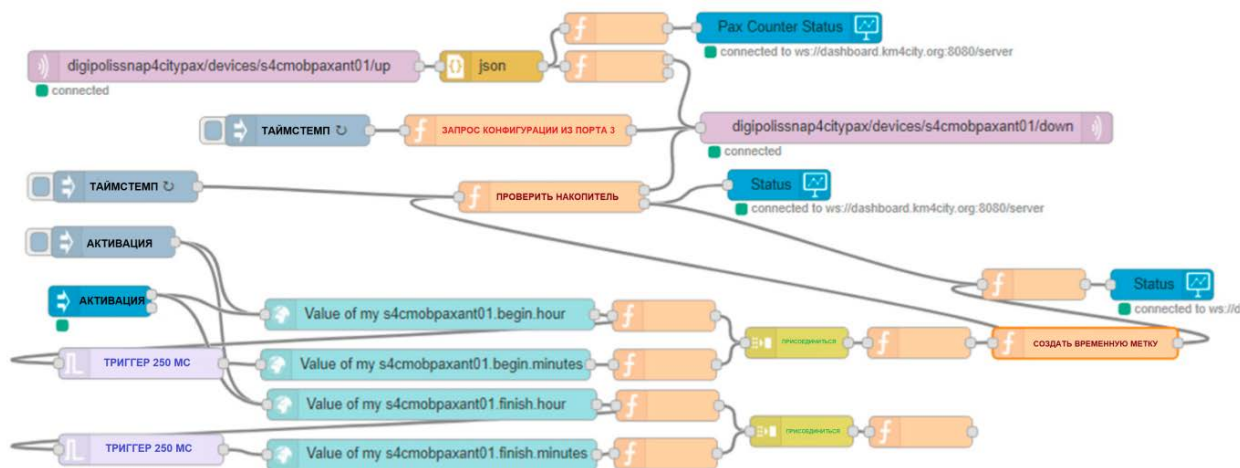


Рисунок 2.25 – Фиксация данных

С помощью описанных инструментов возможно организовать эффективное управление городскими инфраструктурами, минимизировать риски, человеческие жертвы и сократить финансовые потери от непредвиденных и чрезвычайных ситуаций.

2.9 Заключение к разделу 2

Разработан программный механизм оценки экспертного мнения, который позволяет создавать матрицу взаимозависимостей городских инфраструктур и более эффективно выстраивать управление городским пространством как в чрезвычайных ситуациях, так и в ежедневном рабочем формате. Такая матрица с установленными связями между отдельными сервисами города и их инфраструктурами позволяет создать единый устойчивый живучий механизм, т.к. при заранее известных зависимостях есть возможность, при возникновении чрезвычайной ситуации, предусмотреть и минимизировать влияние отказа одного объекта на качество функционирования других, зависимых от него инфраструктур/сервисов. Знание взаимозависимости городских инфраструктур позволяет корректно моделировать различные каскадные аварии и вырабатывать априори методы и средства для их предотвращения, а также смягчения и минимизации ущерба при их возникновении.

На основе блокчейн-технологии построена верификация и фиксация информационных потоков от сенсоров/датчиков о состоянии инфраструктур для передачи этой информации ЛПР. Это исключает возможность удаления или подмены данных, т.к. записи распределенные и децентрализованные.

3 Метод оптимизации объема средств, направляемых на применение конкретных мер и устройств на повышение безопасности компонент урбанистических и производственных инфраструктур при их проектировании и эксплуатации по критериям индекса качества жизни (ИКЖ) и готовности платить (ГП)

3.1 Введение

Главная цель мейнтенанса – предупреждение, своевременное выявление и устранение отказов и повреждений. С точки зрения критичных инфраструктур (КИ), основная цель их мейнтенанса – повышение безопасности КИ и/или обеспечение безопасности жизнедеятельности. Критичные инфраструктуры должны быть оптимальны с точки зрения своего предназначения, стоимости, как источник дохода и прибыли на всех этапах их жизненного цикла, а также приемлемыми с точки зрения возможных потерь человеческих жизней или увечий. В работе рассматривается оценка оптимальных инвестиций в мейнтенанс, то есть в период его проведения, необходимых для увеличения безопасности жизни, так называемые затраты на спасение жизни. Вопрос ограничения угрозы человеческой жизни заключается в следующем: «сколько средств общество готово и способно затратить на уменьшение вероятности преждевременной смерти». Используется количественный критерий приемлемости риска, в котором предельные затраты на спасение жизни сравниваются с социальной готовностью платить. Эта величина определяется с помощью индекса качества жизни населения.

Оптимизация может осуществляться либо частным, либо общественным лицом, принимающим решение (ЛПР). Примером частного ЛПР является компания, которая строит и/или управляет объектом (и, возможно, создает риски для общества). Социальные ЛПР, являются государственными органами или организациями, управляющими рисками от имени общества.

Затраты и выгоды от принятия решения, а также предпочтения, составляющие основу для сравнения различных альтернатив, могут различаться в зависимости от интересов ЛПР.

В отчете используется количественный критерий приемлемости риска [1], в котором предельные затраты на спасение жизни сравниваются с социальной готовностью платить (СГП). Эта величина определяется с помощью индекса качества жизни населения (ИКЖ), который был получен на основе социально-экономических предпосылок с использованием ВВП на душу населения и средней ожидаемой продолжительности жизни (СОПЖ).

Критерий ИКЖ определяет порог, который отделяет эффективные инвестиции от неэффективных инвестиций в смысле спасения жизни. Затраты на спасение жизни можно увеличивать только до тех пор, пока они не превысят порога эффективности, в данном случае, СГП.

Инвестиции в меры безопасности (в данном случае в сроки проведения мейнтенанса) приводят как к денежным затратам, так и к выгодам безопасной жизни. Снижение затрат, достигаемое за счет инвестиций в обеспечение безопасности, например, снижение затрат на ликвидацию последствий отказа, рассматриваются как выгода от применения меры безопасности. Выгода от повышения безопасности жизнедеятельности определяется маргинальным изменением ожидаемого числа смертей в год.

При принятии решения различаются: 1) критерий принятия риска для жизни и денежная оптимизация; 2) интересы частных и общественных ЛПР.

Затраты и выгоды могут накапливаться в разные моменты времени. Для их «синхронизации», они дисконтируются.

3.2 Основы теории дисконтирования и общественной полезности потребления

Дисконтированная или приведенная стоимость есть оценка стоимости текущего денежного эквивалента будущего потока платежей, исходя из различной стоимости денег, полученных в разные моменты времени. Это так называемая концепция временной ценности денег.

Денежная сумма, полученная сегодня, обычно имеет более высокую стоимость, чем та же сумма, полученная в будущем. Это связано с тем, что деньги, полученные сегодня, могут принести в будущем доход, если их инвестировать.

Неравноценность разновременных денежных сумм численно выражается в ставке дисконтирования.

Процедура дисконтирования обратна механизму начисления сложных процентов и имеет экспоненциальный закон. Коэффициент (фактор) дисконтирования равен

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma}{N}\right)^{Nt}} = e^{-\gamma t} \quad (3.1)$$

где

γ – ставка дисконтирования (процентная ставка).

В качестве инструмента, позволяющего сравнивать полученные обществом выгоды и понесенные издержки, рыночная ставка дисконтирования неприменима. В мировой экономической практике таким инструментом является ставка социального (общественного) дисконтирования.

Социальная ставка дисконтирования – это альтернативные возможности использования обществом ресурсов между двумя периодами времени, своего рода «цена», по которой общество готово отказаться от сегодняшнего потребления ради завтрашнего, которая отражает социальную норму временного предпочтения.

В данном отчете используется метод оценки социальной ставки межвременных предпочтений (social rate of time preferences, SRTP), который основан на выявлении предпочтений общества в плане потребления.

Социальная ставка межвременных предпочтений показывает готовность общества отказаться от потребления в настоящий момент времени ради реализации проекта и получения выгод от его результатов в будущем.

Аналитически эта задача решается с помощью максимизации функции общественной полезности, получаемой от потребления в различные периоды времени. В общем случае, при переменной во времени ставки дисконтирования, эта задача имеет следующий вид

$$U(t) = \int_0^t u(c_\tau) \exp \left[- \int_0^\tau \gamma(\theta) d\theta \right] d\tau \rightarrow \max_{c_t}, \quad (3.2)$$

где

$c_t > 0$ – подушевое потребление в момент t ,

$u(c_t)$ – функция общественной полезности этого потребления,

$\gamma(t) > 0$ – процентная ставка дисконтирования полезности потребления в момент времени t , отражающая межвременные предпочтения индивида,

$U(t)$ – по сути, является функцией *совокупной полезности*.

Полезность (utility) – это степень удовлетворения потребностей индивидов, которую они получают при потреблении товаров или услуг, или от ведения какой-либо деятельности.

Различают две формы полезности: общую и предельную. *Общая полезность* (total utility) – совокупная полезность, получаемая в результате потребления всех единиц блага. Общая полезность возрастает по мере увеличения потребления, но не пропорционально объему потребления, и постепенно затухает, пока не дойдет до нуля. *Предельная полезность* (marginal utility) – полезность, которую получают от использования еще одной дополнительной единицы блага. Другими словами, это увеличение общей полезности при потреблении одной дополнительной единицы блага (то есть *производная функции полезности по количеству потребляемого блага*).

3.3 Функция полезности (всей) жизни

Для оценки этой функции принимается утилитарный подход, согласно которому общественное благосостояние (общественная полезность) представляет собой сумму благосостояний (сумму полезностей) отдельных членов общества, а предельная полезность убывает по мере роста потребления (первый закон Госсена). Это закон убывающей предельной полезности – с ростом потребления какого-то одного блага (при неизменном объеме потребления всех остальных благ) общая полезность возрастает, но скорость роста замедляется. Предельная полезность (производная) убывает с ростом потребления, обращается в ноль при максимальной общей полезности и затем становится отрицательной, а общая полезность, достигнув максимального значения, начинает уменьшаться. Например, для голодного человека предельная полезность первой тарелки супа выше, чем второй, второй – выше, чем третьей и т.д. Так и со многими другими благами.

Наслаждение жизнью или ее полезность в экономическом смысле происходит за счет непрерывного притока ресурсов, доступных для потребления на протяжении всей жизни. *Поэтому доходы, необходимые для потребления, и время, чтобы наслаждаться им, являются двумя определяющими факторами качества жизни.*

Согласно работам [2, 3], качество жизни в экономическом смысле можно измерить с помощью функции полезности продолжительности жизни, в зависимости от уровня потребления. Функция полезности остаточной (предстоящей) продолжительности жизни (ОПЖ) в возрасте x [2, 3]:

$$U(x, D) = \int_x^D u(c_\tau) d\tau, \quad (3.3)$$

где

$c_\tau > 0$ – скорость (*интенсивность*) потребления в возрасте τ (\$/год),

$u(c_\tau)$ – *полезность* этого потребления от возраста x до момента смерти D .

Функцию $U(x, D)$ можно интерпретировать как полное потребление в течение оставшейся жизни.

Люди обычно ценят возможность потребления в будущем меньше, чем в настоящем. Это может быть учтено через *дисконтирование функции полезности*:

$$U(x, D) = \int_x^D u(c_\tau) \exp\left[-\int_x^\tau \gamma(\theta) d\theta\right] d\tau, \quad (3.4)$$

где

$\gamma(t) > 0$ – процентная ставка дисконтирования полезности потребления в возрасте t , отражающая межвременные предпочтения индивидуума.

Как было отмечено выше, в качестве оценки $\gamma(t)$ используется социальная ставка дисконтирования. В данной работе используется так называемая математическая модель Рамсея–Касса–Купманса (модель Рамсея) – неоклассическая модель равновесного эндогенного экономического роста, в которой траектория потребления и сбережений определяются на основе решения задачи оптимизации домашних хозяйств и фирм в условиях совершенной конкуренции.

Решая задачу максимизации общественной полезности по потреблению

$$U(x, t) = \int_x^t u(c_\tau) \exp\left[-\int_x^\tau \gamma(\theta) d\theta\right] d\tau \rightarrow \max_{c_t}, \quad (3.5)$$

согласно модели Рамсея [4], получим социальную ставку дисконтирования:

$$\gamma(t) = \rho(t) + \mu\delta(t), \quad (3.6)$$

где

$\delta(t) = \frac{dc_t}{c_t dt}$ – темп прироста потребления на душу населения,

$\rho(t)$ – субъективная норма дисконтирования будущего потребления (параметр нетерпеливости, эгоизма).

Чем больше этот параметр, тем выше ценит индивид свое сегодняшнее потребление по отношению к будущему. Компонента $\mu\delta$ показывает прирост общественной полезности, получаемой от потребления.

Таким образом, согласно выражению (3.6) социальная ставка межвременных предпочтений зависит от трех параметров: индивидуальной ставки межвременных предпочтений (ρ), эластичности предельной общественной полезности по потреблению (μ) и темпа роста потребления на душу населения (δ).

Так как время смерти является случайным, то и полезность продолжительности жизни индивидуума также является случайной величиной. Можно показать, что среднюю ожидаемую дисконтируемую полезность остаточной продолжительности жизни в возрасте x (при условии дожития до этого возраста) можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} L(x) &= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) u(c_t) \exp\left[-\int_x^t \gamma(\theta) d\theta\right] dt = \\ &= \frac{1}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) u(c_t) \exp\left[-\int_x^t \rho(\theta) d\theta + \mu\delta(t-x)\right] dt, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где

D_m – максимальный возраст, до которого доживают люди в мире (или максимальный возраст рассматриваемой когорты (в регионе, отрасли, компании),

$S(t)$ – функция выживаемости:

$$S(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(u) du\right), \quad (3.8)$$

где

$\lambda(t)$ – интенсивность (сила) смертности (функция риска), определяется на основе математической модели зависимости смертности от возраста Гомперца-Мейкхема [5].

В условиях совершенной конкуренции (идеального рынка) оптимальное потребление не зависит от времени t [6]. В этом случае формула (3.7) примет вид

$$L(x) = \frac{u(c)}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) \exp \left[-\int_x^t \rho(\theta) d\theta + \mu\delta(t-x) \right] dt = u(c) e_d(x, \rho, \mu, \delta), \quad (3.9)$$

где

$e_d(x, \rho, \mu, \delta)$ – дисконтированная СОПЖ в возрасте x :

$$L(x) = \frac{u(c)}{S(x)} \int_x^{D_m} S(t) \exp \left[-\int_x^t \rho(\theta) d\theta + \mu\delta(t-x) \right] dt = u(c) e_d(x, \rho, \mu, \delta). \quad (3.10)$$

При постоянном дисконтировании функция $L(x)$ – монотонно убывающая функция. Это подтверждается многими теоретическими и эмпирическими исследованиями. При дисконтировании, зависящем от времени, функция $L(x)$ возрастает до возраста около 25 лет, а затем уменьшается [7].

3.4 Индекс качества жизни

Ответ на вопрос: «Скольким нужно пожертвовать из полезности потребления и других аспектов качества жизни, чтобы взамен получить некоторое увеличение продолжительности жизни за счет затрат на уменьшение риска?» дает индекс качества жизни (ИКЖ).

Доход создается работой, и чем продолжительней работа, тем больше доход, но тем меньше время на досуг/отдых. Доход считаем пропорциональным производительности труда (объем продукции в денежном выражении в единицу времени).

Индивидуум может увеличить время досуга либо за счет увеличения продолжительности своей жизни за счет уменьшения риска, либо за счет уменьшения времени, затрачиваемого им на экономическое производство, что ведет, в общем случае, к меньшему доходу.

Nathwani и др. [8] использовали гипотезу: «в среднем люди работают ровно столько, чтобы маргинальная стоимость их богатства/благосостояния или дохода, который они получают за свою работу, равнялась маргинальной цене того времени, которое они потратили на эту работу» (принцип оптимизации «работа-досуг/отдых») и определили меру качества жизни как

$$L = f(g)h(t), \quad (3.11)$$

где

g – потребление (ежегодный доход),

$t = (1-w)e(0)$ – время досуга/отдыха,

$e(0)$ – СОПЖ при рождении,

w ($0 < w < 1$) – доля ожидаемой продолжительности жизни, потраченной на (оплачиваемую) работу,

$f(g)$ и $h(t)$ – две пока неизвестных функции этих качеств.

Величина L названа *индексом качества жизни* (ИКЖ) [8]. Таким образом, ИКЖ является произведением функции $f(g)$, измеряющей качество жизни и функции $h(t)$, измеряющей ее продолжительность.

Предполагается, что любое изменение СОПЖ должно быть компенсировано соответствующим изменением g , то есть любые инвестиции (сокращение потребления на dg) в улучшение (сохранение) жизни должны быть компенсированы выигрышем de в СОПЖ (и наоборот), так чтобы L оставалось неизменным. Формально это означает, что полный дифференциал функции L равен нулю. Принимая некоторые допущения и проводя соответствующий набор тождественных преобразований, можно доказать, что ИКЖ вычисляется по формуле [8,9,10]:

$$L = \frac{c^q}{q} e(0). \quad (3.12)$$

Таким образом, функция потребления в данном случае

$$u(c) = \frac{c^q}{q}, \quad (3.13)$$

которая соответствует изоэластичной степенной функции $q = 1 - \mu$.

В экономике принято, что малое значение q подразумевает, что большее значение полезности жизни достигается в основном за счет увеличения продолжительности жизни, в то время как высокое значение q подразумевает, что эта полезность жизни достигнута в основном за счет потребления.

В качестве величины c Nathwani и др. [8] рассматривают ВВП на душу населения (с учетом паритета покупательской способности, при необходимости), который является показателем производительности общества. Тогда формула (3.12) примет следующий вид

$$L = u(g)e(0) = \frac{g^q}{q}e(0), \quad (3.14)$$

где

g – ВВП на душу населения.

Сравнивая уравнение (3.14) с уравнением (3.9) видно, что последнее не что иное, как *полезность жизни без дисконтирования при детерминированной продолжительности жизни, равной СОПЖ при рождении*.

Таким образом, *ИКЖ представляет собой комплексный социальный индикатор как функцию двух социальных показателей: ВВП на душу населения и СОПЖ в добром здравии*. Предполагается, что оба этих показателя независимы, что может и не соблюдаться. Однако экономисты поддерживают идею независимости. Например, они показали, что рост ВВП и СОПЖ исторически развивались совершенно независимо, причем на последнюю в основном влияют успехи в области медицины (превентивные и терапевтические методы), которые лишь слабо или косвенно связаны с ВВП [11].

Если в формуле (3.14) величину СОПЖ при рождении $e(0)$ заменить на дисконтируемую СОПЖ в возрасте x :

$$L(x, g) = u(g)e_d(x, \rho, \mu, \delta) = \frac{g^q}{q}e_d(x, \rho, \mu, \delta), \quad (3.15)$$

то полученный ИКЖ можно интерпретировать как *дисконтируемую полезность остаточной продолжительности жизни*. Тогда функция потребления из (3.15) будет принадлежать классу так называемых функций *неприятия риска* с коэффициентом q *относительного неприятия риска* согласно Эрроу–Пратту (Arrow-Pratt).

3.5 Цена среднестатистической жизни и готовность платить

Shepard и Zeckhauser [6] определили «цену среднестатистической жизни (value of statistical life)» (VSL/ ЦСЖ) в возрасте x путем деления уравнения (3.15) на маргинальную полезность $du(c)/dc = u'(c)$, что переводит его размерность строго в денежные единицы:

$$\text{VSL}(x) = \frac{u(c)}{u'(c)} \int_x^{D_m} \exp \left[-\int_x^t [\lambda(\tau) + \rho(\tau)] d\tau + \mu\delta(t-x) \right] dt = \frac{g}{q} e_d(x, \rho, \mu, \delta). \quad (3.16)$$

Видно, что ЦСЖ уменьшается со временем из-за уменьшения $e_d(x, \rho, \mu, \delta)$. Денежного выражения жизни не существует – «цена жизни бесконечна и неизмерима» [12], если говорить об индивидууме. Здесь, однако, рассматривается цена статистической жизни, как некая формальная константа, как денежная величина, которая нужна для *уменьшения риска смертности на единицу*.

Согласно собранной статистике за последние сто лет [13] размер популяции в среднем растет со временем по экспоненте e^{nt} , $t > 0$, n – *скорость роста популяции* (с учетом эффектов иммиграции и эмиграции). Для того, чтобы правильно учесть композицию населения, подвергающегося природным угрозам и технологическим авариям и катастрофам, как на территории ПОО, так и в его окрестности, необходимо рассматриваемые величины осреднять по ФПВ распределения возраста $h(x, n)$ рассматриваемого населения (сотрудников) как *стабильной популяции*. ФПВ распределения конкретной популяции можно получить также из таблиц дожития. Для стабильной популяции эта плотность имеет вид

$$h(x, n) = \frac{\exp[-nx]S(x)}{\int_0^{D_m} \exp[-nx]S(x)dx}. \quad (3.17)$$

У стабильной популяции смертность не меняется со временем. Популяция стабильна, когда $n \approx 0$. Тогда

$$h(x, n) \approx \frac{S(x)}{e(0)} \quad (3.18)$$

и «социальная цена статистической жизни СЦСЖ – SVSL» определяется как

$$SVSL = \frac{g}{q} \bar{E}(\rho, \mu, \delta), \quad (3.19)$$

где

$\bar{E}(\rho, \mu, \delta)$ – дисконтированная осредненная по распределению возрастов $h(x, n)$ ожидаемая продолжительность жизни:

$$\bar{E}(\rho, \mu, \delta) = \int_0^{D_m} e_d(x, \rho, \mu, \delta) h(x, n) dx. \quad (3.20)$$

Также можно оценить *социальный ИКЖ (SLQI)* [14]:

$$SLQI = \frac{g^q}{q} \bar{E}(\rho, \mu, \delta). \quad (3.21)$$

Необходимо подчеркнуть, что СИКЖ, как и исходный ИКЖ, не является денежной величиной и имеет размерность «(\$)^w(годы)» и интерпретируется как функция полезности. Если его поделить на маргинальную полезность $u'(c)$ с целью превращения его в денежную величину, то он совпадает с уравнением (3.19).

Готовность платить (ГП, willingness-to-pay – WTP) измеряет готовность человека пожертвовать одним желаемым атрибутом, богатством или потреблением, чтобы получить другой желаемый атрибут, в рассматриваемом случае, увеличить продолжительность жизни (улучшить выживаемость). Пусть de обозначает предельное изменение ожидаемой продолжительности жизни и dg предельное изменение потребления. Shepard/Zeckhaue [6] ввели WTP, как инвариантность $L = L(x, g)$ относительно потери (прироста) потребления при увеличении (уменьшении) продолжительности жизни:

$$WTP = dg = - \frac{\frac{\partial L(x, g)}{\partial e(a)}}{\frac{\partial L(x, g)}{\partial g}} de(x) = - \frac{g}{q} \frac{de(x)}{e(x)}. \quad (3.22)$$

3.6 Критерий социальной приемлемости инвестиций в проекты по снижению риска

Для решений, касающихся инвестиций в безопасность жизнедеятельности, ИКЖ можно интерпретировать как двузначную функцию полезности для среднего члена общества. Предполагается, что решение с (маргинальным) влиянием на g и e (например, любые инвестиции, связанные со спасением жизни) выгодно для общества, если оно приводит к увеличению ИКЖ. Требование, чтобы полный дифференциал функции ИКЖ был равен или больше нуля ($dL \geq 0$), порождает *критерий чистой выгоды (приемлемости инвестиций в проекты по снижению риска)* [1,9,10]:

$$\frac{dg}{g} + \frac{1}{q} \frac{de(x)}{e(x)} \geq 0. \quad (3.23)$$

Неравенство (3.23) является критерием эффективности и доступности конкретных инвестиций в безопасность жизнедеятельности. Равенство в (3.23) показывает какие мероприятия, сохраняющие человеческие жизни обществу, *необходимы и по средствам*; проекты с неравенством «<» неприемлемы. Такие проекты фактически будут опасны для жизни и находиться в конфликте с конституционным правом на жизнь. Каждый раз, когда малое увеличение СОПЖ за счет какого либо мероприятия, сохраняющего человеческие жизни (положительное de), ассоциируется с бóльшими, чем оптимальными дополнительными затратами (отрицательное dg), необходимо искать другую альтернативу для инвестирования в проекты по спасению жизней (уменьшения риска). Если заданное положительное de осуществимо за меньшие средства, чем дает формула (3.23), то естественно, эта возможность должна быть реализована.

Выражение (3.23) остается справедливым и для дисконтируемой полезности остаточной продолжительности жизни в возрасте x (уравнение (3.10)):

$$\frac{dg}{g} + \frac{1}{q} \frac{de_d(x, \rho, \mu, \delta)}{e_d(x, \rho, \mu, \delta)} \geq 0. \quad (3.24)$$

и после осреднения по распределению возрастов $h(x, n)$ получается критерий оценки *социальной готовности платить* (СГП, SWTP) [1,9,10]:

$$\frac{dg}{g} + \frac{1}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)} \geq 0 \quad \text{или} \quad dg \geq -\frac{g}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}. \quad (3.25)$$

Преобразуя (3.23), выразим критерий эффективности с точки зрения порога для предельного изменения ВВП на душу населения dg [1,9,10]:

$$-dg \leq \frac{g}{q} \frac{de(x)}{e(x)} \approx -\frac{g}{q} C_x d\lambda. \quad (3.26)$$

Для технических проблем обычно легче оценить предельное снижение смертности $d\lambda$, чем то влияние, которое оказывает принятое решение на ожидаемую продолжительность жизни. Отношение de/e вычисляется путем умножения изменения смертности на демографическую константу C_x [9, 10], оцененную по таблицам смертности (дожития).

В формуле (3.26) можно использовать осреднение по возрасту и дисконтирование, что осуществляется заменой $\frac{de(x)}{e(x)}$ на $\frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}$.

До сих пор порог ИКЖ определялся на основе предпочтений среднего гражданина (на душу населения). Для получения агрегированных (интегральных) совокупных значений, уравнение (3.25) следует умножить на размер популяции N_p . Смертность λ затем заменяется ожидаемым числом смертей в год, $m = \lambda \cdot N_p$. Это позволяет определить порог для предельных затрат на спасение жизни *на уровне проекта инфраструктуры*, dc [1]:

$$dc = -dg \cdot N_p \geq SWTP = \frac{g}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)} N_p \approx -\frac{g}{q} C_x dm, \quad (3.27)$$

где

de/e вычисляется путем умножения изменения смертности на демографическую константу C_x , оцененную по таблицам смертности (дожития).

Критерий приемлемости (3.27) основан на предельной стоимости dc для предельного уменьшения риска – dm , а не на средних значениях.

Следует также отметить, что критерий (3.27) основан на годовых расходах и выгодах от спасения жизни. Если эти расходы и выгоды возникают в различные моменты времени, их надо дисконтировать (привести к единому срезу времени) для возможности адекватного сравнения.

3.7 Связь между критерием приемлемости и денежной оптимизацией

Так как затраты и выгоды начисляются в разные моменты времени, уравнение (3.27) можно переформулировать, сравнивая приведенные (дисконтированные) значения (PV) будущих затрат и выгод [1]:

$$\begin{aligned} PV(dc_s) &= PV[-dg \cdot N_p] \geq PV(SWTP) = \\ &= PV\left(\frac{g}{q} \frac{d\bar{E}(\rho, \mu, \delta)}{\bar{E}(\rho, \mu, \delta)} N_p\right) \approx -\frac{g}{q} C_x PV(dm). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Этот критерий применяется как к государственным, так и к частным ЛПР, даже когда последние могут иметь финансовые затраты намного выше, чем это подразумевает социальная ставка дисконтирования. Основанием для этого является принцип компенсации Калдора-Хикса, согласно которому благосостояние увеличивается, если решение выгодно для общества в целом, независимо от того, компенсируются ли инвестиции частного ЛПР в спасение жизни других людей или нет.

На практике денежная оптимизация и приемлемость социального риска должны сочетаться (гармонизироваться). Необходимо четко различать денежную оптимизацию и критерий приемлемости, который всегда должен оцениваться с социальной точки зрения. В данном отчете оптимизация выполняется путем максимизации целевой функции, представляющей индивидуальные (частные или социальные) предпочтения ЛПР[1]:

$$\max \left\{ E \left[\int_0^T (b_p(t) - c_p(t)) \cdot e^{-\gamma_p t} dt \right] \right\}, \quad (3.29)$$

где

индекс p указывает, что затраты c и выгоды b выбираются с точки зрения частного ЛПР.

Согласно теории принятия решений, решения должны основываться на ожидаемых значениях оптимизируемых параметров. Будущие денежные потоки дисконтируются с использованием выбранной частной дисконтной ставки γ_p . Возможные потери жизни могут быть включены в денежные параметры задачи, если ЛПР должно выплатить компенсацию в случае летального исхода.

Приемлемость в отношении безопасности жизни обеспечивается путем обязательного использования критерия социальной приемлемости (уравнение (28)) в

качестве граничного условия оптимизации. Маргинальные (предельные) затраты dc на спасение жизни определяются как прямые инвестиции dc_s , необходимые для повышения безопасности, оцениваемые с социальной точки зрения.

3.8 Иллюстративный пример. Взаимодействие оптимизации с критерием приемлемости и влияние вероятности отказа на критерий ИКЖ

Рассмотрим пример из [1] – строительство стального моста, которое финансируется и производится за счет средств частной фирмы. Она же будет его эксплуатировать и требовать плату за проезд. Задача рассматривается с частной и социальной точки зрения. С точки зрения частного ЛПР выполняется оптимизация «затраты–выгода». Критерий ИКЖ приемлемости риска используется в качестве граничного условия (ГУ), которое оценивается с точки зрения социального ЛПР.

Годовая выгода от эксплуатации моста рассчитывается по формуле [1]:

$$b(t) = k(t)k_1e^{\beta t} = \left(\frac{k_0 \cdot 24 \cdot 365}{1 + e^{-\alpha t}} \right) \cdot k_1e^{\beta t}, \quad (3.30)$$

где

k_1 – плата за проезд (ПЗП) (USD\$6.00/автомобиль),

$\beta=1\%$ – годовой прирост ПЗП,

$k(t)$ – плотность трафика на мосту,

$k_0 = 600$ – постоянная плотности движения (автомобилей/час),

$\alpha = 0,05$ – параметр моделирования роста трафика.

Затраты на строительство (т.е. первоначальные инвестиции) $c_c = 200$ млн. долл. США. Каждый раз, когда конструкции моста достигают минимального порога несущей способности, он ремонтируется и переходит в исходное состояние «как новый» по цене $c_m(t, p) = 28$ млн. долл. США. Расходы на мейнтенанс (техническое обслуживание) $c_m(t, p)$ накапливаются в дискретные моменты времени в соответствии с переменной решения p , которая определяется как временной интервал между последующими техническими обслуживаниями/ремонтами. Время зависящая вероятность отказа также зависит от p и моделируется с использованием распределения Вейбулла:

$$P_f(t, p) = 1 - e^{-\lambda \cdot \text{mod}(t/p)^k}, \quad (3.31)$$

где

параметры распределения: $\kappa = 2.0$ – коэффициент формы,

$\lambda = 0.0005/\text{год}$ – коэффициент масштаба.

Ожидаемый ущерб от отказа c_f складывается из затрат c_c , плюс дополнительные 20% на стоимость удаления, утилизации и переработки строительных материалов:

$$c_f(t, p) = P_f(t, p) \cdot c_c \cdot 1,2. \quad (3.32)$$

Частное ЛПР стремится максимизировать приведенную чистую выгоду:

$$\max_p \left\{ \sum_{i=1}^T (b(t) - c_m(t, p) - c_f(t, p)) \cdot e^{-\gamma p t} - c_c \right\}. \quad (3.33)$$

На рисунке 3.1 показана целевая функция для частной дисконтной ставки $\gamma_p = 5\%$ и временного горизонта $T = 80$ лет.

Видно, что с точки зрения частного ЛПР приемлемы временные интервалы между техническим обслуживанием от 3 до 19 лет. Денежный оптимум p^* достигается при интервале между последующими обслуживаниями, равном 8 годам.

Проанализируем как ВО моста влияет на целевую функцию. Рассмотрим случай, когда параметр λ изменяется от 0,00005/год до 0,005/год. На рисунке 3.2 показана зависимость оптимального интервала времени p^* между последующим обслуживаниями от параметра λ . Можно видеть, что оптимальное значение p^* резко уменьшается для значений λ с 0,00005 по 0,002 (с 17 до 5 лет).

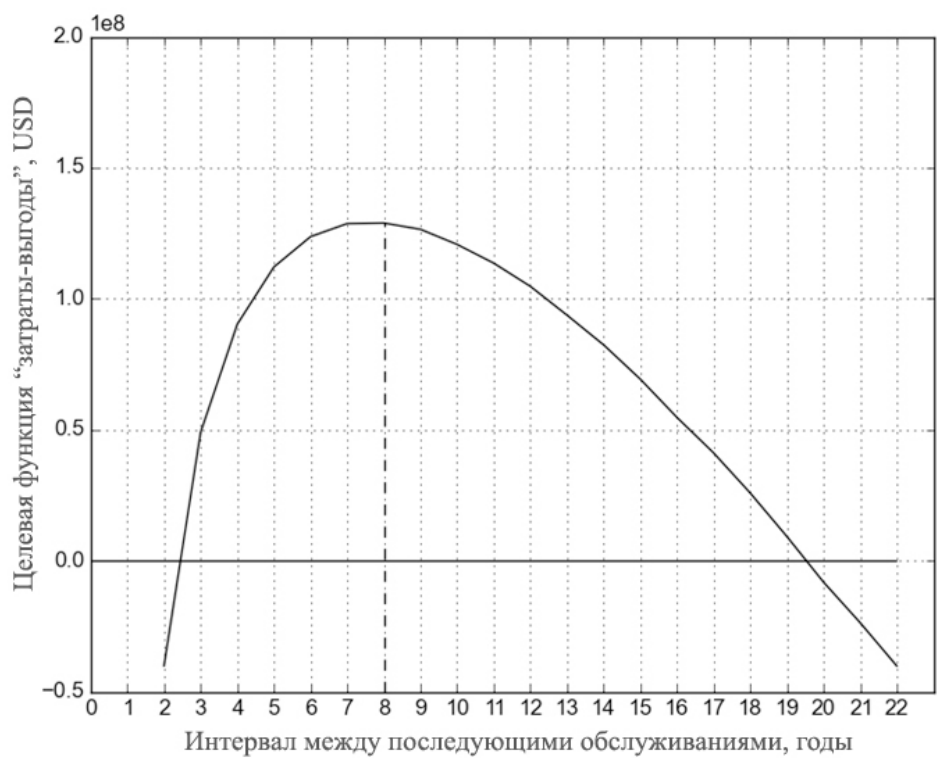


Рисунок 3.1 – Целевая функция для частного ЛПР на 80-летнем временном горизонте

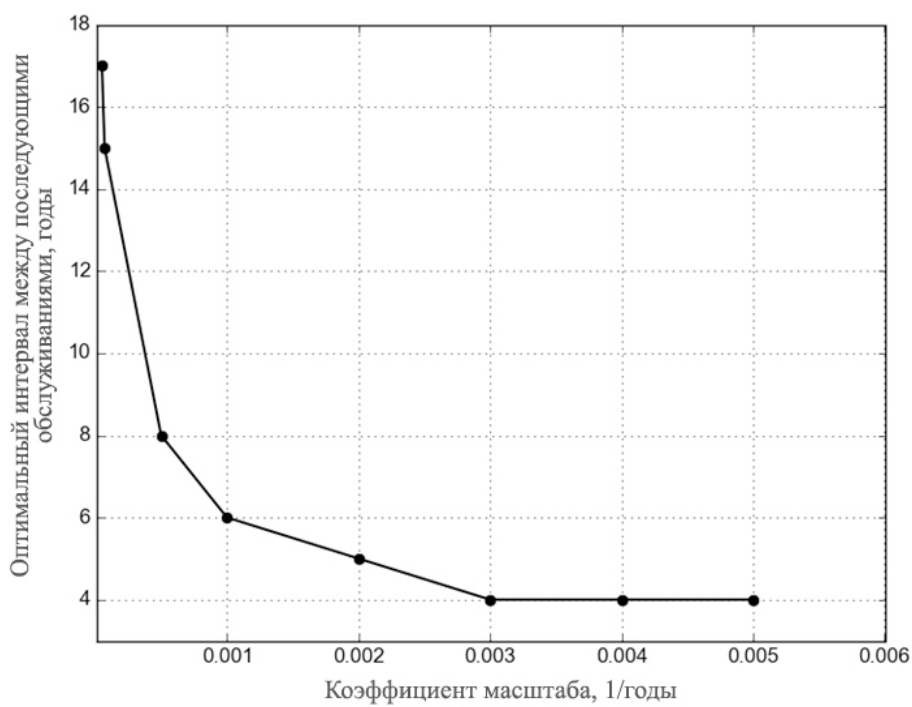


Рисунок 3.2 – Зависимость оптимального интервала между последующими обслуживаниями от коэффициента масштаба λ

Чтобы гарантировать приемлемость проекта с точки зрения безопасности жизни, необходимо проверить это с помощью критерия ИКЖ с социальной точки зрения.

Ожидаемое количество погибших из-за отказа моста рассчитывается как произведение средней занятости автомобиля (2,5 пассажира на автомобиль), вероятности смерти в случае отказа моста (0.98), количества автомобилей на мосту в одноминутном интервале и вероятности отказа моста (при непрерывном трафике):

$$m(t, p) = k(t) / 60 \cdot 2,5 \cdot 0,98 \cdot P_f(t, p). \quad (3.34)$$

Социальная готовность платить оценивается как произведение маргинального (предельного) изменения риска жизни $dm(t, p)/dp$ и демографической константы C_x , умноженной на g/q , где $g = \$45,900 \text{ USD}$, $q = 0.104$, $C_x = C_\Delta = 15.795$.

В экономике под маргинальной стоимостью (marginal cost) понимают издержки, затраченные на производство дополнительной единицы продукции. Предельные издержки рассчитываются как разность между общими издержками производства n единиц товара и общими издержками производства $(n - 1)$ единиц товара. Применяя это к нашему случаю:

$$\frac{dm(t, p)}{dp} = m(t, p - 1) - m(t, p), \quad p = 2, 3, \dots \quad (3.35)$$

Для сравнения, как СГП, так и предельные затраты на спасение жизни оцениваются как текущие значения (PV) путем дисконтирования при $t = 0$. Используется 2% социальная дисконтная ставка γ_s , поскольку критерий приемлемости оценивается с социальной точки зрения.

Приведенная (дисконтированная) СГП оценивается по формуле:

$$PV(СГП) = -\frac{g}{q} C_x \sum_{t=1}^{80} \frac{m(t, p - 1) - m(t, p)}{(1 + \gamma_s)^t}, \quad p = 2, 3, \dots, 10. \quad (3.36)$$

Предельные (маргинальные) затраты на сохранение жизни оцениваются как маргинальное изменение затрат на обслуживание при небольшом изменении параметра решения p , т.е., $dc_m(t, p)/dp$:

$$\frac{dc_m(t, p)}{dp} = c_m(t, p-1) - c_m(t, p), \quad p = 2, 3, \dots, \quad (3.37)$$

При этом нет необходимости включать затраты на строительство c_c , поскольку они не зависят от p . Стоимость ущерба от отказа $c_f(t, p)$ также исключена из социальных затрат на сохранение жизни: ее следует рассматривать как (предельную) выгоду от использования меры безопасности, поскольку она уменьшается за счет повышения безопасности моста.

Теперь приемлемые решения могут быть определены путем сравнения предельных затрат на спасение жизни и СГП, как показано на рисунках 3.3–3.5 для коэффициента масштаба $\lambda = 0.00005/\text{год}$, $0.0005/\text{год}$ и $0.005/\text{год}$ соответственно.

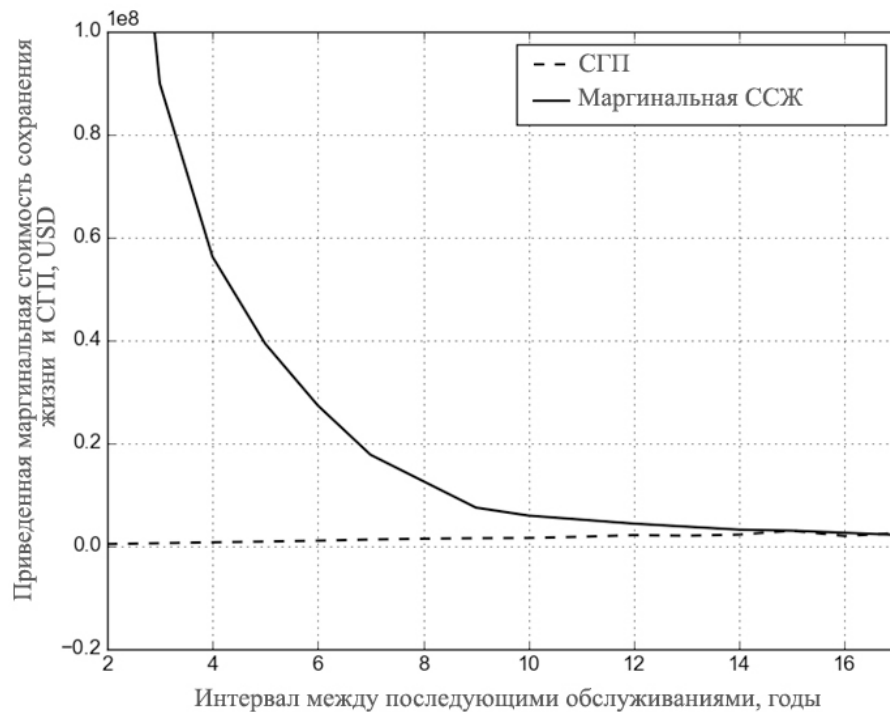


Рисунок 3.3 – Приведенная маргинальная стоимость сохранения жизни и СГП для временного горизонта 80 лет и 2% социальной дисконтной ставки ($\lambda = 0.00005/\text{год}$)

Видно, что приведенное значение маргинальных затрат на спасение жизни (черная линия) больше кривой СГП (пунктирная линия) для интервалов технического обслуживания, меньших 15 лет при $\lambda = 0,00005$; 7,7 года – при $\lambda = 0,0005$ и 3,9 года – при $\lambda = 0,005$.

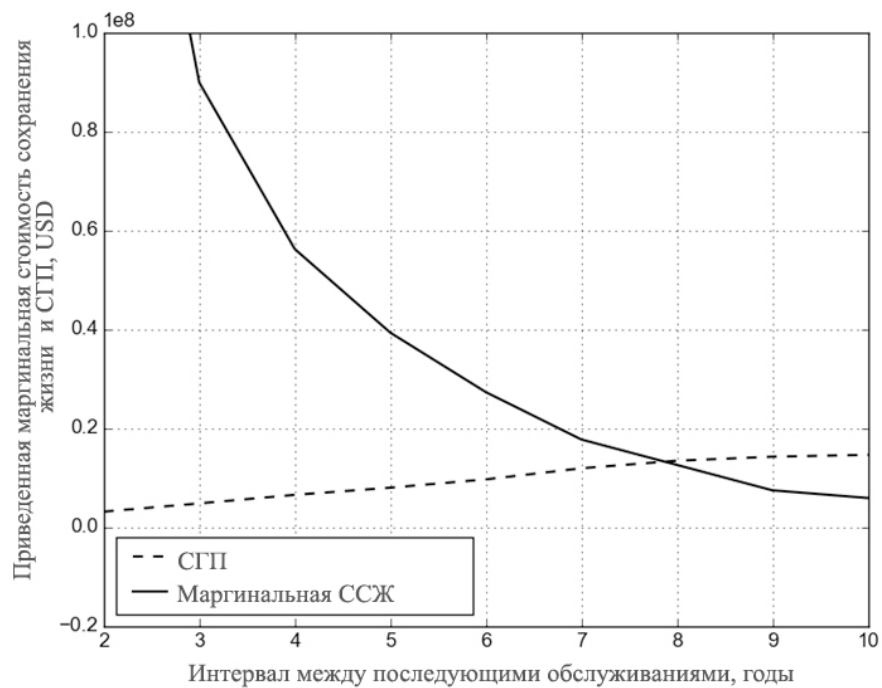


Рисунок 3.4 – Приведенная маргинальная стоимость сохранения жизни и СГП для временного горизонта 80 лет и 2% социальной дисконтной ставки ($\lambda = 0.0005/\text{год}$)

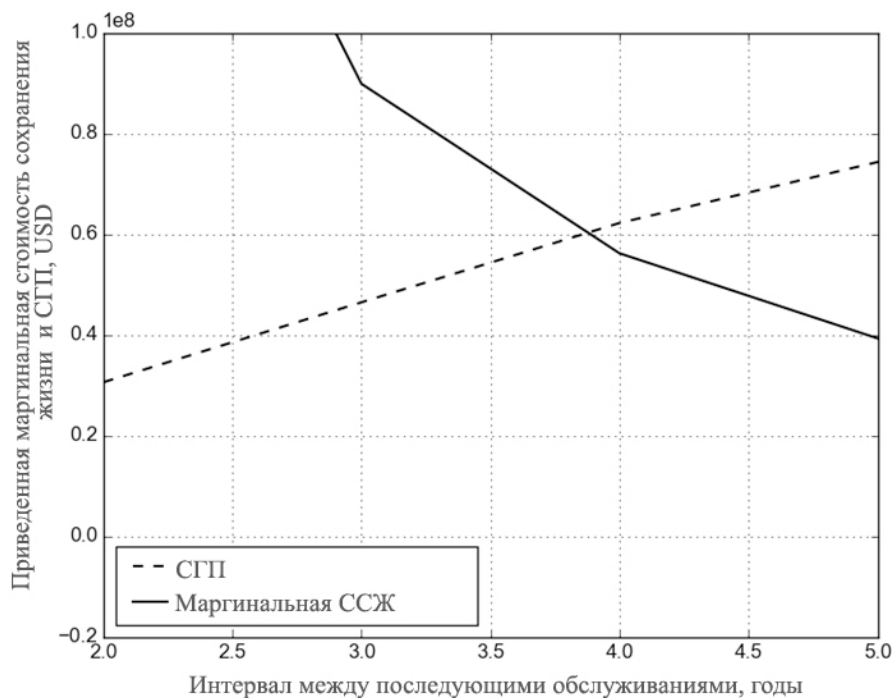


Рисунок 3.5 – Приведенная маргинальная стоимость сохранения жизни и СГП для временного горизонта 80 лет и 2% социальной дисконтной ставки ($\lambda = 0.005/\text{год}$)

Следовательно, денежный оптимум, найденный с точки зрения частного ЛПР, не является приемлемым решением с точки зрения общества, но очень близок к порогу принятия.

Чтобы получить более практические результаты, данный иллюстративный пример должен включать затраты на компенсацию человеческих жертв и учитывать изменение затрат на строительство для другой конструкции моста – чем меньше/надежнее, тем меньше/больше начальные затраты.

3.9 Заключение к разделу 3

Предложенная методика оптимизации расходов на безопасность инфраструктур основана на дифференциации денежной оптимизации и социального критерия приемлемости, который входит в задачу принятия решения как граничное условие [1].

В условиях рыночной экономики решение об оптимизации обычно принимается индивидуумом, по крайней мере, в пределах приемлемой области, определенной критерием ИКЖ. С другой стороны, критерий приемлемости основывается на социальных предпочтениях для спасения жизни. Таким образом, предельные затраты на сохранение жизни должны оцениваться с социальной точки зрения. На уровне проекта они могут быть определены как прямые инвестиции, необходимые для повышения безопасности.

Денежные выгоды, вытекающие из того же решения (например, снижение ущерба от отказа), не включаются в критерий приемлемости, поскольку это приводит к ненужному сильному ограничению на оптимизацию, выполняемую отдельными (индивидуальными) ЛПР.

С точки зрения общества, полученный уровень безопасности может не всегда быть оптимальным в денежном выражении, поскольку основное внимание в критериях приемлемости решений имеет безопасность жизни: оно обеспечивает выполнение всех эффективных спасающих жизнь инвестиций.

4 Способ оценки структурной надежности локальных и автономных ЭЭС с распределенной генерацией

4.1 Введение

Актуальность методологических, методических и расчетных проблем надежности электроэнергетических систем (ЭЭС) в современных условиях определяется прежде всего постоянным развитием ЭЭС и изменением условий их функционирования. Несмотря на бурное развитие теории надежности ЭЭС в последние полвека, расчеты, связанные с надежностью электро- и энергоснабжения потребителей, еще не находят должного применения в проектной и эксплуатационной практике. Частично это объясняется неподготовленностью работников энергосистем решать достаточно сложные математические проблемы, с большой неопределенностью исходных данных для конкретных объектов и, безусловно, отсутствием простых по интерфейсу программ, в полной мере учитывающих свойства надежности ЭЭС.

Рыночные отношения, полная хозяйственная и финансовая самостоятельность предприятий неизбежно приводят к упорядочению юридических и финансовых отношений между субъектами рынка, в частности энергосистемами и предприятиями-потребителями энергии. В части надежности ЭЭС это может проявляться, например, в зависимости тарифов на электроэнергию от уровня надежности электроснабжения, а также в механизме штрафов за недоотпуск электроэнергии. Регулирующее воздействие рынка не снижает, а повышает значимость и актуальность совершенствования методов расчета показателей надежности ЭЭС.

Развитие ЭЭС связано с повышением их сложности, с большей структурной и функциональной взаимосвязанностью составляющих частей и элементов. Расширяется множество состояний ЭЭС, которые приводят к крупным системным авариям. Каскад системных аварий в ряде западных ЭЭС в 70–80-х годах (США, Канада, Франция, Бельгия, Швеция и др.), где каждое из исходных событий, приведших к аварии, имело практически нулевую вероятность, заставил электроэнергетиков уделить более серьезное внимание маловероятным событиям. Здесь следует иметь в виду, что с увеличением числа элементов в системе происходит сдвиг максимума математического ожидания недоотпуска электроэнергии потребителям в сторону многократных (трехкратных и более) отказов. Повышается значимость машинных расчетов.

Дополнительным фактором, определяющим неизбежность поступательного развития математико-алгоритмической основы теории надежности ЭЭС, стало

совершенствование вычислительной техники, требующей не только адаптации существующих программных комплексов, но и пересмотра применяемых расчетных процедур. Развитие теории надежности ЭЭС идет по пути совершенствования математического аппарата и расширения сферы учитываемых факторов с целью повышения качества принимаемых решений путем создания и использования более совершенных программных комплексов

ЭЭС является динамической, постоянно развивающейся и изменяющейся системой. Отсюда ее полное описание практически невозможно. Бесконечно совершенствование инструментария по ее изучению. Анализ свойств системы, как правило, реализуется средствами моделирования. Модели ограниченно учитывают определяющие объект свойства и связи с окружающей средой; получаемые решения могут рассматриваться лишь как этапные, т.е. они должны непрерывно или периодически корректироваться и дополняться с учетом вновь появляющихся, ранее не учтенных факторов.

Основой теории надежности является теория вероятности, поскольку априори здесь рассматриваются вероятностные процессы – событие может произойти или нет. Функции распределения, с которыми оперируют вероятностные методы, являются лишь инструментарием при описании реальных процессов, причем при выборе функции распределения для описания процесса можно говорить лишь об их сопоставительной оценке. В то же время математические модели могут быть более или менее сложными в зависимости от выбора функции распределения. Отсюда возникает проблема вероятностного моделирования, сущность которого составляет выбор надлежащих функций распределения и разработка вычислительных процедур для получения результирующих оценок. Практически все исследователи в области теории надежности ЭЭС так или иначе сталкиваются с проблемой вероятностного эквивалентирования. В представленной работе вероятностное моделирование является как инструментарием, так и объектом исследования.

В зависимости от системы допущений и ограничений, а также от используемого математического аппарата задачи расчета показателей надежности (свойство безотказности) условно могут быть разделены на три группы, характеризующие надежность: структурная (схемная), режимная и балансовая надежности.

При расчете показателей *структурной надежности* считается, что отказа электроснабжения узла нагрузки нет, если существует хотя бы один путь, связывающий данный узел с источником питания. Здесь принимается допущение о бесконечной пропускной способности межузловых связей и игнорируются ограничения режимных

параметров. Основным математическим аппаратом при анализе структурной надежности ЭЭС является общая теория надежности технических систем. Фундаментальные труды Ю.Б. Гука, В.Г. Китушина, Э.А. Лосева, М.Н. Розанова, Ю.Н. Руденко, Ю.А. Фокина и др., а также заметное снижение в настоящее время числа публикаций позволяют считать данное направление надежности ЭЭС в большей части изученным. Работы авторского коллектива, законченные созданием исследовательского программно-вычислительного комплекса, выполнялись в процессе становления и развития теории структурной надежности ЭЭС.

Однако математический аппарат структурной надежности не достаточен для анализа надежности систем типа мини- и микрогрид с возобновляемыми источниками энергии, где значимым фактором является неопределенность величины генерирующей мощности и ограниченная пропускная способность межузловых связей. Здесь более эффективным направлением является *балансовая надежность ЭЭС*, которая лежит в основе задач, связанных с оптимизацией резервов мощности. Вероятностные характеристики дефицита мощности необходимы для обоснования инвестиций в генерирующую и сетевую часть энергосистем. Несмотря на то что развитие теории надежности ЭЭС началось именно с балансовой надежности, данное направление, на наш взгляд, еще далеко до завершения. Вероятно, основной причиной этого являются трудности при работе с функциями распределений случайных непрерывных величин.

Структура рыночных отношений в энергетике формирует новый класс задач – анализ спроса и предложений на электрическую энергию, определение и оптимизация коммерческих резервов мощности в ЭЭС, формирование тарифов и страхование технических услуг. В силу вероятностного характера спроса и предложения данная проблематика тесно связана с направлением балансовой надежности ЭЭС. В то же время задачи оперативного управления коммерческими резервами и тарифами требуют получения решения в темпе процесса, с заблаговременностью до нескольких минут. Это в корне меняет отношение к проблеме балансовой надежности, которая ранее была ориентирована на задачи перспективного развития.

Переход России на новые экономические принципы развития потребовал разработки фундаментальных основ развития ЭЭС в новых условиях. Математический аппарат теории рыночных отношений в энергетике России находится в стадии своего развития. Составной частью новой зарождающейся теории являются работы по анализу договорных перетоков и тарифов на обменную мощность по межсистемным связям.

Целью работы являлось создание эффективных математических методов и алгоритмов оценки структурной и балансовой надежности ЭЭС, основанных на базе вероятностного эквивалентирования сложных электроэнергетических структур.

Для этого потребовалось разработать:

- принципы автоматизированного построения расчетных схем надежности на основе электрической схемы энергосистемы,
- математические алгоритмы вероятностного преобразования расчетных схем,
- математический аппарат вероятностного эквивалентирования с помощью редуцированных распределений случайных величин,
- принципы построения и использования функций распределения, являющихся результатом многократной свертки редуцированных распределений,
- математические и программные алгоритмы определения показателей структурной и балансовой надежности сложнзамкнутых распределительных сетей с возобновляемыми источниками энергии.

Разработанные математические методы и алгоритмы основаны на элементах математического анализа, теорий вероятности и математической статистики, графов, нелинейного программирования, дифференциального и интегрального исчисления, моделирования, общей теории надежности.

В ходе работы выполнены исследования и предложены следующие решения:

- разработан математический метод расчета показателей структурной (схемной) надежности ЭЭС, основанный на вероятностном преобразовании расчетной схемы,
- для решения задач балансовой надежности ЭЭС предложен математический аппарат вероятностного эквивалентирования с помощью редуцированных распределений небалансов мощности,
- для вычисления интегральных показателей балансовой надежности ОЭЭС разработаны принципы построения функций распределения, являющихся результатом многократной свертки редуцированных распределений.

Практическая ценность работы заключается в ее ориентации на получение количественных оценок надежности ЭЭС в практике их проектирования и эксплуатации, что может способствовать повышению качества инженерных решений. Конечным этапом исследований является разработка программных комплексов, которые апробированы на реальных задачах энергетики. Предложенные алгоритмы расчета затрат позволяют реализовать механизм договорных отношений между ЭЭС.

Достоверность результатов работы основана на адекватном соответствии предлагаемых математических моделей реальным принципам функционирования электрических систем и сопоставлении результатов расчетов по тестовым схемам, с расчетами, выполненными в других организациях на основе иных математических методов и алгоритмов.

4.2 Математические модели расчета показателей структурной надежности ЭЭС с отказами элементов типа «обрыв»

При расчетах структурной надежности принимается допущение о экспоненциальном распределении длительности безотказной работы элементов сложной структуры. Это позволяет эквивалентировать последовательно-параллельные структуры. При последовательном эквивалентировании основным соотношением является равенство эквивалентных интенсивности и кумулятивной длительности состояния отказа сумме соответственно интенсивностей и кумулятивных длительностей отказа последовательно соединенных элементов структуры. При параллельном соединении элементов таким соотношением является равенство эквивалентных интенсивностей и коэффициентов готовности сумме соответствующих показателей параллельной структуры.

При анализе сложных структур возможны два подхода к решению задачи – последовательная и параллельная процедуры определения показателей надежности (ПН) узлов расчетной схемы. В первом случае последовательно назначаются узлы, ПН которых требуется определить, и схема путем эквивалентных преобразований сводится к виду: источник питания – назначенный узел. Спецификой данного подхода является появление несворачиваемых параллельно-последовательным преобразованием расчетных структур (структуры с узлами ранга два и выше). Решением проблемы здесь является разработанная процедура преобразования узлов ранга три и итерационная процедура определения показателей структурной надежности систем с узлами ранга 4 и выше. Недостатком последовательной процедуры является относительно большая длительность расчетов, вызванная повтором в процессе преобразования схем одних и тех же расчетов.

Преобразования типа «звезда–треугольник», «треугольник–звезда». Получены системы алгебраических уравнений для преобразования типа «звезда–треугольник», «треугольник–звезда» не только применительно к вероятностям (известное решение), но и интенсивностям и кумулятивным длительностям отказов. Рассмотрены способы решения расчетных систем уравнений для быстрого определения искомых показателей надежности. Как показывают проверочные расчеты, в результате решения задачи эквивалентирования

возможно получение, например, отрицательных величин интенсивностей отказов, что не согласуется с понятием вероятности, интенсивности или длительности отказов. В работе даются рекомендации по преодолению указанных проблем. В частности, предлагается отдавать предпочтение преобразованию «треугольник–звезда», а не «звезда–треугольник».

Параллельная процедура преобразования схем. При параллельной процедуре ПН всех узлов вычисляются в рамках единого процесса исключения-восстановления узлов. При этом не назначается последний узел, относительно которого осуществляется свертка расчетной схемы. Первый этап исключения узлов обладает большей по сравнению с последовательной процедурой вероятностью абсолютной свертки узлов сложной структурной схемы. Основная проблема возникает на этапе восстановления узлов.

Восстановление узлов ранга 2. При восстановлении узла i второго ранга (число смежных связей) расчетная схема приводится к виду рисунка 4.1, где связи x, y, z являются эквивалентными. Ветвь z эквивалентирует совместные отказы. ПН эквивалентных связей определяются из условия равенства известных на данном этапе расчетного процесса результирующих ПН инцидентных узлов j и k тем ПН, которые могут быть получены из эквивалентной схемы

$$\begin{aligned} A_k &= A_z + A_{kk} + A_x \cdot (A_y + A_{jj} + A_w), \\ A_j &= A_z + A_{jj} + A_y \cdot (A_x + A_{kk} + A_w), \end{aligned} \quad (4.1)$$

где

A_s – отказ элемента s ,

A_{jj}, A_{kk} – собственные отказы соответствующих узлов,

ветвь w моделирует последовательно-параллельную структуру связей между узлами j и k ,

знаками умножения и суммирования представлены операции конъюнкции и дизъюнкции.

В частности, для вероятностей система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} a \cdot q_x + q_x q_y &= (Q_j - q_z - p_z q_{jj}) / (p_z p_{jj} p_{kw}), \\ b \cdot q_y + q_x q_y &= (Q_k - q_z - p_z q_{kk}) / (p_z p_{kk} p_{jw}), \end{aligned} \quad (4.2)$$

где

q_x, q_y – искомые вероятности отказов эквивалентных ветвей,

$$p = 1 - q,$$

Q_j, Q_k – известные на данном этапе результирующие вероятности отказов инцидентных узлов,

параметры a, b определяются через известные параметры узлов и ветвей схемы.

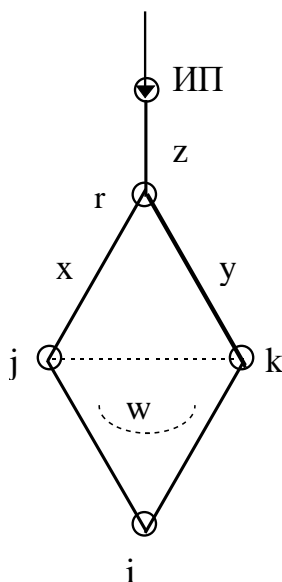


Рисунок 4.1 – Эквивалентная расчетная схема

Нелинейный характер представленной системы уравнений определяет неоднозначность решений. Из возможных решений выбираются те, которые удовлетворяют требованиям вероятностей ($0 \leq q \leq 1$).

Аналогично вероятностям составляются системы уравнений для интенсивностей отказов λ_x, λ_y и редко используемых в общей теории надежности кумулятивным длительностям γ_x, γ_y , которым в работе отводится серьезное внимание. При известных $\gamma_x, \gamma_y, \lambda_x, \lambda_y$ определяются математические ожидания длительностей восстановления τ_x, τ_y .

Для последующих расчетов вычисляются вероятностные параметры совместных отказов рассматриваемого и смежных узлов (события B_{ij}, B_{ik}). В частности, для узлов i, j событие B_{ij} описывается следующим логическим выражением:

$$B_{ij} = B_{jk} + (A_x + A_{jj})(A_y + A_{kk}). \quad (4.3)$$

Сложнозамкнутые структуры. Для расчета показателей структурной надежности сложнозамкнутых схем с отказами элементов типа «обрыв» рассмотрена возможность использования итерационных процедур. Предложены безбазовая, монобазовая и полибазовая математические модели. На каждом шаге итерационного процесса произвольный узел i рассматривается ограниченно, совместно с инцидентными узлами (множество Γ_i). Показатели надежности узла i определяются на основе данных о надежности инцидентных узлов, т.е. не учитывается истинная структура той части расчетной схемы, которая находится вне зоны близлежащих узлов. Дополнительно к Γ_i каждому узлу i ставится в соответствие ближайший к i узел β с рангом не менее трёх, не являющийся ИП, отказ которого неизбежно приводит к отказу узла i (рисунок 4.2) Упомянутый узел условно назван базовым. В безбазовой модели в качестве базового узла принимается источник питания.

Отказ электроснабжения узла i (событие A_i) имеет место, если происходит одно из двух событий:

- A_{ii} – непосредственный отказ узла i ,
- S – одновременный отказ электроснабжения по всем ветвям, примыкающим к узлу i .

События A_{ii} и S считаются независимыми, связанными последовательно по надежности. В то же время событие S представляется в виде совокупности Γ_i параллельных по надежности событий S_j (в общем случае зависимых), заключающихся в отказе электроснабжения узла по связи $i-j$, $j \in \Gamma_i$. В свою очередь, отказ электроснабжения узла по связи $i-j$ возможен, если (в условиях отсутствия связи $i-j$) имеет место условный отказ узла j (событие $A_{i/j}$ с параметрами: вероятность $Q_{i/j}$, интенсивность $l_{i/j}$, относительная длительность $\gamma_{i/j}$) или обрыв связи $i-j$ (событие A_{ij} с параметрами: q_{ij} , $\lambda_{i/j}$, $\gamma_{i/j}$).

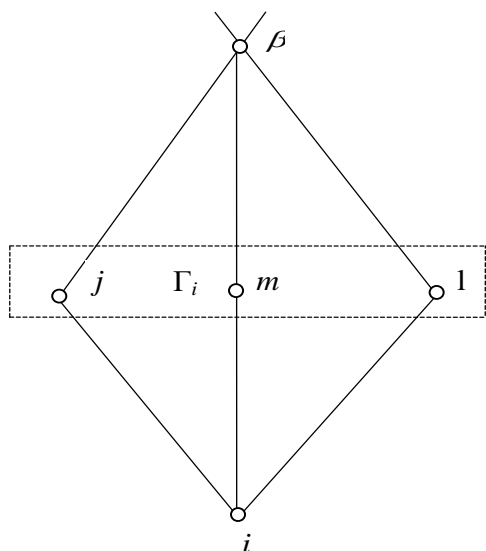


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема

Введение системы базовых узлов усложняет расчетный алгоритм, поскольку на каждом шаге итерационного процесса требуется проведение логического анализа для формирования множества базовых узлов, но одновременно повышается точность расчетов, поскольку здесь учитываются узлы – «одноэлементные сечения».

При анализе системы базовых узлов, соответствующих узлам из Γ_i , различаются следующие возможные ситуации. Среди рассматриваемых базовых узлов есть узел i . Это означает, что некоторые узлы из множества Γ_i связаны с источником питания через узел i и не влияют на его надежность. Эти узлы при определении показателей надежности узла i исключаются из рассмотрения. В работе доказано, что оставшиеся базовые узлы являются одинаковыми.

В результате вероятностные показатели отказа узла i определяются исходя из логической формулы

$$A_i = A_{ii} + A_\beta + \prod (A_{ij} + A_{j/i}^*), \quad (4.4)$$

где

$A_{j/i}^*$ – событие, заключающееся в отказе узла j при отсутствии связи с узлом i и работоспособного состояния базисного узла.

Развитием монобазовой модели является полибазовая модель, согласно которой каждому узлу ставится в соответствие множество условных базовых узлов (УБУ). УБУ $_{j/i}$ – это базовый узел, соответствующий узлу j при условии отсутствия связи с узлом i (узел β_y ,

на рисунке 4.3). Отсюда следует, что каждому узлу соответствует некоторое множество УБУ. Случай, когда совпадают все УБУ, сводится к монобазовой модели.

В данной модели наряду с результирующими показателями надежности узла i требуется определять условные $Q_{i/k}$, $\lambda_{i/k}$, $\gamma_{i/k}$. Это можно сделать повторением расчетной процедуры после отбрасывания той или иной связи, что для сильно связанной структуры приводит к увеличению затрат машинного времени. Существенную экономию времени дает процедура эквивалентирования полибазовой структуры к монобазовой.

Для каждого узла из множества Γ_i можно построить генеалогическое дерево, где каждый родитель является базовым узлом. Параметры надежности ветвей дерева определяются из составляющих последовательного соединения при известных результирующих показателях надежности.

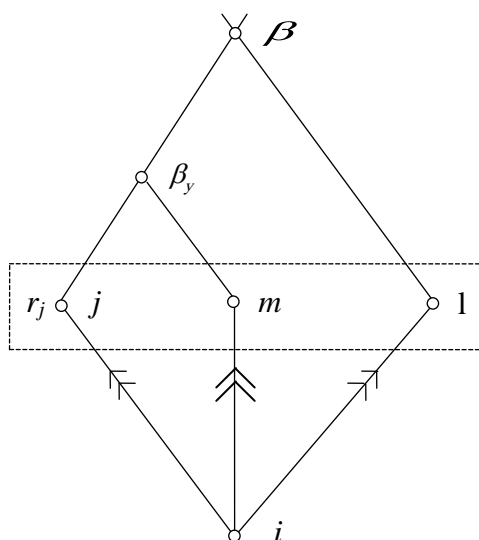


Рисунок 4.3 – Условные базовые узлы

По отношению к рассматриваемому узлу генеалогическое дерево представляет собой параллельно-последовательную структуру, и определение искомых показателей надёжности не является сложной процедурой. Однако для построения дерева требуется полная информация о родственных связях, поскольку неизвестно, какие условные родители могут потребовать своего прародителя. Это вынуждает хранить матрицу базовых узлов в полном объёме. Для реальных расчетных схем систем электроснабжения это нежелательно из-за большой размерности матрицы, а также из-за того, что наряду с полной матрицей УБУ требуются полные матрицы условных показателей надежности $Q_{i/k}$, $\lambda_{i/k}$, $\gamma_{i/k}$. Указанные факторы позволяют предложить упрощение полибазовой модели за счет того, что

непосредственным условным родителям ставятся в соответствие не УБУ, а абсолютные базовые узлы (АБУ), как в монобазовой модели. Поскольку между условными родителями имеется непосредственная связь через узел i , все УБУ-родители имеют единственного абсолютного прародителя (АБУ). Таким образом, генеалогическое дерево состоит из четырех уровней: ИП–прародитель; связи: прародитель–условные родители; условные родители–узлы из Γ_i ; связи: узлы из Γ_i –узел i . Отсюда для каждого узла необходимо хранить дополнительную информацию об УБУ, число которых равно числу связей данного узла.

Разработанные итерационные методы расчета структурной надежности эффективны при определении результирующих показателей структурных схем с узлами ранга не менее четырех.

4.3 Отказы типа «КЗ»

Метод обобщенного эквивалентирования распространяется на ЭЭС с отказами элементов типа «КЗ» (ОТКЗ). Показывается, что расчеты надежности ЭЭС в модели ОТКЗ можно выполнять по той же расчетной схеме, что и с отказами типа «обрыв». С целью унификации расчетов все элементы электрической сети представляются в виде эквивалентных коммутационных аппаратов.

Математическая модель универсальной ветви расчетной схемы позволяет использовать единую расчетную схему для моделей ОТО и ОТКЗ и моделировать элементы с односторонним пропуском электрической энергии (двухобмоточные трансформаторы, выключатели с АВР и др.). Основными расчетными параметрами в модели ОТКЗ являются $\lambda_{КЗ}$ – интенсивность отказов типа «КЗ» и ρ – относительная частота пропуска коммутационным аппаратом внешнего КЗ (в общем случае несимметричная величина). Если элемент расчетной схемы не является коммутационным аппаратом, его ρ принимается равной единице.

Как и в модели ОТО, при расчете показателей надежности за основу принята процедура исключения–восстановления узлов электрической сети. В модели ОТКЗ большое значение имеет шунтирующее воздействие КЗ на отдельные подсистемы электрической сети. Дополнительное условие тождественности «парного» отказа смежных (относительно рассматриваемого узла) узлов в исходной и эквивалентной схемах ОТКЗ позволяет сформировать систему уравнений эквивалентного преобразования и получить ее решение в аналитическом виде.

На этапе восстановления узлов второго ранга в ОТКЗ выполняется моделирование эквивалента восстановленной части расчетной схемы. Определение эквивалентных

параметров при этом сводится к процедуре исключения некоторых узлов. Отсюда прямой и обратный ходы преобразований метода, обобщенного эквивалентирования могут быть описаны единой методологией.

В модели ОТКЗ учитывается возможность совместных отказов типа «обрыв» и «КЗ».

Анализ тестовой схемы подтверждает достаточно высокую точность разработанной модели. В то же время математический метод является оценочным по замыслу, поэтому возможно дальнейшее совершенствование расчетной процедуры, в том числе и путем снижения погрешности при исключении–восстановлении узлов.

С целью повышения точности результатов на промежуточных этапах эквивалентирования мостиковых схем выполнен анализ математических методов: пространства состояний, минимальных сечений, декомпозиции и статистических испытаний. Для программной реализации рекомендуется метод пространства состояний.

Дополнительное увеличение быстродействия программного комплекса достигается применением предварительного эквивалентирования, суть которого сводится к исключению без последующего восстановления узлов, показатели надежности которых определять не требуется.

Разработанные расчетные процедуры позволяют преодолеть недостаток методов эквивалентирования, связанный с трудностью учета отказов, имеющих общую причину. Достигается это формированием и соответствующей обработкой матрицы одновременных отказов.

Специфика расчетов распределительных сетей с распределенной генерацией. Распределительные сети среднего и низкого напряжений, как правило, имеют радиальную структуру, где определение показателей структурной надежности не представляют каких-либо проблем. Однако наличие возобновляемых источников энергии (ветро- и солнечные электростанции) вызывает необходимость учета ограниченного ресурса генерирующей мощности. Отсюда допущение о бесконечной мощности генерирующих источников здесь является неприемлемым. Для таких систем более пригодным является математический аппарат балансовой надежности (БН) ЭЭС.

Основными факторами, определяющими показатели балансовой надежности (ПБН) объединения систем (с генерацией ограниченной мощности), являются характеристики небалансов мощности (разность между нагрузкой и генерацией) отдельных ЭЭС и пропускных способностей межсистемных связей.

Редуцированное распределение дефицита мощности. Собственные небалансы мощности энергосистем как случайные величины описываются распределениями $F_j(x)$,

$j=1, \dots, n$ с параметрами (M_j, D_j) – способы построения упомянутых функций достаточно полно описаны в литературе. Для построения результирующей функции распределения небаланса мощности, например, ЭЭС (А) с учетом взаимопомощи от ЭЭС (В) принимается во внимание, что случайный переток мощности по межсистемной связи N_{ba} , определяемый небалансом мощности N_b ЭЭС (В), ограничивается пределами по пропускной способности связи В–А: $-P_{ba} \leq N_{ba} \leq P_{ab}$. Это реализуется отключением избыточной нагрузки ЭЭС (В) при $N_b > P_{ab}$ или генерации при $N_b < -P_{ba}$. Математически данная процедура моделируется путем модификации функции распределения (рисунок 4.4). Упомянутая процедура идентифицируется как редукция небаланса мощности или его функции распределения. Редуцированная на интервале (a, b) функция распределения $F_y(x)$ определяется выражением

$$F_y(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ F(x), & a \leq x < b, \\ 1, & x > b. \end{cases} \quad (4.5)$$

Следует отметить разницу в определении усеченного (в классическом понимании) и редуцированного распределений. На интервале (a, b) плотность редуцированного совпадает с плотностью исходного распределения, в то время как плотность усеченного распределения отличается от исходного на нормирующий множитель. Интегральная функция усеченного распределения не имеет скачков – начинается с нуля на левой и кончается единицей на правой границе области усечения, в то время как редуцированная интегральная функция распределения имеет скачки первого рода на границах области усечения.

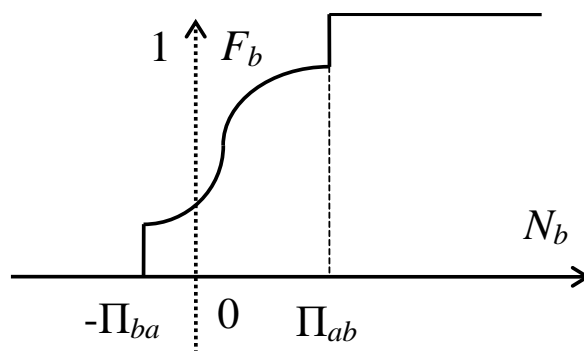


Рисунок 4.4 – Редуцированная функция распределения

В основу процедуры расчета показателей балансовой надежности, как и при расчете показателей структурной надежности, положен принцип вероятностного эквивалентирования электрической схемы путем исключения и восстановления узлов. Наиболее простым способом исключения узлов первого ранга является их эквивалентирование математическим ожиданием (МО) и дисперсией редуцированного перетока мощности по межсистемной связи. Чаще всего небаланс мощности задается нормальным распределением. Получены аналитические выражения для математического ожидания и дисперсии редуцированного нормального распределения:

$$M_y = E(M, \sigma, a, b) = aF(a) + b[1 - F(b)] + M[F(b) - F(a)] + \sigma^2[f(a) - f(b)]. \quad (4.6)$$

$$D_y = D(M, \sigma, a, b) = a^2F(a) + b^2[1 - F(b)] - M_y^2 + M^2[F(b) - F(a)] + 2M\sigma^2[f(a) - f(b)] + \sigma^2[(a - M)f(a) - (b - M)f(b)] + \sigma^2[F(b) - F(a)]. \quad (4.7)$$

Представленные выражения с некоторыми оговорками могут быть распространены на более широкий класс функций распределений, в частности на гамма-распределение. Применение нормального и гамма-распределений для описания небаланса мощности ЭЭС позволяет перейти к работе с математическими ожиданиями и дисперсиями, что существенно упрощает вероятностные расчеты.

В общем случае пропускная способность связи не может быть описана как дискретная или случайная непрерывная величина, поскольку число состояний связи отлично от единицы, но относительно невелико. Для отображения пропускной способности в работе принят математический аппарат вероятностных рядов.

Результирующее воздействие $N_A(B)$ подсистемы (B) на (A) при представлении пропускной способности межсистемной связи вероятностным рядом $\{-PC_{AB,k}, PC_{BA,k}, p_k\}$ описывается распределением типа «взвесь» с весами p_k , определяемыми вероятностями состояний связи. Математическое ожидание и дисперсия небаланса мощности $N_A(B)$ определяются выражениями

$$\begin{aligned} M_{A(B)} &= \sum_k p_k E(M_B, \sigma_B, a_k, b_k), \\ D_{A(B)} &= \sum_k p_k D(M_B, \sigma_B, a_k, b_k), \end{aligned} \quad (4.8)$$

где

M_B, σ_B^2 – математическое ожидание и дисперсия небаланса мощности подсистемы B;

a_k, b_k – нормированные пределы пропускной способности связи

$$a_k = -\frac{nC_{BA,k} + M_B}{\sigma_B}, \quad b_k = \frac{nC_{AB,k} - M_B}{\sigma_B}.$$

Данная процедура может быть распространена на случай частичной дискретности небаланса мощности ЭЭС (отключение наиболее мощных генераторов):

$$\begin{aligned} M_{A(B)} &= \sum_s \sum_k p_k E(M_{bs}, \sigma_{bs}, a_k, b_k), \\ D_{A(B)} &= \sum_s \sum_k p_k D(M_{bs}, \sigma_{bs}, a_k, b_k). \end{aligned} \quad (4.9)$$

С целью экономии памяти ЭВМ при использовании аппарата вероятностных рядов используется замена части агрегатов (относительно малой мощности) одной эквивалентной группой, которую к тому же можно рассматривать как нагрузку со знаком минус. Реально рекомендуется оставлять не более двух–трех групп наиболее мощных агрегатов, что сводит объем исходных данных, описывающих ЭЭС, до 8–10 групп параметров.

Другой путь решения проблемы памяти заключается в эквивалентировании не группы генераторов, а некоторой части вероятностного ряда. Пусть будут выделена группа составляющих вероятностного ряда: $\{p_j, M_j, j \in J\}$. Оставшиеся члены ряда эквивалентированы. При этом возможны варианты эквивалентирования.

Эквивалентный генератор. Эквивалентизируемая часть здесь равноценна остальным членам вероятностного ряда и представлена параметрами $\{p_3, M_3\}$, $p_3 = 1 - \sum_{j \in J} p_j$. В качестве критерия эквивалентирования может служить, например, неравенство $p_3 < \varepsilon$, где ε – заданное достаточно малое число.

Результирующая комбинированная функция распределения небаланса мощности может быть представлена в виде

$$F_{\Sigma}(x) = p_3 F(x, M_3, D_L) + \sum_{j \in J} p_j F(x, M_j, D_L), \quad (4.10)$$

где

D_L – дисперсия нагрузки.

Математическое ожидание эквивалентной группы

$$M_3 = M_L - (M_G - p_J \sum_{j \in J} p_j^* G_j) / p_3, \quad (4.11)$$

где

$$p_j^* = p_j / p_J.$$

Последнее равенство представляет математическое ожидание через группу J меньшей размерности. Принимая во внимание, что $M_3 = M_L - G_3$, получаем мощность эквивалентного генератора:

$$G_3 = (M_G - p_J \sum_{k \in J} p_k^* G_k) / p_3, \quad (4.12)$$

что эквивалентно критериальному соотношению

$$M_G = p_3 G_3 + p_J G_J, \quad (4.13)$$

где

G_J, G_3 – средние генерации в соответствующих группах.

Вектор данных, представляющий небаланс мощности ЭЭС, в данной модели описывается структурой $\{M_L, D_L, G_3, p_j, j \in J\}$.

Эквивалентная генерирующая система. Эквивалентлируемая группа представляется, например, нормальным распределением. Математическое ожидание группы такое же, как и в предыдущем случае. Дисперсия эквивалентной группы определяется из условия неизменности результирующей дисперсии D :

$$D_{\circ} = D + M^2 - \sum_{j \in J} p_j (D_j + M_j^2) - M_{\circ}^2. \quad (4.14)$$

При данном способе эквивалентирования вектор данных, представляющий небаланс мощности ЭЭС, описывается структурой $\{M_L, D_L, M_{\circ}, D_{\circ}, P_j, G_j, j \in J\}$.

Безусловно, второй способ эквивалентирования точнее первого. Однако разница в точности практически не ощутима. В то же время в силу более однородной структуры исходных данных первый способ предпочтительнее в программной реализации.

Критерий отбора группы эквивалентирования $p_{\circ} < \varepsilon$ может быть недостаточно эффективным при оценке вероятностей маловероятных событий, таких как появление дефицита мощности в избыточной системе. Здесь вероятность события сопоставима с ε . Поскольку большинство оцениваемых событий характеризуется соотношением $x=0$ (дефицит положителен, наличие в соседней ЭЭС резерва генерирующей мощности и др.), то в качестве критерия можно рассматривать относительный вклад эквивалентной группы в оцениваемую величину, например,

$$p_{\circ} F(0, M_{\circ}, D_L) / F_{\Sigma}(0) < \varepsilon. \quad (4.15)$$

Редукция комбинированной функции распределения сводится к редукции аддитивных составляющих:

$$F_{\Sigma}^y(x) = p_{\circ} F^y(x, M_{\circ}, D_{\circ}) + \sum_{j \in J} p_j F^y(x, M_j, D_L). \quad (4.16)$$

Математическое ожидание и второй начальный момент редуцированного распределения имеют аналогичную структуру.

При объединении дискретных распределений генерации и пропускных способностей связей для математического ожидания и второго начального момента используются расчетные выражения типа «взвесь»:

$$\begin{aligned}
M^y &= \sum_j \sum_i p_j^z \cdot p_i^l \cdot M^y(M_j, D_L, a_i, b_i), \\
\chi^y &= \sum_j \sum_i p_j^z \cdot p_i^l \cdot \chi^y(M_j, D_L, a_i, b_i).
\end{aligned}
\tag{4.17}$$

Символы z, l приведены для идентификации принадлежности вероятности к генерации или линиям.

Воздействие ЭЭС (А) через ЭЭС (В) на другие ЭЭС ((С) и др., см. рисунок 4.5) реализуется через объединение редуцированного небаланса мощности ЭЭС (А) с небалансом мощности ЭЭС (В). При этом небаланс мощности ЭЭС (В) также редуцируется, поскольку генерация ЭЭС (В) не должна превышать $\Pi_{ba} + \Pi_{bc}$, а нагрузка – $(\Pi_{ab} + \Pi_{ca})$. Таким образом, результирующая функция распределения небаланса мощности ЭЭС (В) с учетом небаланса мощности ЭЭС (А) при их совместном воздействии на другие ЭЭС определяется логическим выражением:

$$AB = B_{(ba+bc)}^{(ab+cb)} + A_{ab}^{ba},
\tag{4.18}$$

где

A_{ab}^{ba} или $(M_a, D_a)_{ab}^{ba}$ представляет процедуру определения МО и дисперсии редуцированного распределения небаланса мощности.

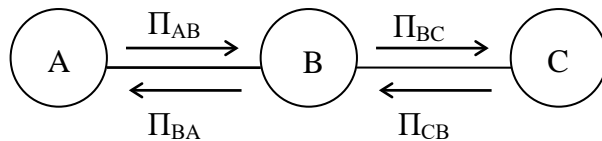


Рисунок 4.5 – Радиальная структура

В зависимости от точности эквивалентирования процесс преобразования схемы (исключение узлов радиальной цепи) может развиваться в трех направлениях, где суммарный небаланс мощности представляется нормальным, редуцированным или комбинированным распределением.

С целью однородности вычислительного процесса, а следовательно, и снижения затрат машинного времени, возможно эквивалентирование результирующего распределения внутри интервала $(a+c, b+d)$ кривой нормального распределения с параметрами M_c, D_c . В результате будет получено эквивалентное редуцированное распределение $F_c(x, M_c, D_c, a+c, b+d)$.

Задача определения параметров (M_c, D_c) эквивалентного нормального редуцированного распределения при заданных результирующих параметрах (M_p, D_p) и пределах (a, b) является обратной по отношению к задаче определения (M_p, D_p) при заданных M_c, D_c, a, b . Искомые параметры определяются решением нелинейной относительно (M_c, D_c) системы уравнений

$$\begin{aligned} M_p &= LF_L + R[1 - F_R] + M_c [F_R - F_L] + \sigma_c (f_L - f_R), \\ D_p &= L^2 F_L + R^2 [1 - F_R] - M_p^2 + M_c^2 [F_R - F_L] + \\ &+ 2M_c \sigma_c [f_L - f_R] + \sigma_c [(L - M_c) f_L - (R - M_c) f_R] + \sigma_c^2 [F_R - F_L], \end{aligned} \quad (4.19)$$

где

$$L = a + c, \quad R = b + d, \quad F_L = F_1(a)F_2(c) \text{ и } F_R = F_1(b)F_2(d);$$

$F_1(x), F_2(x)$ – функции распределения небалансов мощности двух объединяемых энергосистем.

Применительно к рассматриваемой ситуации исключения радиальных узлов объединенной ЭЭС после исключения очередной ЭЭС (А) редуцирование выполняется для объединения (АВ). Здесь левая и правая границы $\Pi_{\min} = -(\Pi_{ba} + \Pi_{bc} + \Pi_{ab})$, $\Pi_{\max} = \Pi_{ab} + \Pi_{cb} + \Pi_{ba}$, а результирующие параметры:

$$(M_{AB}, D_{AB}) = (M_B, D_B)_{(ba+bc)}^{(ab+cb)} + (M_A, D_A)_{ab}^{ba}. \quad (4.20)$$

Последующее редуцирование при анализе влияния объединения (АВ) на ЭЭС (С) сводится к корректировке пределов редуцирования.

Учет влияния стратегии взаимопомощи между энергосистемами при исключении узлов выполняется путем изменения левой и правой границ интервала редуцирования и соответственно коррекции добавки небаланса мощности к смежному узлу. Процедура восстановления практически не отличается от процедуры исключения узлов.

Применение алгоритма исключения – восстановления узлов (ненаправленного эквивалентирования) при относительно небольшой погрешности результирующих параметров позволяет существенно ускорить расчетный процесс. Алгоритм направленного эквивалентирования, суть которого заключается в поочередном свертывании электрической схемы к расчетному узлу путем последовательного исключения всех узлов, кроме расчетного, как правило, имеет более высокую точность, так как здесь исключены ошибки на этапе восстановления узлов. Однако из-за несоизмеримо больших затрат машинного времени во втором случае для практического применения рекомендуется первый алгоритм.

При вычислении результирующих показателей балансовой надежности узлов радиальной ОЭС смежные подсистемы учитываются в виде «эквивалентных генераторов».

4.4 Заключение к разделу 4

В задачах, связанных с расчетами показателей надежности электроэнергетических систем, важное место занимают процедуры эквивалентирования. К их числу относится разработанное вероятностное эквивалентирование участков расчетных схем (схемная или структурная надежность) и функций распределения случайных величин (балансовая надежность). Вероятностное эквивалентирование позволяет без существенного снижения точности результатов свести сложные расчеты, связанные с большими затратами машинного времени, к более простым, выполняемым в темпе процесса оперативного управления энергосистемами. Это дает возможность выйти на совершенно новые классы задач, например, определение и оптимальное распределение коммерческого резерва мощности.

Предложенные и детально разработанные на принципах вероятностного эквивалентирования процедуры расчета показателей надежности позволяют говорить о создании нового метода анализа схемной надежности сложнзамкнутых электрических схем. Однако не менее значительный эффект ожидается от их комплексного использования в составе программных комплексов, основанных на иных математических принципах.

Вероятностное эквивалентирование направленных расчетных графов электрических схем позволяет существенно расширить класс решаемых задач, в частности выполнить

расчет схемной надежности электрических сетей с несколькими уровнями напряжений, определить вероятностные показатели отключения групп генерирующих агрегатов (электростанций), учесть специфику работы устройств автоматики и релейной защиты.

Полученные монобазовая и полибазовая математические модели вероятностного эквивалентирования могут быть рекомендованы для практического использования как достаточно эффективные для расчета показателей надежности сложных схем, для которых невозможны последовательно-параллельные преобразования.

Предложен и апробирован новый подход к анализу схемной надежности энергосистем с двумя типами отказов элементов («обрыв» и «короткое замыкание») в рамках единой расчетной процедуры. В результате существенно упрощается этап разработки «расчетных схем», которые при данном подходе практически совпадают с электрическими схемами. Именно получение «расчетных схем» во многом определило «вялое» внедрение расчетов схемной надежности в практику проектирования и эксплуатации энергосистем, поскольку здесь требуется высококвалифицированный труд специалистов, в том числе в области теории вероятности. Опыт внедрения и эксплуатации разработанного исследовательского программного комплекса показывает правильность выбранного подхода.

Для анализа показателей балансовой надежности энергосистем введено понятие и показан механизм применения «редуцированных» распределений небалансов мощности. Показано, что «редуцированные» распределения позволяют выполнять эквивалентные преобразования не только радиальных, где они особенно эффективны, но и сложнотамкнутых электрических схем.

Эквивалентирование функций распределения, являющихся результатом многократной свертки, нормальным или гамма-распределением, редуцированным на интервале, определяемом пропускной способностью некоторого сечения, позволяет свести сложные интегральные преобразования к простым операциям с математическими ожиданиями и дисперсиями. Это значительно сокращает затраты машинного времени на расчеты показателей балансовой надежности ЭЭС.

Всякое эквивалентирование, в том числе и вероятностное, приводит к появлению погрешностей. Для снижения погрешностей в работе предлагается использовать комбинированное распределение, представляющее собой взвесь редуцированных функций распределения. В качестве критерия «добротности» предлагаемых процедур в работе используется сопоставительный анализ расчетов тестовых схем. Показано, что результаты находятся внутри диапазона данных, полученных другими авторами, что дает основание

рекомендовать методику вероятностного эквивалентирования для практического применения.

Аппарат вероятностного эквивалентирования достаточно хорошо вписывается в методологию коммерческих взаимоотношений между энергосистемами. Это проявляется, прежде всего, в задачах о ценах на электрическую мощность и энергию и в оценке показателей договорных перетоков мощности. Общность проблем заключается в вероятностном характере спроса и предложения на электроэнергию. В работе приведен необходимый для достижения консенсуса математический анализ функций издержек в энергосистемах.

5 Оценка риска потенциально опасных объектов нефтегазовой отрасли с учетом человеческого фактора на основе сетей Байеса

5.1. Введение

Человеческий фактор (ЧФ) является важной составляющей безопасности при эксплуатации потенциально опасных объектов (ПОО). Несмотря на это в нормативных документах Ростехнадзора недостаточно методической информации о методах его оценки, отмечается необходимость учета ЧФ в оценке риска ПОО. Одним из перспективных методов оценки и прогнозирования риска ПОО с большим количеством причинно-следственных связей между событиями являются сети Байеса.

Целью исследования является использование байесовских сетей доверия (БС) для учета ЧФ в оценке риска возникновения аварий с эффектом BLEVE на ПОО.

Объект исследования – ПОО хранения, переработки и транспортирования углеводородов.

Алгоритм реализован в программе «GeNIeModeler». Разработанная модель представляет собой развернутую БС, основанную на собранных и соответствующим образом подготовленных и структурированных для ввода в программу статистических данных.

БС может применяться для анализа и оценки риска возникновения аварий на стадии проектирования/эксплуатации ПОО, выявления «слабых мест» в части причин возникновения аварий и наиболее опасных путей их развития.

БС позволяет оценить всевозможные варианты причин и их комбинаций, приводящих к возникновению аварии. При появлении новых исходных данных они могут включаться в построенную модель. Следуя традиционной оценке риска, разработанная модель БС может расширить варианты определения частот возникновения инициирующих событий и условных вероятностей факторов, способствующих развитию аварий.

Ошибки технического обслуживания зависят от многих факторов, которые связаны не только с индивидуальными характеристиками человека, но также с обстановкой на рабочем месте, организацией труда или деятельностью, которая увеличивает или уменьшает производительность человека, влияющую на вероятность ошибки человека [1, 22, 23, 27–29, 36, 38–42, 44].

Глава Ростехнадзора в своем интервью от 13 декабря 2019 г. указал, что на сегодняшний день в основе 90% аварий на промышленных предприятиях лежит человеческий фактор и намного меньшая часть инцидентов вызвана техническими

причинами. Также он сообщил, что по состоянию на 10 декабря 2019 г. больше всего аварий выявлено на подъёмных сооружениях, объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности [2]. Однако, несмотря на немаловажную роль человеческого фактора в безопасности ПОО, в нормативных документах Российской Федерации все еще очень мало информации о методах его расчета. В них можно найти лишь упоминание ЧФ как причины возникновения аварийных ситуаций и необходимости его учета в обобщенной оценке риска [19].

На данный момент существует ряд методов анализа и оценки ЧО. Большая часть работ выполнена зарубежными учеными. Так, например, китайские ученые Yongchun Miao и Rongxue Kang разработали модель оценки надежности человека для крупномасштабной системы химического производства на основе процесса иерархии и метода нечеткой оценки в работе «Research on human reliability of large-scale chemical production system» [3].

Zhonghao Zhao и др. в [4] впервые представили исследование модели выборочного обслуживания для многокомпонентных систем, учитывающее надежность человека. В данном исследовании была сформулирована взаимосвязь между вероятностью ЧО и состоянием компонентов системы после технического обслуживания с использованием динамического дискретного распределения и модели для расчета вероятности ЧФ.

De Felice и Antonella Petrillo в [5] собрали и проанализировали наиболее известные методы анализа человеческой надежности.

За прошедшие годы разработано несколько методологий для анализа надежности человека, которые можно разделить на три макро категории: методы первого, второго и третьего поколений [5].

Первое поколение включает 35 – 40 методов обеспечения надежности человека. Наиболее используемыми из них являются: OAT, SHARP, TESEO, SLIM, HCR, THERP, HEART. Как правило, эти методы носят атомистический характер; они побуждают оценщика разбить задачу на составные части, а затем рассмотреть потенциальное влияние модифицирующих факторов таких как, нехватка времени, особенности оборудования и стресс. Эти методы фокусируются на уровне навыков и базовых правил человеческой деятельности, их часто критиковали за то, что они не учитывали такие вещи, как влияние контекста, организационные факторы и ошибки передачи информации. Несмотря на эту критику, они полезны, и многие из них регулярно используются для количественной оценки рисков [5].

Второе поколение включает в себя четыре метода: ATHEANA, CREAM, TAFEI и SPAR-H. С их помощью ученые пытаются преодолеть ограничения традиционных подходов к расчету человеческой надежности, в частности:

- предоставить руководство по возможным и вероятным путям принятия решений, по которым следует оператор, используя модели психических процессов, предоставляемые когнитивной психологией,
- расширить описание ошибок за пределы обычной бинарной классификации (упущения комиссии), признавая важность так называемых «когнитивных ошибок»,
- рассмотреть динамические аспекты взаимодействия человека с машиной и добиться использования в качестве основы для разработки симуляторов производительности оператора.

В последние годы, ограничения и недостатки методов второго поколения привели к развитию формирующегося третьего поколения методологий, например, такие методы, как SHERPA и PROCOS [5]. Перечисленные методы повсеместно используются в оценке риска, однако, очевидно, что ни один из них пока не способен дать полной картины, так как речь идет о сложном и непредсказуемом поведении человека и вопросах организации труда.

С целью получения более достоверного результата по учету ЧФ при оценке риска ПОО основное внимание в настоящем исследовании сосредоточено на изучении и подготовке статистических данных, на основе которых строится модель, отражающая влияние ЧФ и других причин на возникновение аварийной ситуации. В качестве инструмента для реализации данной задачи были использованы БС.

5.2. Байесовские сети, как инструмент анализа статистических данных

В настоящем исследовании в качестве основной методологии применяется моделирование БС, также известные как байесовские сети доверия, сети доверия и вероятностные сети причинности.

БС используются в исследованиях по созданию искусственного интеллекта, в настоящее время они применяются в различных областях исследований, включая медицину, криминалистику, социальные науки, экономику и машиностроение. В последние десятилетия БС также приобрели популярность в области экологических исследований и управления [6].

Байесовские сети представляют собой графические модели, которые описывают вероятностные отношения между набором переменных. Формально они являются ориентированными ациклическими графами (DAG), узлы которых представляют переменные, относящиеся к системе, а дуги направленного действия представляют вероятностные зависимости между переменными [7, 8, 20, 21, 30, 31, 35, 43].

Fenton, N. и Neil [9] утверждают, что применение причинно-следственной связи в оценках риска приводит к более содержательному, практическому и последовательному анализу. Поскольку БС демонстрируют причинно-следственные структуры графически относительно простым способом, их могут создавать и применять также лица, не обладающие техническими навыками высокого уровня, и могут быть поняты неопытными конечными пользователями и другими заинтересованными сторонами.

Для моделирования БС существует ряд программ, таких как «Hugin» (www.hugin.com), «Netica software» (www.norsys.com), «BayesiaLab» (www.bayesia.com), «AgenaRisk» (www.agenarisk.com), «GeNIe Modeler» (<https://dslpitt.org/genie/>) и другие.

Моделирование системы с причинно-следственными связями позволяет глубже понять основные механизмы, и модель может быть использована для изучения того, как внешние вмешательства влияют на систему [10].

Некоторые исследователи оценки риска ПОО уже использовали БС для моделирования причинно-следственных связей между инициирующими событиями и развитием аварии. Например, в 2012 г. Waoping Cai и др. в статье «A dynamic Bayesian networks modeling of human factors on offshore blowouts» предложили модель оценки риска морских объектов с учетом ЧФ в ПК «Netica software» [11].

C. Morais и др. в 2018 г. опубликовали статью «Human reliability analysis – accounting for human actions and external factors through the project life cycle», в которой представили БС учета ЧФ, построенную на основе классификации метода CREAM [12].

Подобно исследованиям ЧФ, информации об использовании БС и программных комплексов в зарубежных статьях и других источниках гораздо больше, чем в отечественных. Это также указывает на то, что создание подобных моделей оценки риска может стать дополнительным источником информации о слабых местах при эксплуатации ПОО. Как было сказано выше, на данный момент существует множество программ для моделирования БС [32–34, 37].

В данной работе для этой цели был использован ПК «GeNIeModeler» (далее «GeNIe»), как самый доступный и неограниченный в использовании инструмент [21]. Краткая информация о ПК «GeNIeModeler» приведена в приложении А.

Так как для построения модели оценки риска необходима статистика по ранее произошедшим авариям, в целях конкретизации задачи и упрощения нахождения статистических данных в настоящем исследовании при разработке алгоритма построения БС рассмотрен определенный тип аварий для ПОО нефтегазовой отрасли – аварии, сопровождающиеся эффектом BLEVE.

5.3. Аварии с эффектом BLEVE

Для конкретизации задач исследования рассматривались лишь аварии с эффектом BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости). Этот термин, используемый для описания целой совокупности явлений, сопровождающих внезапное разрушение резервуара хранения со сжиженным горючим газом при наличии источника воспламенения. Резкое падение давления вызывает вскипание жидкости и образование воздушной ударной волны, осколочного поля и мгновенное воспламенение парового облака, сопровождающееся возникновением огневого шара. Внезапный выброс может произойти из-за разгерметизации оборудования, вызванного воздействием огня, механическим повреждением, коррозией, производственными дефектами, внутренним перегревом и т.д.

Согласно А.М. Birk и М.Н. Cunningham [13], «BLEVE – это выделение расширяющегося пара и кипящей жидкости, сопровождающееся взрывом, когда контейнер, содержащий сжиженный газ под давлением, полностью разрушается». Они также определили «полное разрушение», как внезапную разгерметизацию резервуара и почти мгновенный выброс его содержимого. Внезапное высвобождение до этого сжатого и сжиженного пара из замкнутого пространства вызывает мгновенное кипение и испарение с возникновением взрыва, что приводит к серии катастрофических воздействий [14, 24–26, 45].

BLEVE приводит к [14–16]:

- разбрызгиванию части жидкости и разлитию вещества; образовавшиеся зоны могут гореть, если жидкость легковоспламеняема,
- взрывной волне,
- образованию разлетающихся осколков,
- огню или выбросу токсичных газов.

Если сжиженный газ под давлением является легковоспламеняющимся, как это часто бывает, BLEVE приводит к образованию огненного шара. Если вещество токсично, как аммиак или хлор, негативные воздействия включают дисперсию токсичного газа.

Данный тип аварий, подобно ЧФ, малоизучен, а также его автоматический, программный расчет возможен в очень немногих программных комплексах, даже при том, что последствия таких аварий могут принести большой ущерб, как здоровью людей, так и сохранности самих ПОО. По этим причинам сбор необходимой статистики, а также построение самой модели выполнено для аварий с эффектом BLEVE.

5.4. Сбор статистических данных и моделирование аварии

Разработан алгоритм построения БС в программе «GeNIe» для изучения причин возникновения аварий на основе статистических данных. Среди причин возникновения аварий с эффектом BLEVE особое внимание было уделено ЧФ и его составляющим.

Алгоритм состоит из следующих основных этапов:

- обзор произошедших аварий и сбор статистических данных,
- классификация аварий по причинам возникновения, определение общих и конкретных причин,
- создание деревьев отказов в соответствии с собранными статистическими данными,
- построение деревьев отказов в программе «GeNIe»,
- заполнение таблиц условных вероятностей узлов модели в соответствии с собранными статистическими данными,
- объединение деревьев отказов в основной узел возникновения аварии с использованием балльной экспертной оценки,
- анализ построенной модели байесовской сети.

5.4.1 Подготовка исходных данных

Для построения модели БС аварий с эффектом BLEVE необходимо понимание основных причин подобных несчастных случаев, то есть подробная база данных аварий. Behrouz Nemmatian [17] в своей работе представил основные причины несчастных случаев BLEVE на основе категорий базы данных MHIDAS для 140 аварий (см. таблицу 5.4.1.1).

На основе таблицы 5.4.1.1 построены четыре ветви модели для каждой из основных причин BLEVE.

Таблица 5.4.1.1 – Основные причины BLEVE

Общая причина	Конкретная причина	Количество несчастных случаев	%
Ударное воздействие (66 случаев / 47.1%)	Железнодорожная авария	40	55
	ДТП	16	22
	Другое транспортное средство	17	23
Внешние события (41 случай / 29.3%)	Огонь	33	72
	Взрыв	7	15
	Перепады температуры	4	9
	Землетрясение	2	4
Механический сбой (27.9%)	Перегрев	20	37
	Избыточное давление	7	14
	Шланг	4	7
	Хрупкое разрушение	4	7
	Протекание соединения или фланца	4	7
	Коррозия	3	5
	Отказ предохранительного клапана	3	5
	Отказ сварки	3	5
	Течь или протекающий клапан	3	5
	Металлургический отказ	2	4
	Усталость	2	4
Неисправность прибора (5%)	Индикатор	2	40
	Ошибка	2	40
	Контроллер	1	20
Человеческий фактор (43 случая / 30.7%)	*	*	*

* конкретные причины человеческого фактора рассмотрены в пункте 5.4.2

5.4.2 Человеческий фактор

Для моделирования вероятностного развития аварий с общей причиной – ЧФ рассмотрены существующие классификации ЧО, которые можно смоделировать в программе «GeNIe», используя статистические данные по авариям прошлых лет.

В настоящем исследовании использована классификация Raphael N. Moura, автора докторской диссертации «Learning from accidents: human errors, preventive design and risk mitigation» («Уроки, извлеченные из аварий: ошибки человека, превентивное проектирование и снижение риска») [18]. Классификация представляет собой деление ЧФ на три группы причин, способных вызвать ошибки в системе «человек-машина-среда». Данные группы представлены на рисунках 5.4.2.1–5.4.2.3.

Группа факторов «Человек» (рисунок 5.4.2.1) включает связанные с человеком фенотипы в подгруппе действий, представляя возможное проявление человеческих ошибок через ошибочные действия (неверное время, неверный тип, неверный объект и неверное место), обычно совершаемые основным персоналом.

Эти ошибочные действия включают:

- пропущенные или неправильные действия,
- ранние, поздние, короткие, длинные или неправильные движения, в том числе в неправильном направлении или с недостаточной силой, скоростью или величиной,
- пропуск одного или нескольких действий, или инвертирование их порядка во время последовательности.

Возможные причины или запускающие факторы, создаваемые человеком, могут быть классифицированы, как специфические когнитивные функции или общая последовательность психических механизмов (Наблюдение-Интерпретация-Планирование), которая побуждает человека реагировать на раздражитель.

Временные (например, усталость, рассеянность или стресс) и постоянные нарушения (смещения, такие как фиксация гипотезы или тенденция к поиску подтверждения предыдущих предположений) могут быть охвачены в подгруппах «Временные и постоянные особенности человека». Это связанные с человеком генотипы.

Вторая основная группа (рисунок 5.4.2.2) представляет технологические генотипы, связанные с процедурами, отказами оборудования и систем, а также недостатки, связанные с выходными данными (сигналами и информацией), предоставляемыми интерфейсами.

Третья группа (рисунок 5.4.2.3) охватывает организационные факторы, представляющие рабочую среду и социальный контекст производственной деятельности.

Она включает в себя скрытые условия (такие как отказ конструкции), недостатки связи и эксплуатации, обслуживание, обучение, контроль качества и проблемы управления. Такие факторы, как неблагоприятные условия окружающей среды и неблагоприятные условия труда (например, нерегулярное рабочее время), также включены в эту категорию [18].

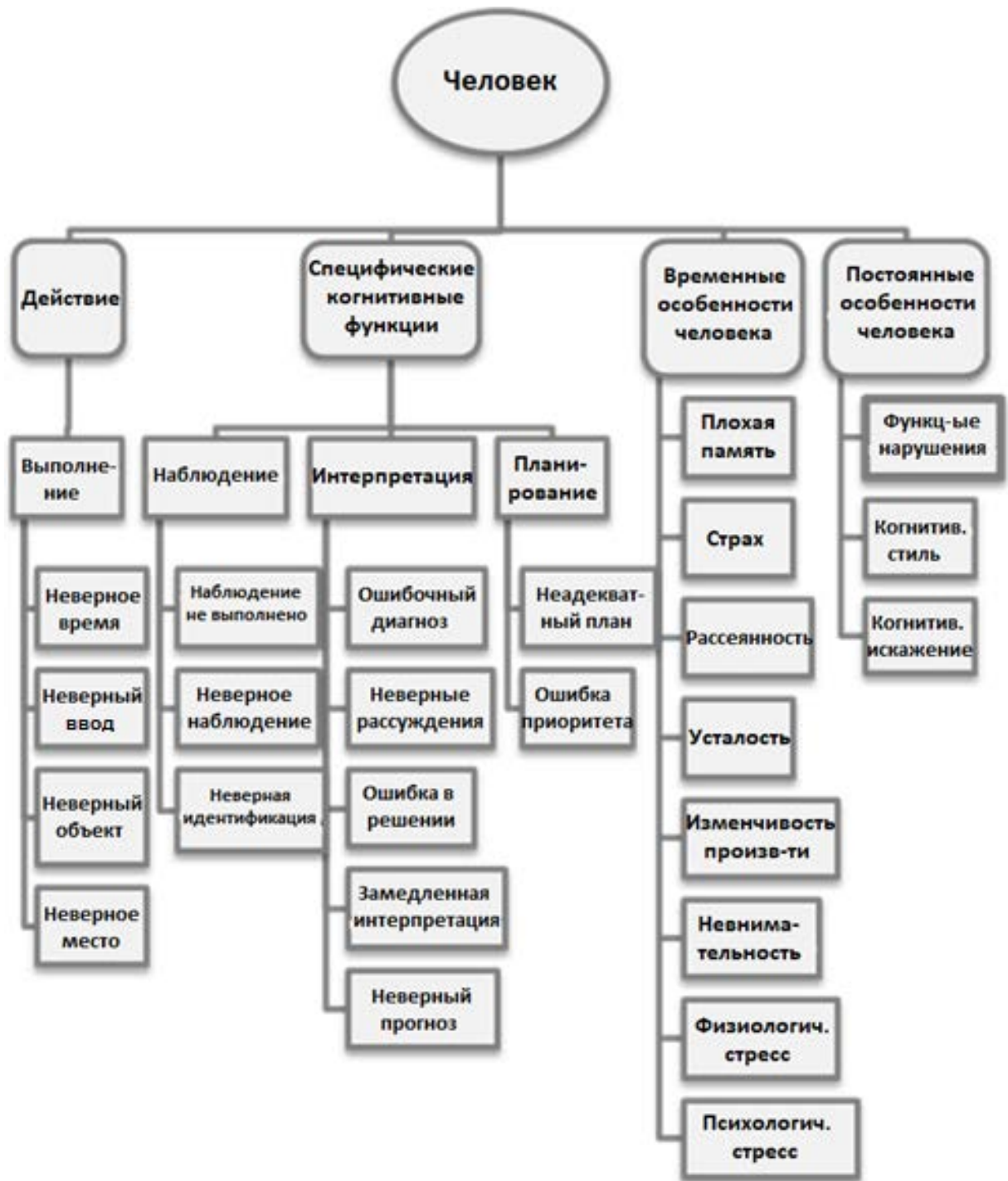


Рисунок 5.4.2.1 – Группа факторов «Человек»



Рисунок 5.4.2.2 – Группа факторов «Технология»

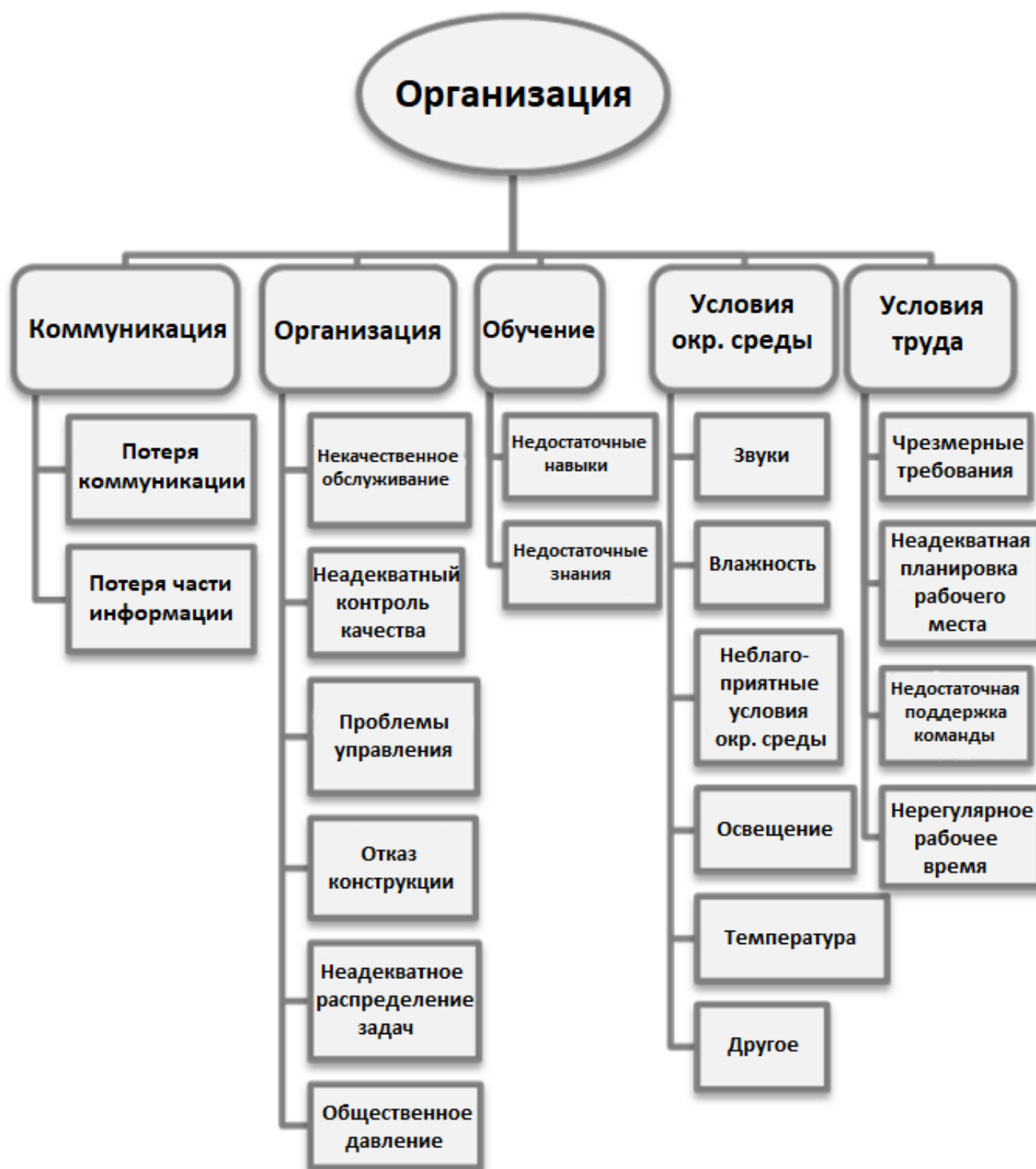


Рисунок 5.4.2.3 – Группа факторов «Организация»

Для заполнения таблиц вероятностей узлов использованы статистические данные Raphael N. Moura на основе 238 инцидентов [18], соответствующим образом подготовленные (таблица 5.4.1.1). В таблицах 5.4.1.2–5.4.1.5 представлены значения причин ЧО, необходимые для дальнейшего моделирования в программе «GeNIe».

Таблица 5.4.1.2 – Основные причины ЧФ

Группа причин	Количество несчастных случаев	%
Человек	136	57,14
Технология	196	82,35
Организация	227	95,38

Таблица 5.4.1.3 – Конкретные причины группы «Человек»

Подгруппа	Конкретная причина	Количество несчастных случаев	%	
1	2	3	4	
Действие (130 случаев / 95,59%)	Неверное время	35	26,92	
	Неверный ввод	28	21,54	
	Неверный объект	6	4,62	
	Неверное место	75	57,69	
Специфические когнитивные функции (113 случаев / 83,09%)	Наблюдение (47 случаев / 41,59%)			
	– Наблюдение не выполнено	37	78,72	
	– Неверное наблюдение	8	17,02	
	– Неверная идентификация	6	12,77	
	Интерпретация (79 случаев / 69,91%)			
	– Ошибочный диагноз	31	39,24	
	– Неверные рассуждения	27	34,18	
	– Ошибка в решении	22	27,85	
	– Замедленная интерпретация	11	13,92	
	– Неверный прогноз	9	11,39	
	Планирование (38 случаев / 33,63%)			
	– Неадекватный план	23	60,53	
	– Ошибка приоритета	17	44,74	
	Временные особенности человека (31 случай / 22,79%)	Плохая память	2	6,45
		Страх	5	16,13
Рассеянность		14	45,16	
Усталость		7	22,58	
	Изменчивость производительности	3	9,58	

Продолжение таблицы 5.4.1.3

1	2	3	4
	Невнимательность	5	16,13
	Физиологический стресс	2	6,45
Постоянные особенности человека (18 случаев / 13,24%)	Функциональные нарушения	1	5,56
	Когнитивный стиль	0	0
	Когнитивное искажение	17	94,45

Таблица 5.4.1.4 – Конкретные причины группы «Технология»

Подгруппа	Конкретная причина	Количество несчастных случаев	%
Оборудование (134 случая / 68,37%)	Отказ оборудования	131	97,76
	Сбой ПО	6	4,48
Процедуры (105 случаев / 53,57%)	Неадекватные процедуры	105	53,57
Временный интерфейс (45 случаев / 22,96%)	Ограничения доступа	3	6,67
	Неоднозначная информация	6	13,33
	Неполная информация	42	93,33
Постоянный интерфейс (8 случаев / 4,08%)	Проблемы с доступом	4	0,5
	Неверная маркировка	4	0,5

Таблица 5.4.1.5 – Конкретные причины группы «Организация»

Подгруппа	Конкретная причина	Количество несчастных случаев	%
1	2	3	4
Коммуникация (69 случаев / 30,4%)	Потеря коммуникации	25	36,23
	Потеря части информации	49	71,01
Организация (224 случая / 98,68%)	Некачественное обслуживание	83	37,05
	Неадекватный контроль качества	144	64,29
	Проблемы управления	22	9,82
	Отказ конструкции	157	70,09
	Неадекватное распределение задач	143	63,84
	Общественное давление	17	7,59
Обучение (129 случаев / 56,83%)	Недостаточные навыки	86	66,67
	Недостаточные знания	84	65,12

Продолжение таблицы 5.4.1.5

1	2	3	4
Условия окружающей среды (21 случай / 9,25%)	Звуки	0	0
	Влажность	0	0
	Неблагоприятные условия окружающей среды	17	80,95
	Освещение	2	9,52
	Температура	3	14,29
	Другое	0	0
Условия труда (27 случаев / 11,89%)	Чрезмерные требования	13	48,15
	Неадекватная планировка рабочего места	6	22,22
	Недостаточная поддержка команды	8	29,63
	Нерегулярное время работы	9	33,33

По приведенным выше схемам классификации человеческих ошибок (рисунки 5.4.1.2–5.4.1.5) в программе «GeNIe» построены три модели аналогичного вида.

5.5. Моделирование байесовской сети

5.5.1 Моделирование основных причин развития аварий по BLEVE

Построение начинается с создания файла модели (рисунок 5.5.1.1).

Перевод иностранных названий узлов в программе «GeNIe» приведен в приложении

Г.

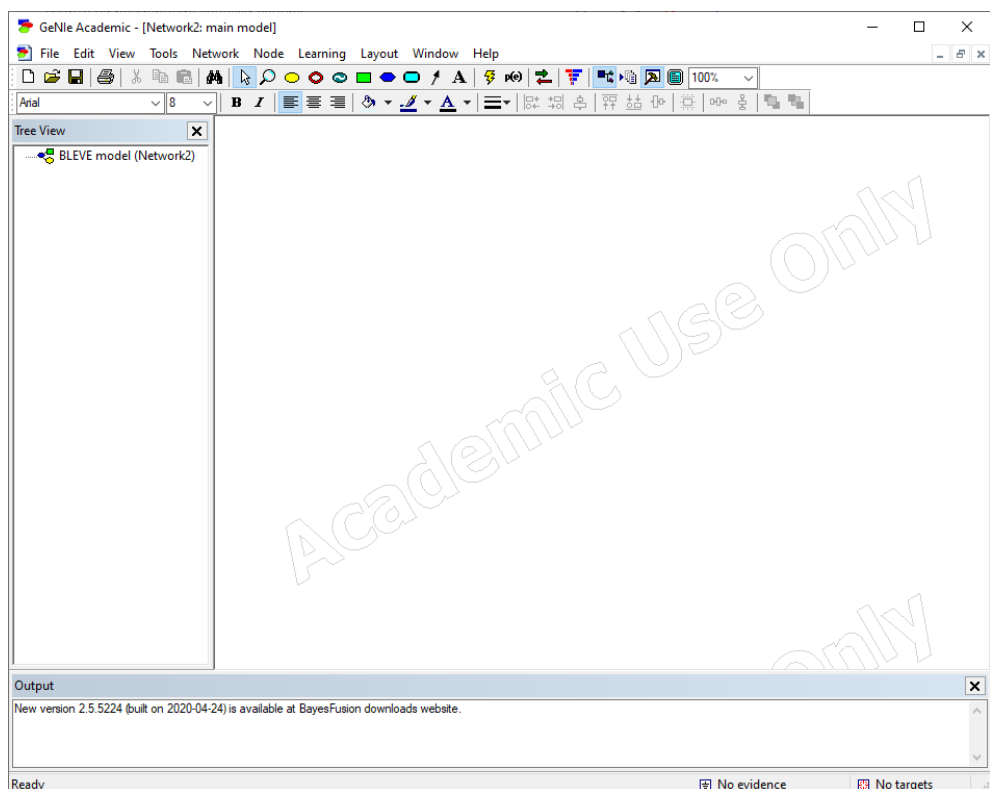


Рисунок 5.5.1.1 – Создание новой модели программы «GeNIe»

Для моделирования ветви основной причины «Impact failure» («Ударное воздействие») с помощью инструмента «Chance» создается основной узел «Impact failure» («Ударное воздействие») и три зависимых узла «Rail accident» («Железнодорожная авария»), «Road accident» («ДТП») и «Other vehicle» («Другое транспортное средство») (рисунок 5.5.1.2).

С помощью инструмента «Ark» от узла «Impact failure» к остальным узлам проводятся дуги, показывающие причинно-следственные связи (рисунок 5.5.1.3).

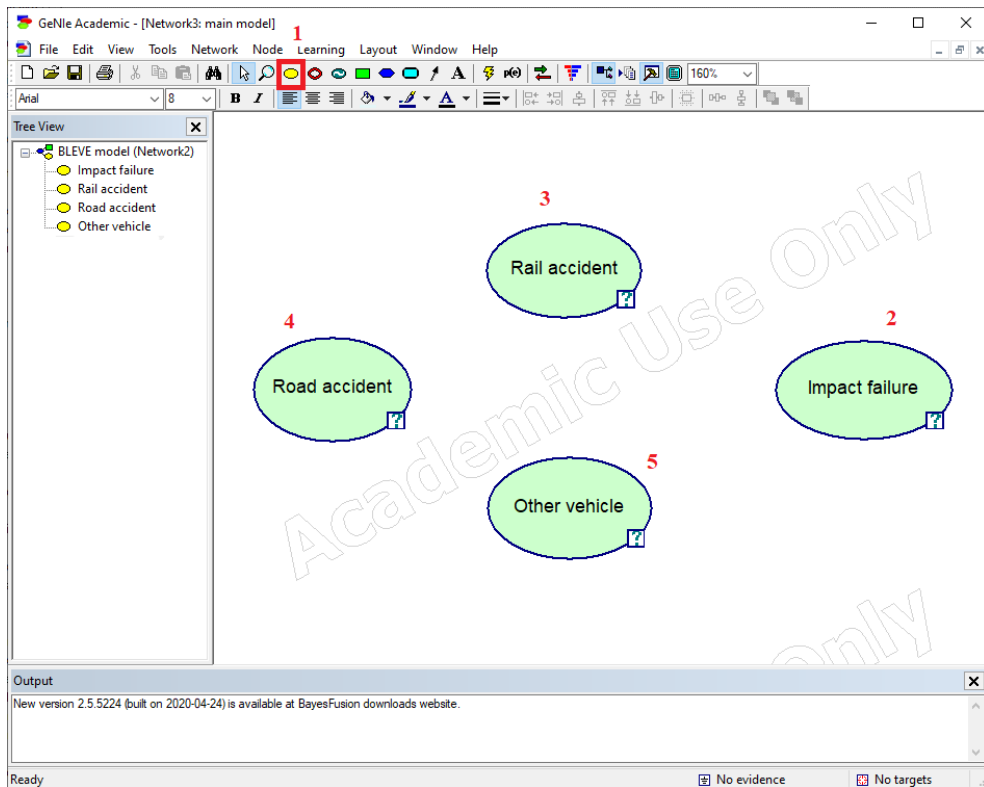


Рисунок 5.5.1.2 – Создание узлов ветви «Impact failure»

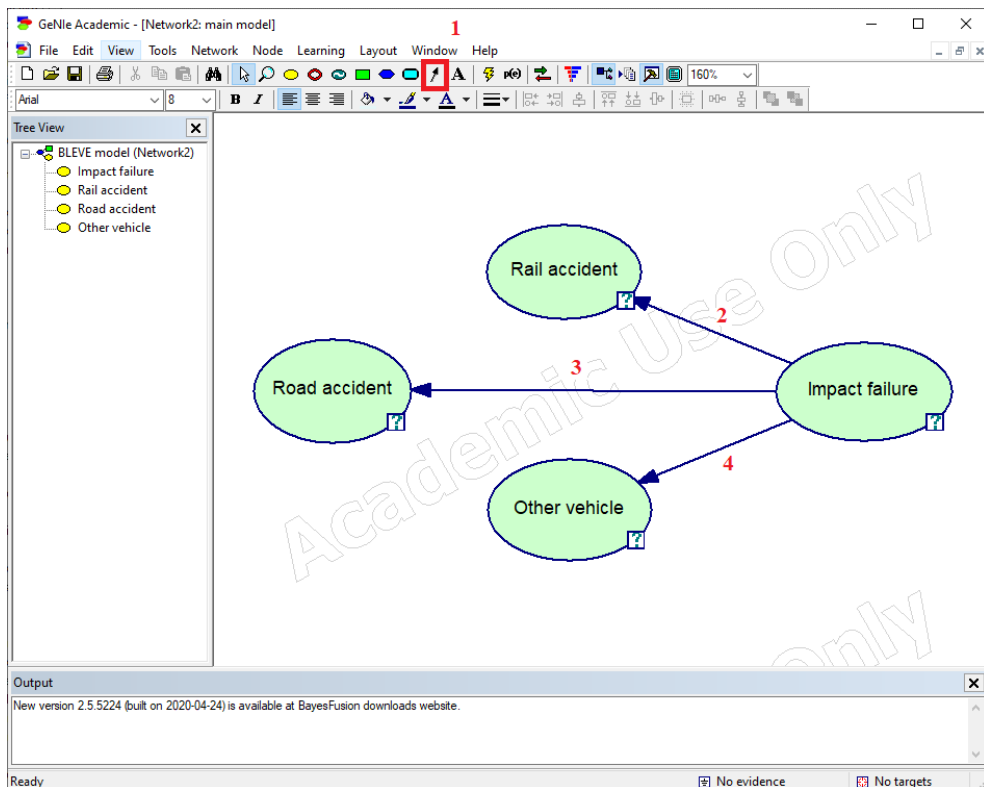
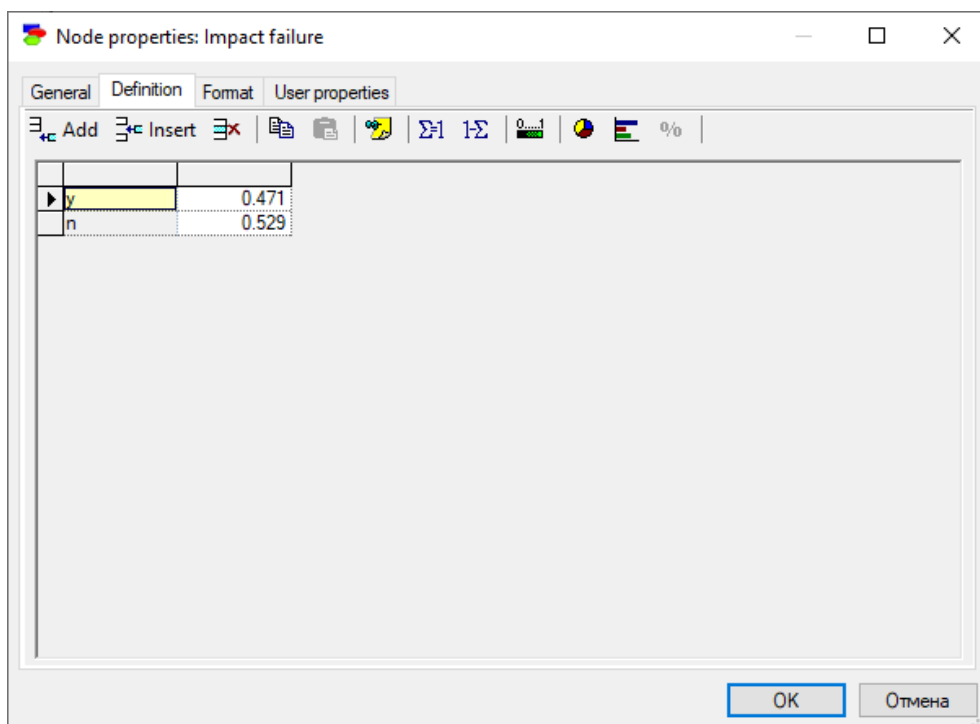


Рисунок 5.5.1.3 – Создание причинно-следственных связей

Затем с помощью значений из таблицы 5.4.1.1 для каждого из трех зависимых узлов в программе заполняется таблица условных вероятностей конкретных. Таблицы узлов состоят из двух строк или двух возможных ситуаций:

- строка «y» («ДА») – вероятность развития аварийного события по данной причине,
- строка «n» («НЕТ») – вероятность отсутствия развития аварийного события по данной причине.

Таблица вероятностей для основного узла «Impact failure» представлена на рисунке 5.5.1.4.



y	0.471
n	0.529

Рисунок 5.5.1.4 – Таблица вероятностей узла «Impact failure»

Таблицы условных вероятностей для трех зависимых узлов ветви «Impact failure» представлены на рисунках 5.5.1.5–5.5.1.7.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Rail accident". It has tabs for "General", "Definition", "Format", and "User properties". The "Definition" tab is active, displaying a table with the following data:

Impact failure	y	n
y	0.55	0.001
n	0.45	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.1.5 – Таблица условных вероятностей узла «Rail accident»

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Road accident". It has tabs for "General", "Definition", "Format", and "User properties". The "Definition" tab is active, displaying a table with the following data:

Impact failure	y	n
y	0.22	0.001
n	0.78	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.1.6 – Таблица условных вероятностей узла «Road accident»

Impact failure	y	n
y	0.23	0.001
n	0.77	0.999

Рисунок 5.5.1.7 – Таблица условных вероятностей узла «Other vehicle»

На рисунках 5.5.1.5–5.5.1.7 видно, что каждая таблица состоит из двух строк и двух столбцов, так как три данных узла зависят от узла общей причины «Impact failure». Первый столбец таких таблиц заполняется введением соответствующих значений конкретных причин из таблицы 5.4.1.1, аналогично таблице вероятностей основного узла «Impact failure» (рисунок 5.5.1.4). Во втором столбце для строки «y» устанавливается базовое значение вероятности равное 0,001 для корректного начала расчета программы. На рисунке 5.5.1.8 представлено моделирование общей причины – ветви узла «Impact failure» с заполненными таблицами условных вероятностей для трех зависимых узлов, рассчитанных по программе «GeNI».

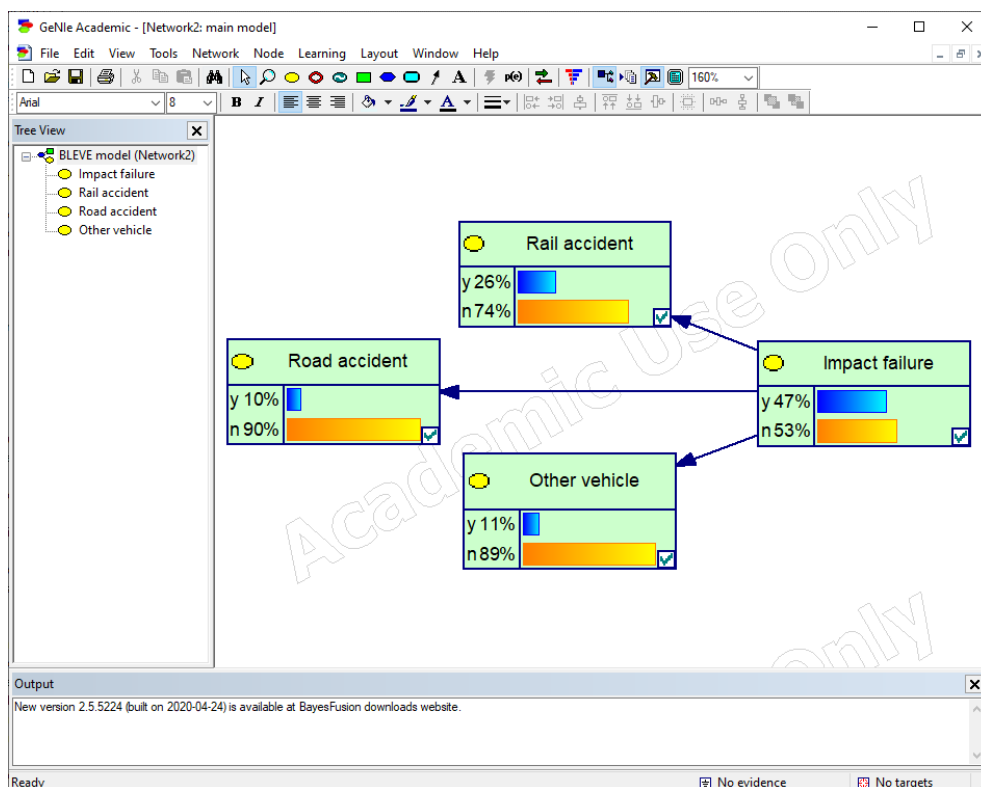


Рисунок 5.5.1.8 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви узла «Impact failure»

Важно отметить, что для проверки введенных значений зависимых узлов и просмотра результатов программа «GeNIe» дает возможность установки стопроцентной вероятности для одной из строк любого узла в модели. Например, при установке в строке «у» узла «Impact failure» значения 100%, узлы конкретных причин «Rail accident», «Road accident» и «Other vehicle» покажут введенные в них ранее условные вероятности (рисунок 5.5.1.9).

Аналогично выполнено моделирование ветви общей причины «External events» («Внешние события»). На рисунках 5.5.1.10–5.5.1.11 представлены общий вид ветви и условные вероятности для узлов конкретных причин. Итоговый вид ветви с рассчитанными программой вероятностями развития аварии по конкретным причинам приведен на рисунке 5.5.1.12. Здесь также с помощью значений вероятностей из таблицы 5.4.1.1 для каждого из четырех зависимых узлов в программе заполняются таблицы условных вероятностей.

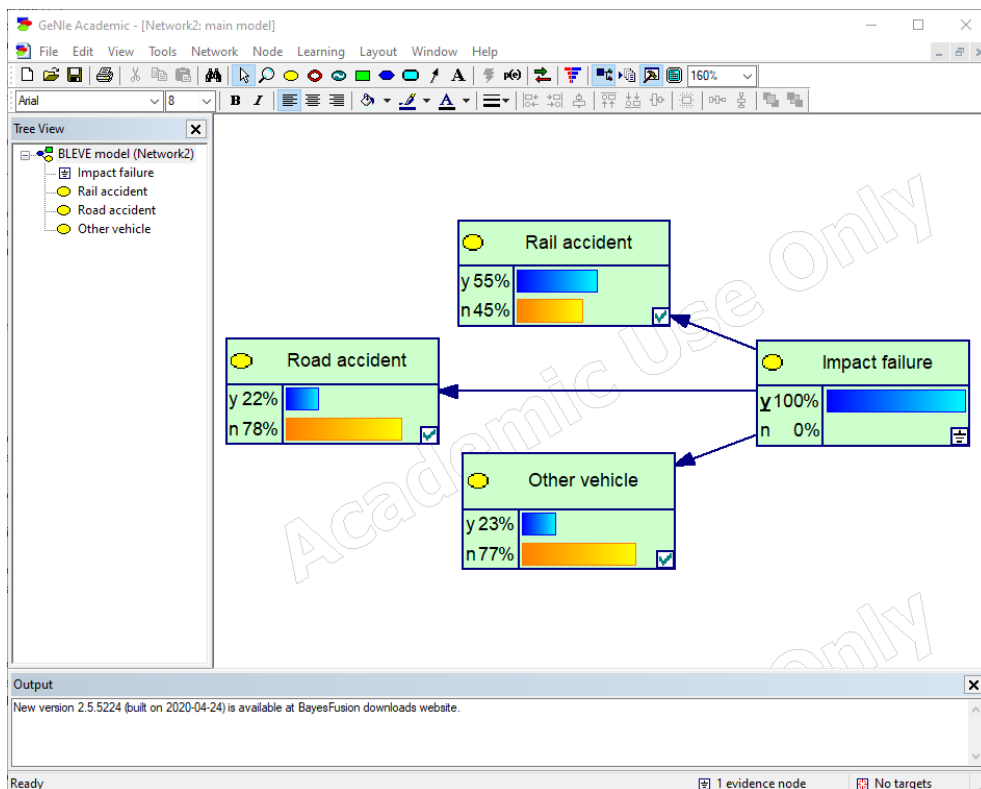


Рисунок 5.5.1.9 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Impact failure» с закрепленным значением вероятности главного узла «Impact failure»

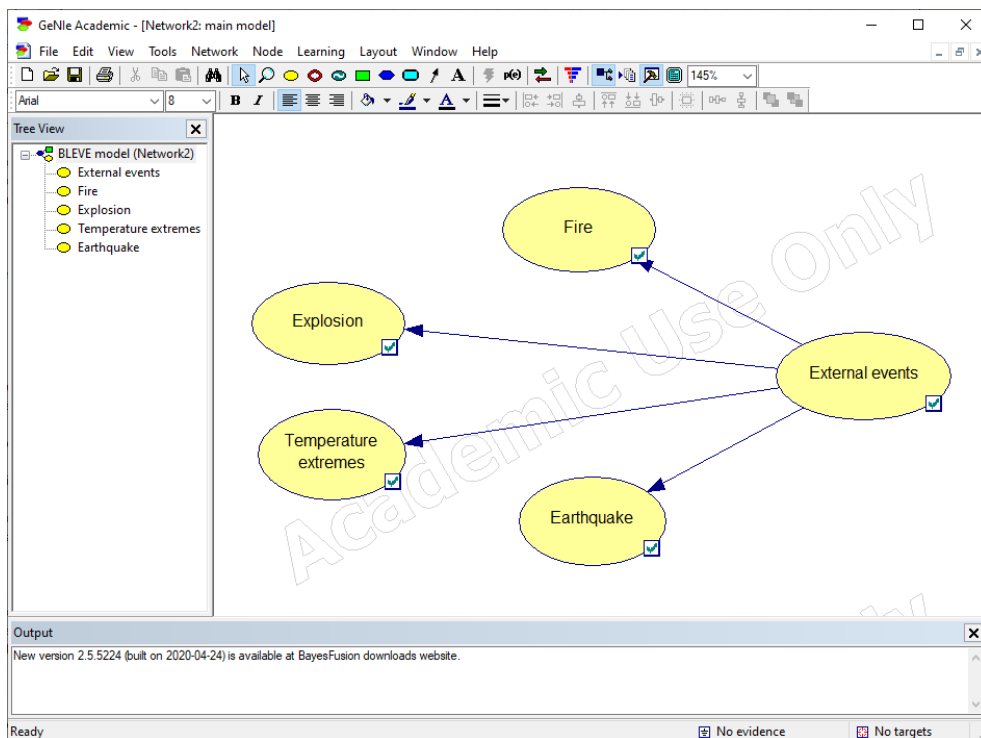


Рисунок 5.5.1.10 – Общий вид модели развития аварии по ветви «External events»

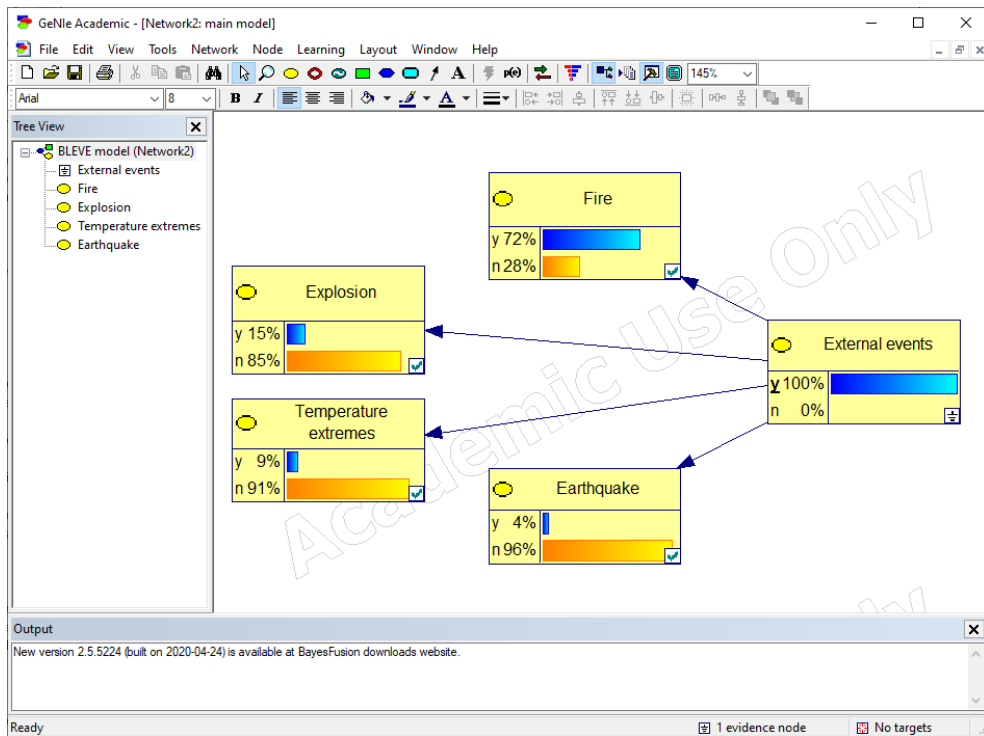


Рисунок 5.5.1.11 – Итоговый вид развития аварии по ветви «External events» с закрепленным значением вероятности главного узла «External events»

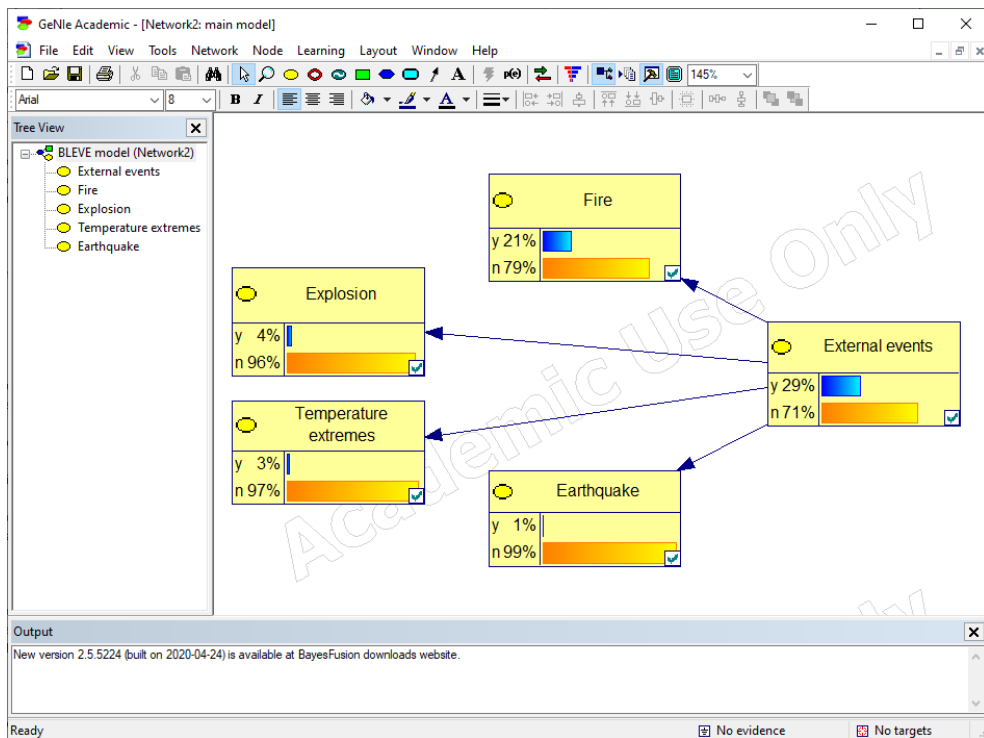


Рисунок 5.5.1.12 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «External events»

Аналогично выполнено моделирование ветви общей причины «Mechanical failure» («Механический сбой»). На рисунках 5.5.1.13–5.5.1.14 представлены общий вид ветви, условные вероятности для узлов конкретных причин. Итоговый вид ветви с рассчитанными вероятностями развития аварии по конкретным причинам приведен на рисунке 5.5.1.15.

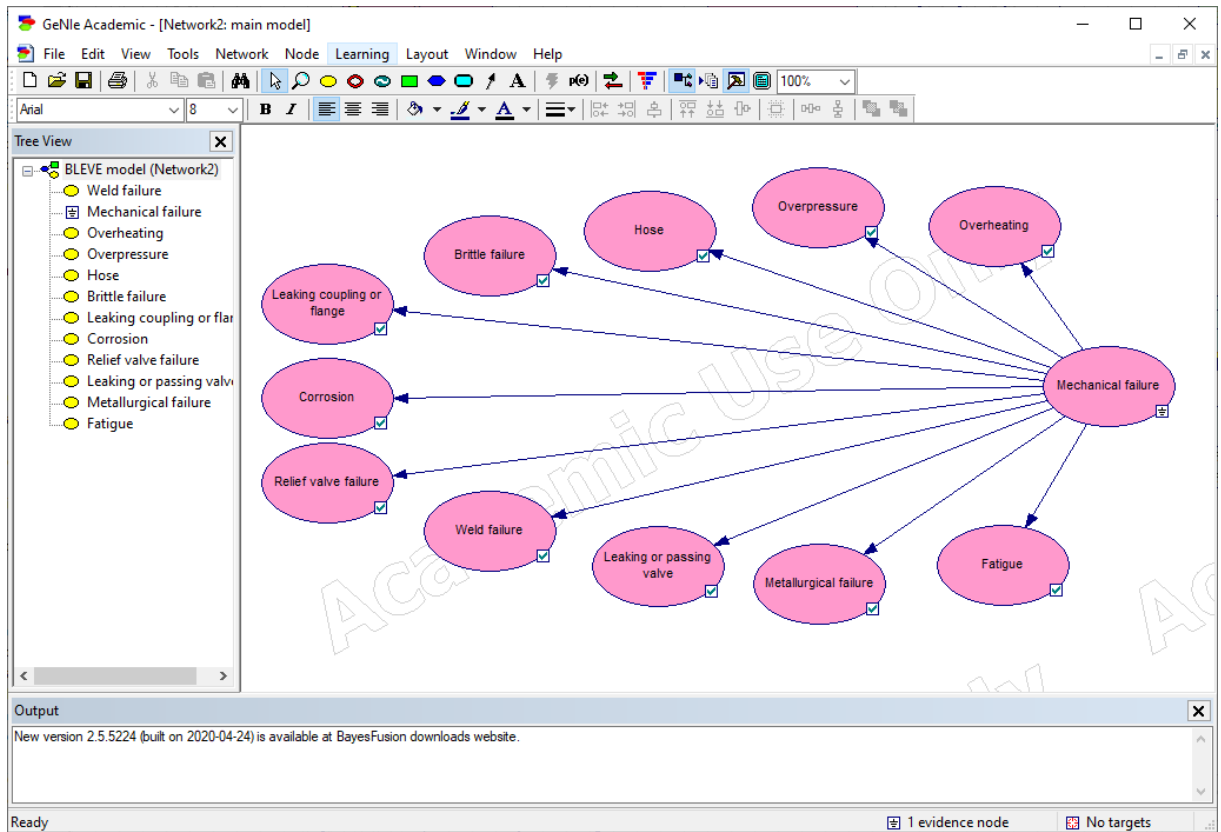


Рисунок 5.5.1.13 – Общий вид модели развития аварии по ветви «Mechanical failure»

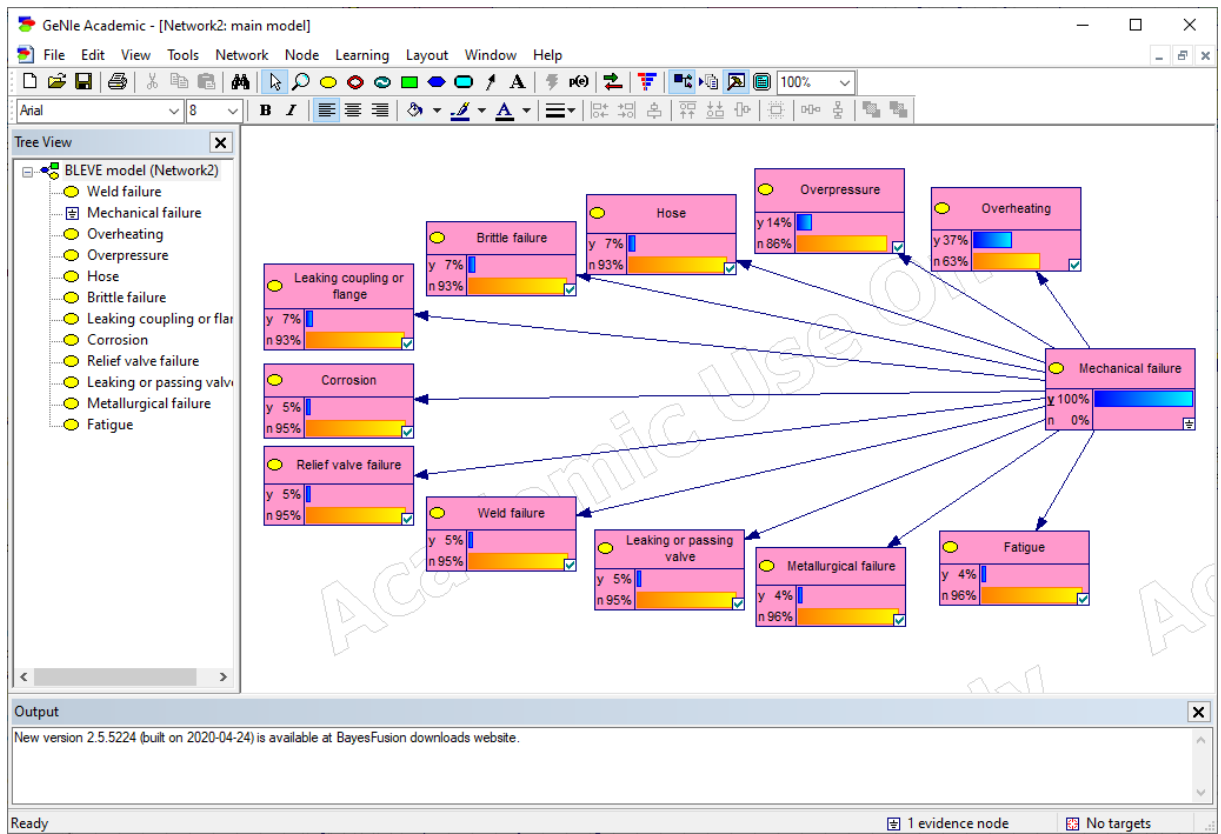


Рисунок 5.5.1.14 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Mechanical failure» с закрепленным значением вероятности главного узла «Mechanical failure»

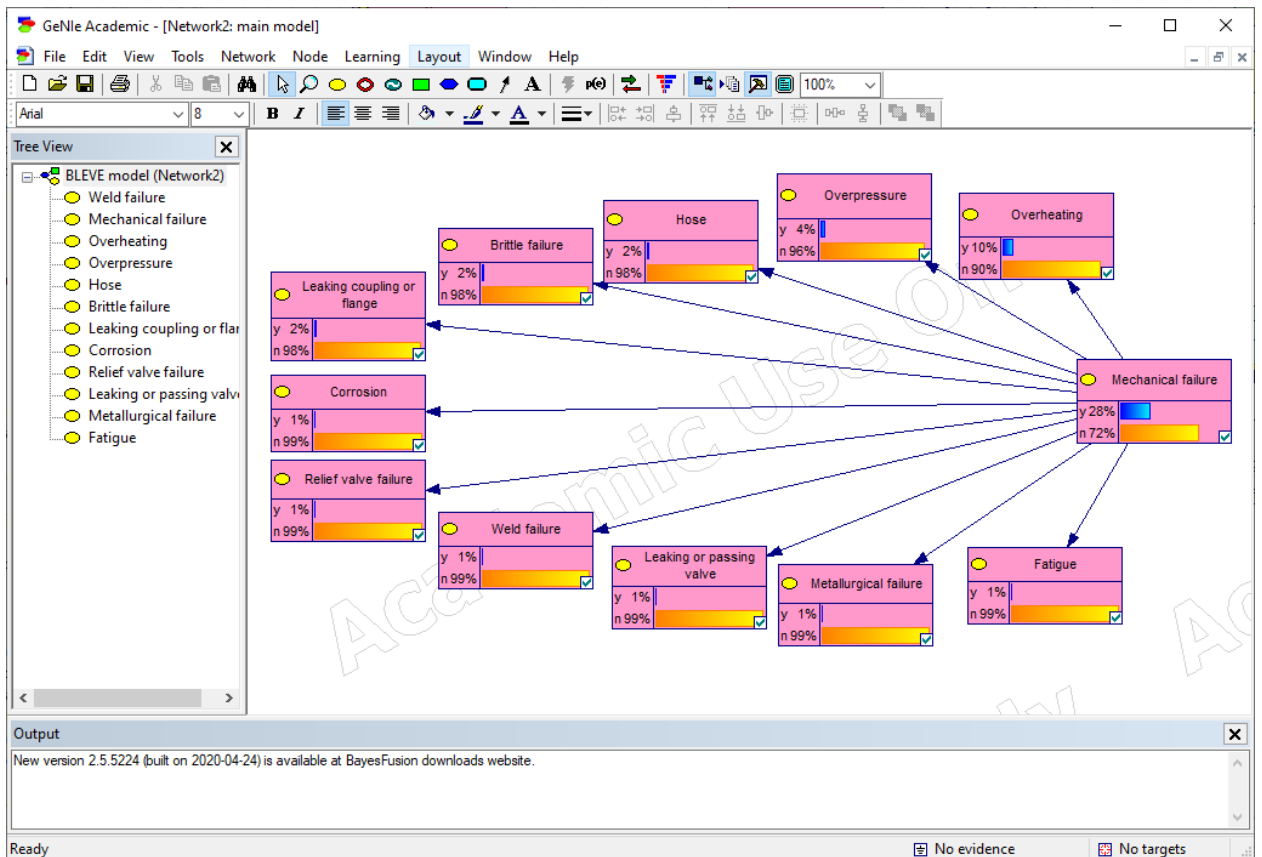


Рисунок 5.5.1.13 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Mechanical failure»

Аналогично выполнено моделирование ветви общей причины «Instrument failure» («Неисправность прибора прибора/датчика (давления, температуры и т. п.)»).

На рисунках 5.5.1.16–5.5.1.17 представлены общий вид ветви и условные вероятности развития аварии для зависимых узлов конкретных причин. Итоговый вид ветви приведен на рисунке 5.5.1.18.

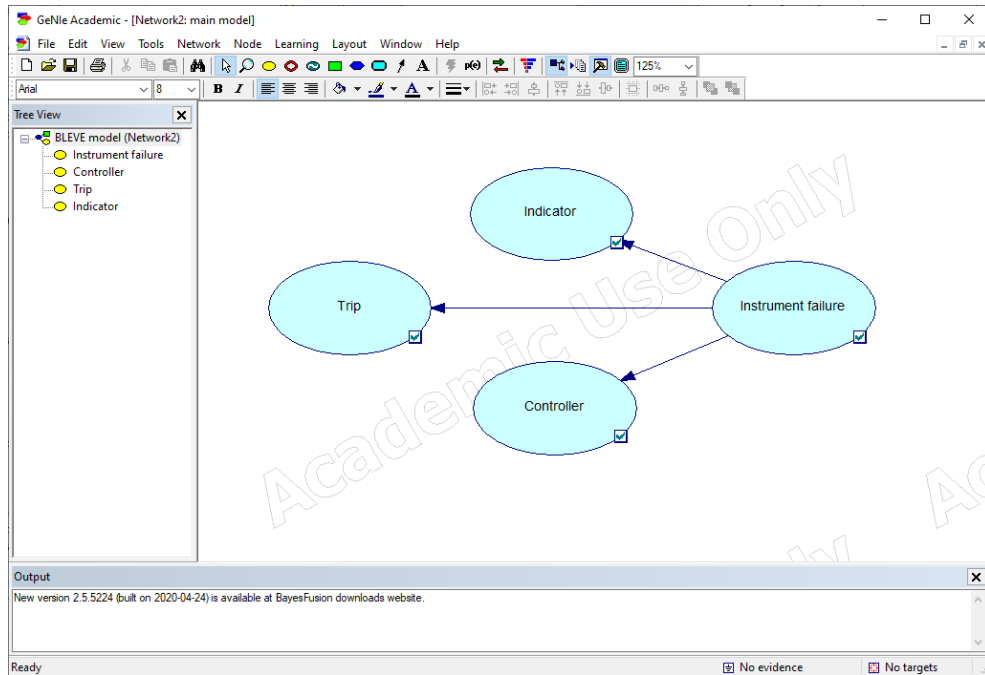


Рисунок 5.5.1.16 – Общий вид модели развития аварии по ветви «Instrument failure»

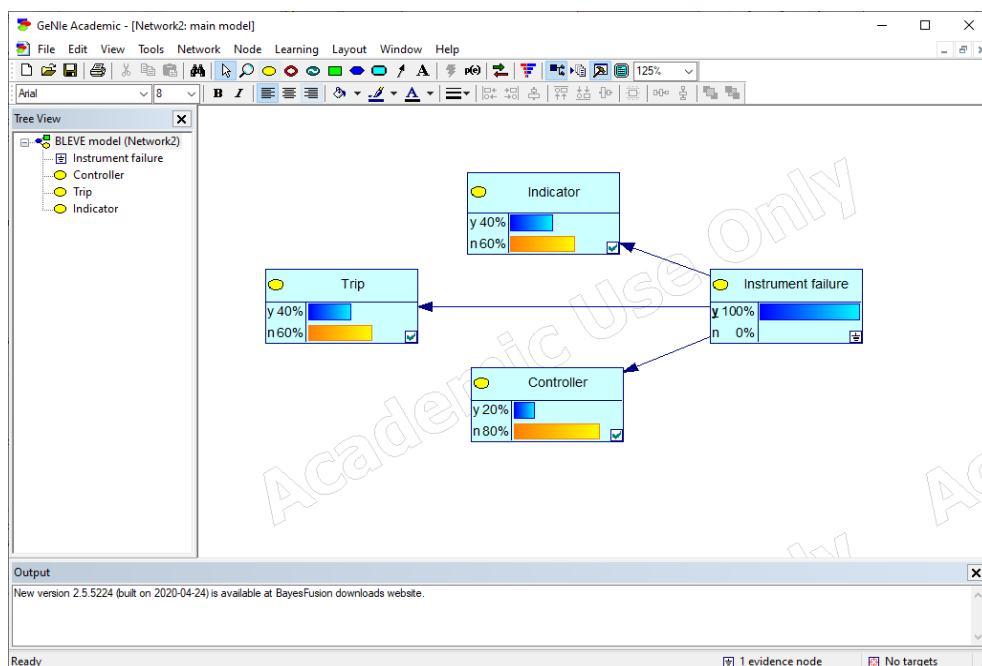


Рисунок 5.5.1.17 – Итоговый вид развития аварии по ветви «Instrument failure» с закрепленным значением вероятности главного узла «Instrument failure»

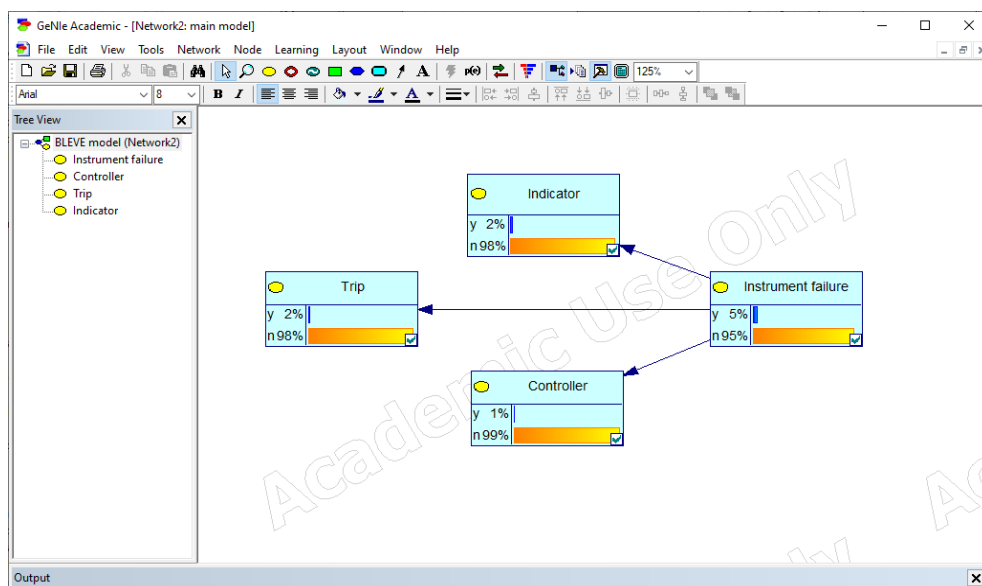


Рисунок 5.5.1.18 – Итоговый вид развития аварии по ветви «Instrument failure»

Таким образом, в программе «GeNIe» было смоделировано вероятностное развитие основных причин возникновения аварий с эффектом BLEVE. В следующем пункте рассмотрено моделирование ЧФ в программе с использованием статистики аварий по ЧФ из п. 5.4.2.

5.5.2 Моделирование человеческого фактора

По приведенным в пункте 5.4 схемам классификации человеческих ошибок (рисунки 5.4.2.1–5.4.2.3) в программе «GeNIe» были построены три модели аналогичного вида.

Общий вид модели развития аварии по ветви «Man», построенной с помощью инструментов узла типа «Chance» и связей «Ark» в соответствии со схемой на рисунке 5.4.2.1, представлен на рисунке 5.5.2.1.

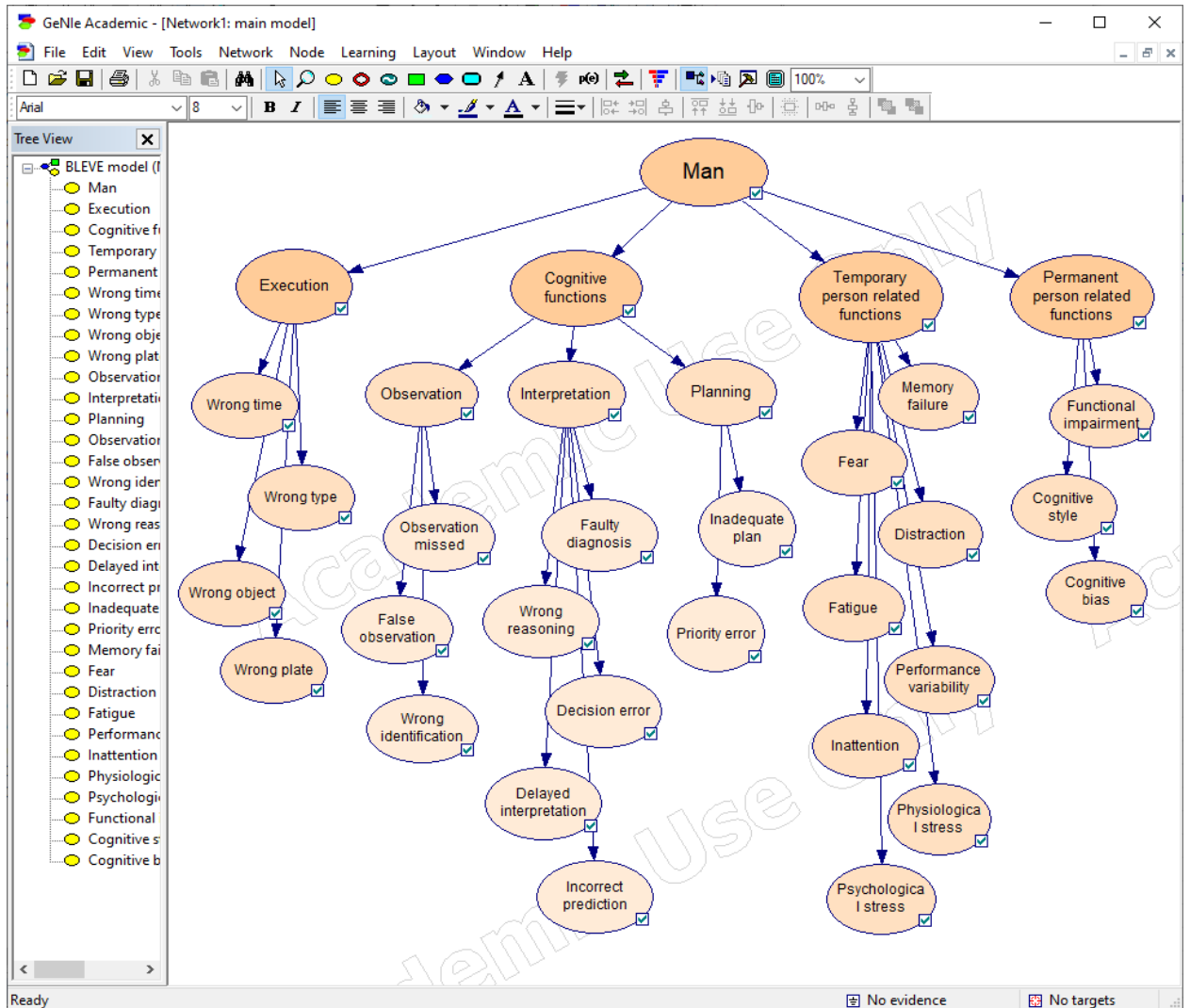


Рисунок 5.5.2.1 – Общий вид модели развития аварии по ветви «Man»

Таблицы условных вероятностей для узлов заполняются по таблице 5.4.1.3. Таблица вероятностей для узла «Man» представлена на рисунке 5.5.2.2.

The screenshot shows a dialog box titled 'Node properties: Man'. It has tabs for 'General', 'Definition', 'Format', 'User properties', and 'Value'. The 'Definition' tab is active, displaying a table with two rows: 'y' with a value of 0.5714 and 'n' with a value of 0.4286. The table is contained within a larger frame that also includes a toolbar with icons for adding, inserting, deleting, and formatting, as well as mathematical symbols like Σ and $\%$. At the bottom right, there are 'OK' and 'Отмена' (Cancel) buttons.

y	0.5714
n	0.4286

Рисунок 5.5.2.2 – Таблица вероятностей узла «Man»

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Execution» («Действие») представлены на рисунках 5.5.2.3–5.5.2.7.

The screenshot shows a dialog box titled 'Node properties: Execution'. It has tabs for 'General', 'Definition', 'Format', 'User properties', and 'Value'. The 'Definition' tab is active, displaying a table with two rows: 'y' and 'n'. Each row has two columns of conditional probabilities: one for 'Man' and one for 'n'. The values are: for 'y', 0.9559 (Man) and 0.001 (n); for 'n', 0.0441 (Man) and 0.999 (n). The table is contained within a larger frame that also includes a toolbar with icons for adding, inserting, deleting, and formatting, as well as mathematical symbols like Σ and $\%$. At the bottom right, there are 'OK' and 'Отмена' (Cancel) buttons.

	Man	y	n
y	0.9559	0.001	
n	0.0441	0.999	

Рисунок 5.5.2.3 – Таблица условных вероятностей узла «Execution»

Node properties: Wrong time

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Execution	y	n
y	0.2692	0.001
n	0.7308	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.4 – Таблица условных вероятностей узла «Wrong time» («Неверное время»)

Node properties: Wrong type

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Execution	y	n
y	0.2154	0.001
n	0.7846	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.5 – Таблица условных вероятностей узла «Wrong type» («Неверный тип»)

Node properties: Wrong object

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Σ1 1-Σ 0..1 %

Execution	y	n
y	0.0462	0.001
n	0.9538	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.6 – Таблица условных вероятностей узла «Wrong object» («Неверный объект»)

Node properties: Wrong plate

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Σ1 1-Σ 0..1 %

Execution	y	n
y	0.5769	0.001
n	0.4231	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.7 – Таблица условных вероятностей узла «Wrong plate» («Неверное место»)

Таблица условных вероятностей для узла «Cognitive functions» («Специфические когнитивные функции») представлена на рисунке 5.5.2.8.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Cognitive functions". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". The "Definition" tab is active, displaying a table with the following data:

	Man	y	n
y		0.8309	0.001
n		0.1691	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.2.8 – Таблица условных вероятностей узла «Cognitive functions»

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Observation» («Наблюдение») представлено на рисунках 5.5.2.9–5.5.2.12.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Observation". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". The "Definition" tab is active, displaying a table with the following data:

	Cognitive functions	y	n
y		0.4159	0.001
n		0.5841	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.2.9 – Таблица условных вероятностей узла «Observation»

Node properties: Observation missed

General Definition Format User properties Value

Add Insert x Copy Paste Undo Redo Σ1 1-Σ 0...1 %/

Observation	y	n
y	0.7872	0.001
n	0.2128	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.10 – Таблица условных вероятностей узла «Observation missed» («Наблюдение не выполнено»)

Node properties: False observation

General Definition Format User properties Value

Add Insert x Copy Paste Undo Redo Σ1 1-Σ 0...1 %/

Observation	y	n
y	0.1702	0.001
n	0.8298	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.11 – Таблица условных вероятностей узла «False observation» («Неверное наблюдение»)

Node properties: Wrong identification

General Definition Format User properties Value

Add Insert

Observation	y	n
y	0.1277	0.001
n	0.8723	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.12 – Таблица условных вероятностей узла «Wrong identification» («Неверная идентификация»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Interpretation» представлено на рисунках 5.5.2.13–5.5.2.18.

Node properties: Interpretation

General Definition Format Value

Add Insert

Cognitive functions	y	n
y	0.6991	0.001
n	0.3009	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.13 – Таблица условных вероятностей узла «Interpretation»

Node properties: Faulty diagnosis

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %/0

Interpretation	y	n
y	0.3924	0.001
n	0.6076	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.14 – Таблица условных вероятностей узла «Faulty diagnosis» («Ошибочный диагноз»)

Node properties: Wrong reasoning

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %/0

Interpretation	y	n
y	0.3418	0.001
n	0.6582	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.15 – Таблица условных вероятностей узла «Wrong reasoning» («Неверные рассуждения»)

Node properties: Decision error

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Interpretation	y	n
y	0.2785	0.001
n	0.7215	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.16 – Таблица условных вероятностей узла «Decision error» («Ошибка в решении»)

Node properties: Delayed interpretation

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Interpretation	y	n
y	0.1392	0.001
n	0.8608	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.17 – Таблица условных вероятностей узла «Delayed interpretation» («Замедленная интерпретация»)

Node properties: Incorrect prediction

General Definition Format User properties Value

Add Insert

Interpretation	y	n
y	0.1139	0.001
n	0.8861	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.18 – Таблица условных вероятностей узла «Incorrect prediction» («Неверный прогноз»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Planning» представлено на рисунках 5.5.2.19–5.5.2.21.

Node properties: Planning

General Definition Format User properties Value

Add Insert

Cognitive functions	y	n
y	0.3363	0.001
n	0.6637	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.19 – Таблица условных вероятностей узла «Planning»

Node properties: Inadequate plan

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Planning	y	n
y	0.6053	0.001
n	0.3947	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.20 – Таблица условных вероятностей узла «Inadequate plan» («Неадекватный план»)

Node properties: Priority error

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Planning	y	n
y	0.4474	0.001
n	0.5526	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.21 – Таблица условных вероятностей узла «Priority error» («Ошибка приоритета»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Temporary person related functions» («Временные особенности человека») представлено на рисунках 5.5.2.22–5.5.2.30.

Man	y	n
y	0.2279	0.001
n	0.7721	0.999

Рисунок 5.5.2.22 – Таблица условных вероятностей узла «Temporary person related functions»

Temporary person related functions	y	n
y	0.0645	0.001
n	0.9355	0.999

Рисунок 5.5.2.23 – Таблица условных вероятностей узла «Memory failure» («Плохая память»)

Node properties: Fear

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Temporary person related functions	y	n
y	0.1613	0.001
n	0.8387	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.24 – Таблица условных вероятностей узла «Fear» («Страх»)

Node properties: Distraction

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Temporary person related functions	y	n
y	0.4516	0.001
n	0.5484	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.25 – Таблица условных вероятностей узла «Distraction» («Рассеянность»)

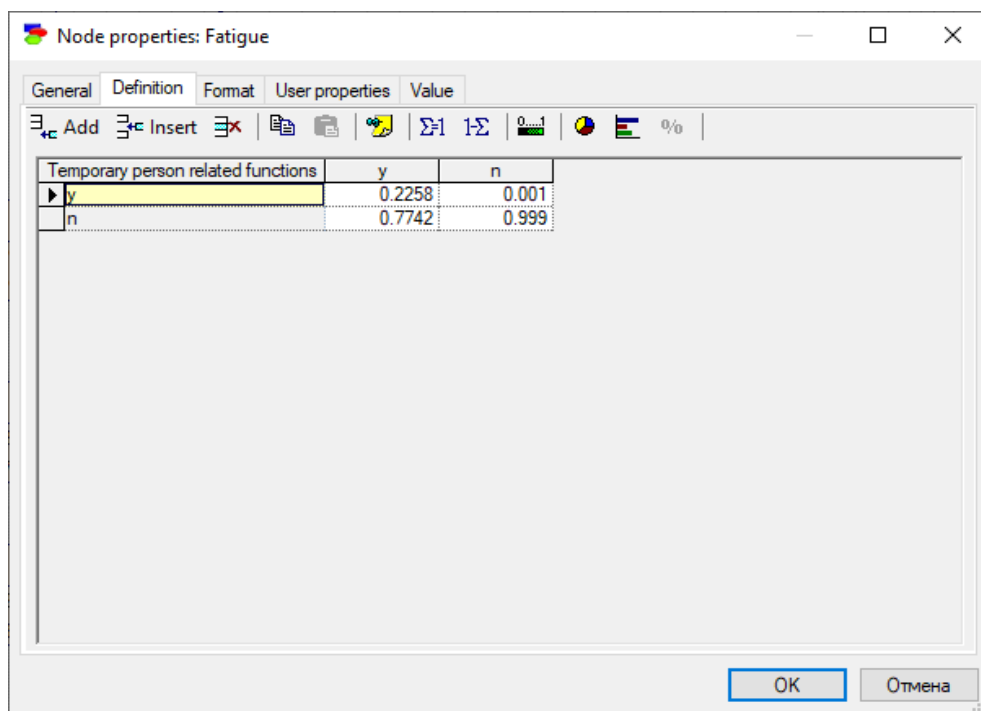


Рисунок 5.5.2.26 – Таблица условных вероятностей узла «Fatigue» («Усталость»)

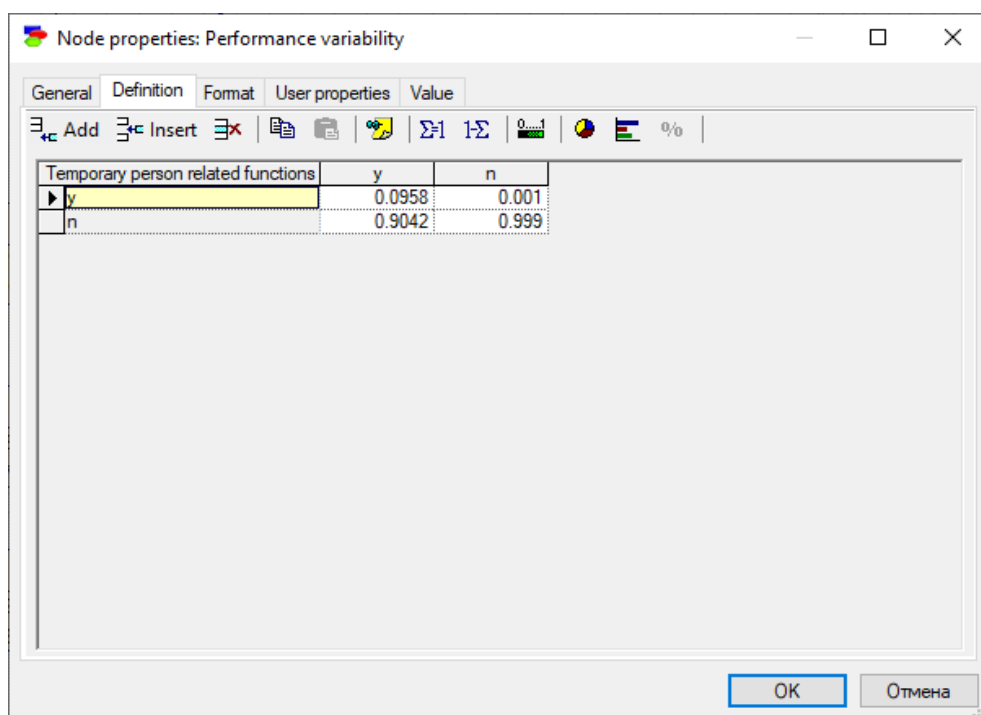


Рисунок 5.5.2.27 – Таблица условных вероятностей узла «Performance variability» («Изменчивость производительности»)

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Inattention". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". The "Value" tab is active, displaying a table with the following data:

Temporary person related functions	y	n
y	0.1613	0.001
n	0.8387	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.2.28 – Таблица условных вероятностей узла «Inattention» («Невнимательность»)

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Physiological stress". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". The "Value" tab is active, displaying a table with the following data:

Temporary person related functions	y	n
y	0.0645	0.001
n	0.9355	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.2.29 – Таблица условных вероятностей узла «Physiological stress» («Физиологический стресс»)

Node properties: Psychological stress

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Temporary person related functions	y	n
y	0.2258	0.001
n	0.7742	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.30 – Таблица условных вероятностей узла «Psychological stress» («Психологический стресс»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Permanent person related functions» («Постоянные особенности человека») представлено на рисунках 5.5.2.31–5.5.2.34.

Node properties: Permanent person related functions

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Man	y	n
y	0.1324	0.001
n	0.8676	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.31 – Таблица условных вероятностей узла «Permanent person related functions»

Node properties: Functional impairment

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Permanent person related functions	y	n
y	0.0556	0.001
n	0.9444	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.32 – Таблица условных вероятностей узла «Functional impairment» («Функциональные нарушения»)

Node properties: Cognitive style

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Permanent person related functions	y	n
y	0	0.001
n	1	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.33 – Таблица условных вероятностей узла «Cognitive style» («Когнитивный стиль»)

Permanent person related functions	y	n
y	0.9445	0.001
n	0.0555	0.999

Рисунок 5.5.2.34 – Таблица условных вероятностей узла «Cognitive bias» («Когнитивное искажение»)

Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Man» представлен на рисунке 5.5.2.35.

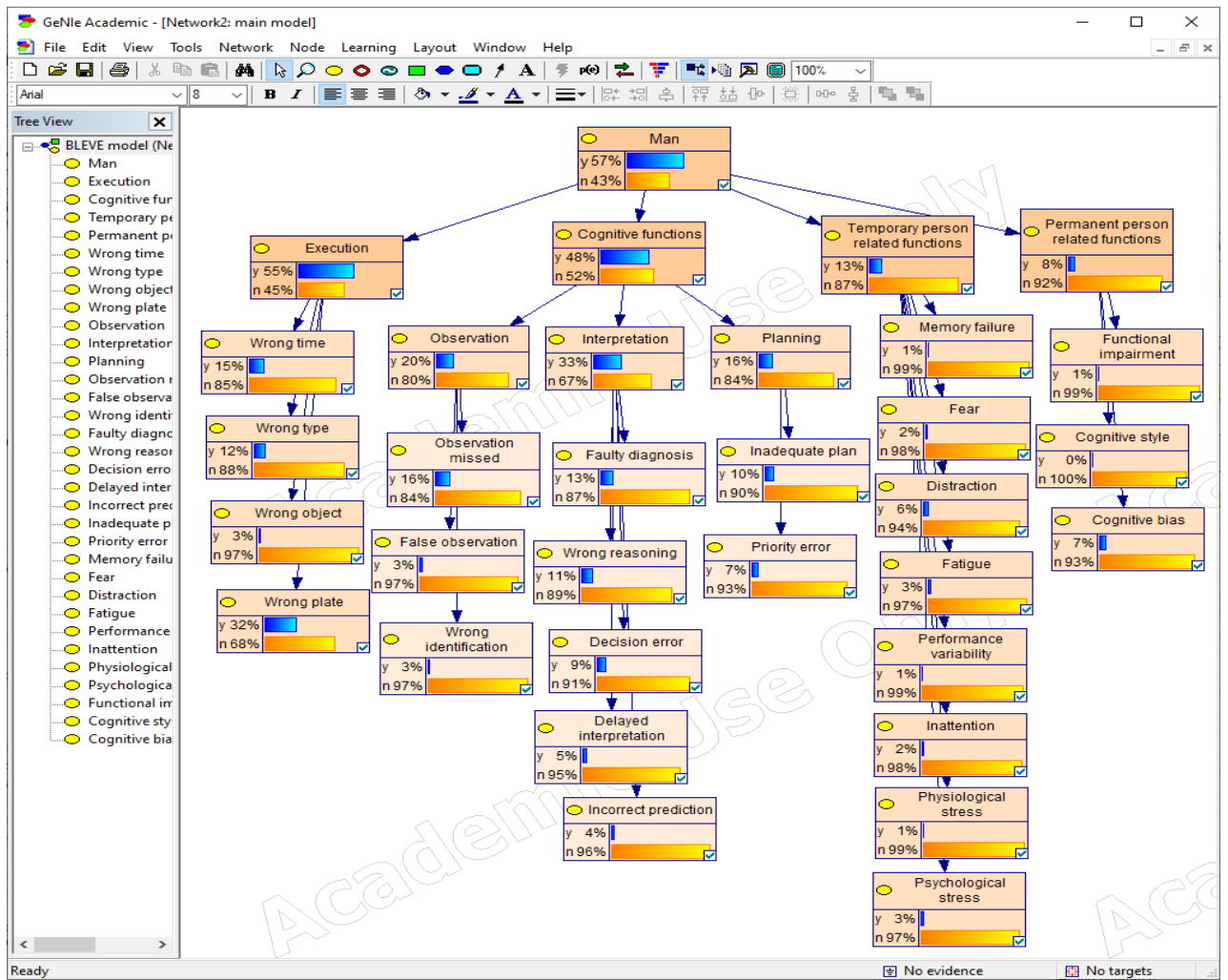


Рисунок 5.5.2.35 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Man»

Модель ветви «Technology» построена в соответствии со схемой на рисунке 5.4.2.2. Общий вид модели представлен на рисунке 5.5.2.36.

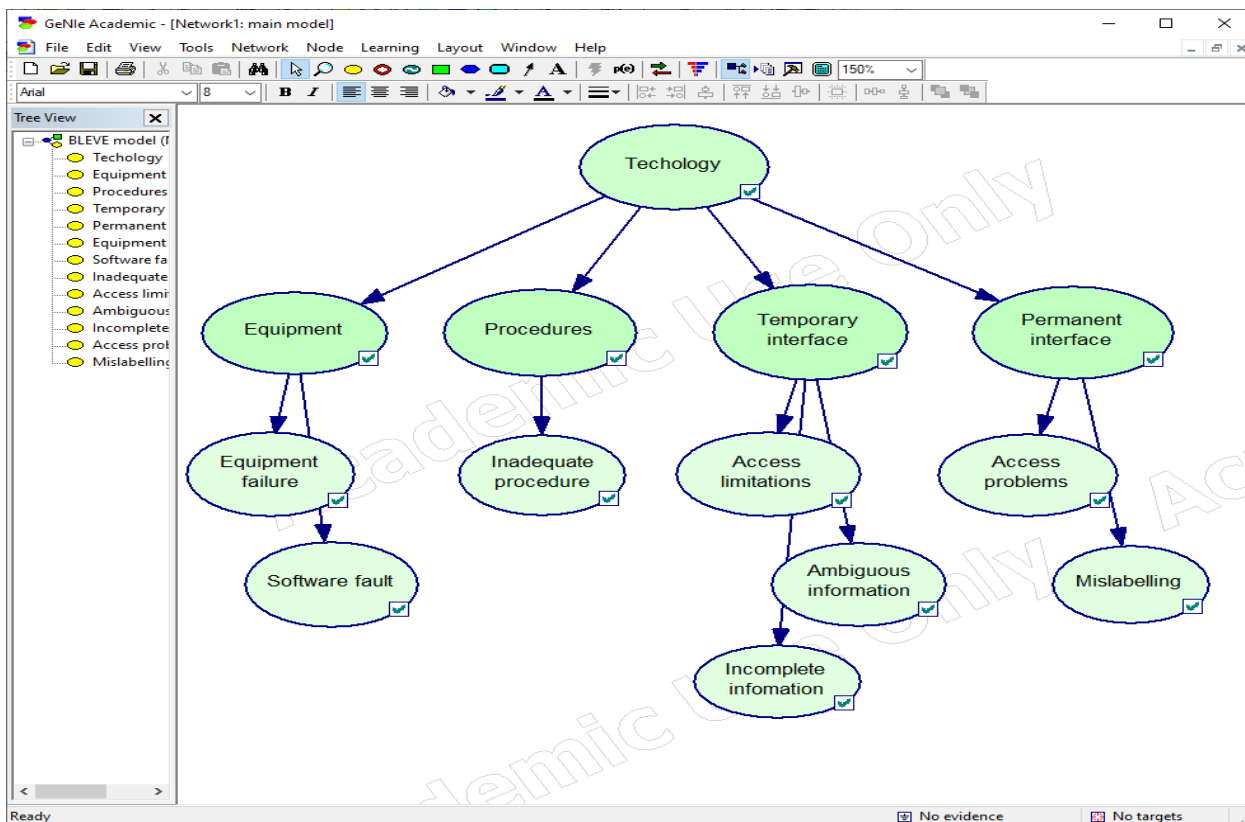


Рисунок 5.5.2.36 – Общий вид развития аварии по ветви «Technology»

Значения таблиц условных вероятностей для узлов занесены в программу аналогично модели «Man» из таблицы 5.4.1.4. Таблица вероятностей для узла «Technology» представлена на рисунке 5.5.2.37.

Node properties: Technology

General Definition Format User properties Value

y	0.8235
n	0.1765

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.37 – Таблица вероятностей узла «Technology»

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Equipment» («Оборудование») представлено на рисунках 5.5.2.38 – 5.5.2.40.

Node properties: Equipment

General Definition Format User properties Value

	Technology	y	n
y		0.6837	0.001
n		0.3163	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.38 – Таблица условных вероятностей узла «Equipment»

Node properties: Equipment failure

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Equipment	y	n
y	0.9776	0.001
n	0.0224	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.39 – Таблица условных вероятностей узла «Equipment failure» («Отказ оборудования»)

Node properties: Software fault

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Equipment	y	n
y	0.0448	0.001
n	0.9552	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.40 – Таблица условных вероятностей узла «Software fault» («Сбой ПО»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Procedures» («Процедуры») представлено на рисунках 5.5.2.41 – 5.5.2.42.

Node properties: Procedures

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Sum 1-Σ 0..1 %

Technology	y	n
y	0.5357	0.001
n	0.4643	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.41 – Таблица условных вероятностей узла «Procedures»

Node properties: Inadequate procedure

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Sum 1-Σ 0..1 %

Procedures	y	n
y	1	0.001
n	0	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.42 – Таблица условных вероятностей узла «Inadequate procedures» («Неадекватные процедуры»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Temporary interface» («Временный интерфейс») представлено на рисунках 5.5.2.43 – 5.5.2.46.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Temporary interface". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". Below the tabs is a toolbar with icons for "Add", "Insert", "Delete", "Copy", "Paste", "Undo", "Redo", "Sum", "Sum of squares", "Average", "Standard deviation", and "Percentage". The main area contains a table with the following data:

Technology	y	n
y	0.2296	0.001
n	0.7704	0.999

At the bottom right, there are "OK" and "Отмена" buttons.

Рисунок 5.5.2.43 – Таблица условных вероятностей узла «Temporary interface»

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Access limitations". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". Below the tabs is a toolbar with icons for "Add", "Insert", "Delete", "Copy", "Paste", "Undo", "Redo", "Sum", "Sum of squares", "Average", "Standard deviation", and "Percentage". The main area contains a table with the following data:

Temporary interface	y	n
y	0.0667	0.001
n	0.9333	0.999

At the bottom right, there are "OK" and "Отмена" buttons.

Рисунок 5.5.2.44 – Таблица условных вероятностей узла «Access limitations» («Ограничения доступа»)

Node properties: Ambiguous information

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Temporary interface	y	n
y	0.1333	0.001
n	0.8667	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.45 – Таблица условных вероятностей узла «Ambiguous information» («Неоднозначная информация»)

Node properties: Incomplete information

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Temporary interface	y	n
y	0.9333	0.001
n	0.0667	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.46 – Таблица условных вероятностей узла «Incomplete information» («Неполная информация»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Permanent interface» («Постоянный интерфейс») представлено на рисунках 2.2.2.47 – 2.2.2.49.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Permanent interface". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". The "Definition" tab is active, displaying a table with the following data:

Technology	y	n
y	0.0408	0.001
n	0.9592	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.2.47 – Таблица условных вероятностей узла «Permanent interface»

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Access problems". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". The "Definition" tab is active, displaying a table with the following data:

Permanent interface	y	n
y	0.5	0.001
n	0.5	0.999

At the bottom of the dialog box, there are "OK" and "Отмена" (Cancel) buttons.

Рисунок 5.5.2.48 – Таблица условных вероятностей узла «Access problems» («Проблемы с доступом»)

Permanent interface	y	n
y	0.5	0.001
n	0.5	0.999

Рисунок 5.5.2.49 – Таблица условных вероятностей узла «Mislabelling» («Неверная маркировка»)

Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Technology» представлен на рисунке 5.5.2.50.

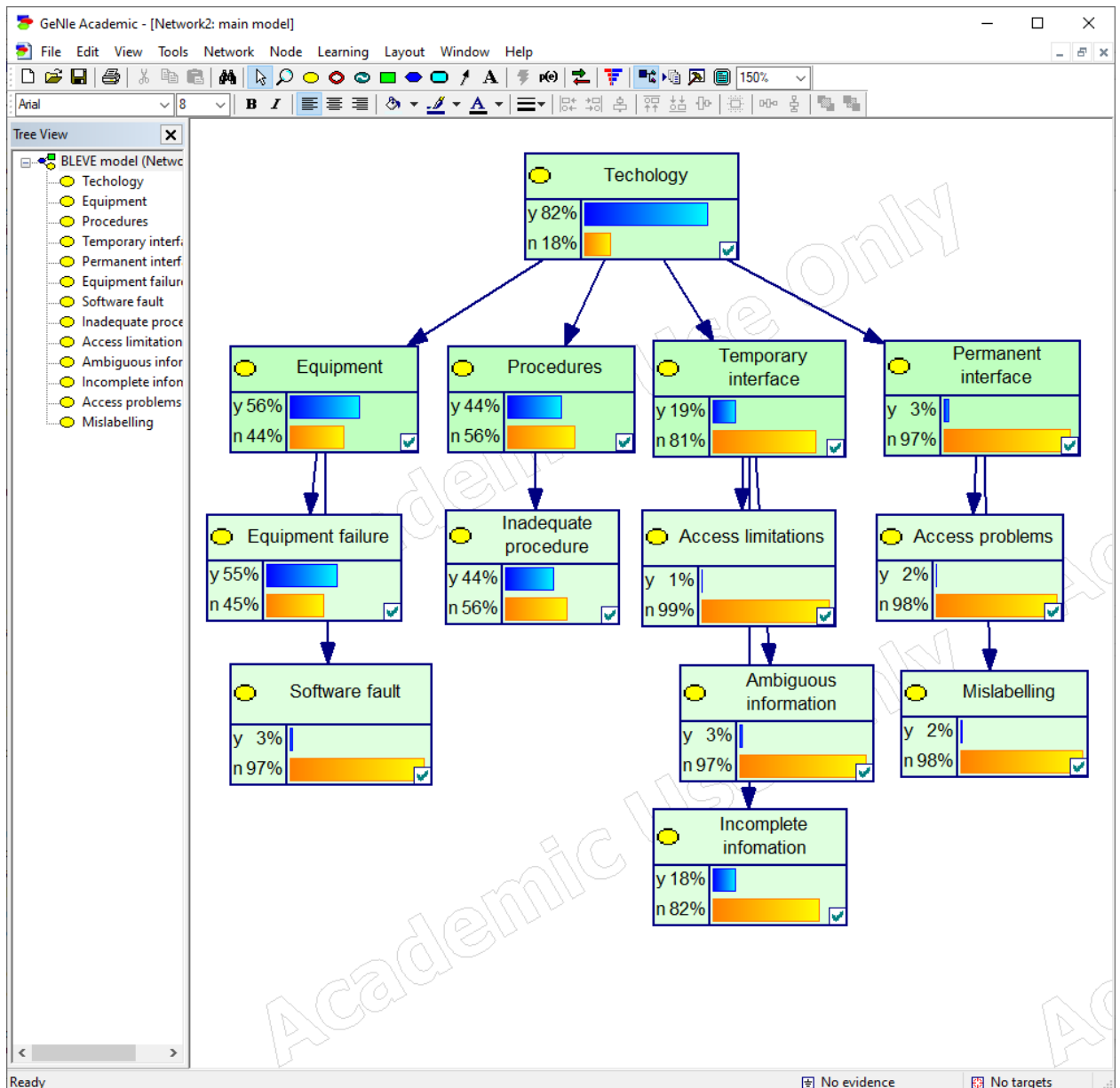


Рисунок 5.5.2.50 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Technology»

Модель ветви «Organization» построена в соответствии со схемой на рисунке 5.4.2.3. Общий вид модели развития аварии по ветви «Organization» представлен на рисунке 5.5.2.51.

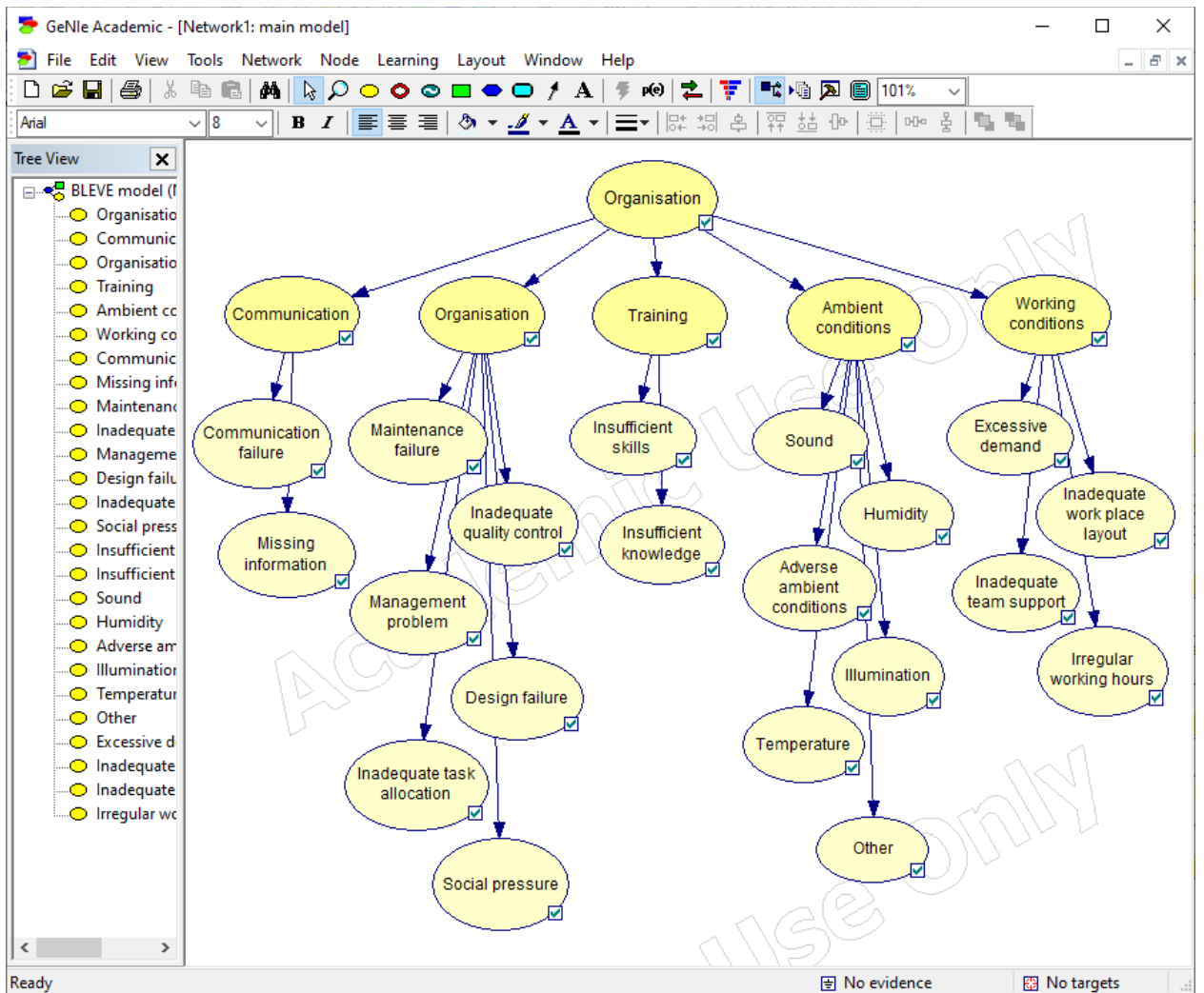


Рисунок 5.5.2.51 – Общий вид модели развития аварии по ветви «Organization»

Значения таблиц условной вероятности для узлов занесены в программу аналогично модели «Man» из таблицы 5.4.1.5. Таблица вероятностей для узла «Organization» представлена на рисунке 5.5.2.52.

Node properties: Organisation

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

y	0.9538
n	0.0462

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.52 – Таблица вероятностей узла «Organization»

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Communication» представлено на рисунках 5.5.2.53–5.5.2.55.

Node properties: Communication

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Organisation	y	n
y	0.304	0.001
n	0.696	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.53 – Таблица условных вероятностей узла «Communication»

Node properties: Communication failure

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Communication	y	n
y	0.3623	0.001
n	0.6377	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.54 – Таблица условных вероятностей узла «Communication failure» («Потеря коммуникации»)

Node properties: Missing information

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Communication	y	n
y	0.7101	0.001
n	0.2899	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.55 – Таблица условных вероятностей узла «Missing information» («Потеря части информации»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Organization» представлено на рисунках 5.5.2.56 – 5.5.2.62.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Organisation". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". Below the tabs is a toolbar with icons for "Add", "Insert", "Delete", "Copy", "Paste", "Undo", "Redo", "Sum", "Product", "Average", "Min", "Max", and "Percentage". The main area contains a table with the following data:

Organisation	y	n
y	0.9868	0.001
n	0.0132	0.999

At the bottom right of the dialog box are "OK" and "Отмена" buttons.

Рисунок 5.5.2.56 – Таблица условных вероятностей узла «Organization»

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Maintenance failure". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". Below the tabs is a toolbar with icons for "Add", "Insert", "Delete", "Copy", "Paste", "Undo", "Redo", "Sum", "Product", "Average", "Min", "Max", and "Percentage". The main area contains a table with the following data:

Organisation	y	n
y	0.3705	0.001
n	0.6295	0.999

At the bottom right of the dialog box are "OK" and "Отмена" buttons.

Рисунок 5.5.2.57 – Таблица условных вероятностей узла «Maintenance failure» («Некачественное обслуживание»)

Node properties: Inadequate quality control

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Organisation	y	n
y	0.6429	0.001
n	0.3571	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.58 – Таблица условных вероятностей узла «Inadequatequality control» («Неадекватный контроль качества»)

Node properties: Management problem

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Organisation	y	n
y	0.0982	0.001
n	0.9018	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.59 – Таблица условных вероятностей узла «Management problem» («Проблемы управления»)

Node properties: Design failure

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Organisation	y	n
y	0.7009	0.001
n	0.2991	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.60 – Таблица условных вероятностей узла «Design failure» («Отказ конструкции»)

Node properties: Inadequate task allocation

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Organisation	y	n
y	0.6384	0.001
n	0.3616	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.61 – Таблица условных вероятностей узла «Inadequate task allocation» («Неадекватное распределение задач»)

Node properties: Social pressure

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Organisation	y	n
y	0.0759	0.001
n	0.9241	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.62 – Таблица условных вероятностей узла «Social pressure» («Общественное давление»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Training» («Обучение») представлено на рисунках 5.5.2.63–5.5.2.65.

Node properties: Training

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Organisation	y	n
y	0.5683	0.001
n	0.4317	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.63 – Таблица условных вероятностей узла «Training»

Node properties: Insufficient skills

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Sum 1-Σ 0...1 %/0

Training	y	n
y	0.6667	0.001
n	0.3333	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.64 – Таблица условных вероятностей узла «Insufficient skills» («Недостаточные навыки»)

Node properties: Insufficient knowledge

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Sum 1-Σ 0...1 %/0

Training	y	n
y	0.6512	0.001
n	0.3488	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.65 – Таблица условных вероятностей узла «Insufficient knowledge» («Недостаточные знания»)

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Ambient conditions» («Условия окружающей среды») представлено на рисунках 5.5.2.66 – 5.5.2.72.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Ambient conditions". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". Below the tabs is a toolbar with icons for "Add", "Insert", "Delete", "Copy", "Paste", "Undo", "Redo", "Sum", "Product", "Average", "Standard Deviation", "Variance", and "Percentage". The main area contains a table with the following data:

Organisation	y	n
y	0.0925	0.001
n	0.9075	0.999

At the bottom right of the dialog box are "OK" and "Отмена" buttons.

Рисунок 5.5.2.66 – Таблица условных вероятностей узла «Ambient conditions»

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Sound". It has tabs for "General", "Definition", "Format", "User properties", and "Value". Below the tabs is a toolbar with icons for "Add", "Insert", "Delete", "Copy", "Paste", "Undo", "Redo", "Sum", "Product", "Average", "Standard Deviation", "Variance", and "Percentage". The main area contains a table with the following data:

Ambient conditions	y	n
y	0	0.001
n	1	0.999

At the bottom right of the dialog box are "OK" and "Отмена" buttons.

Рисунок 5.5.2.67 – Таблица условных вероятностей узла «Sound»

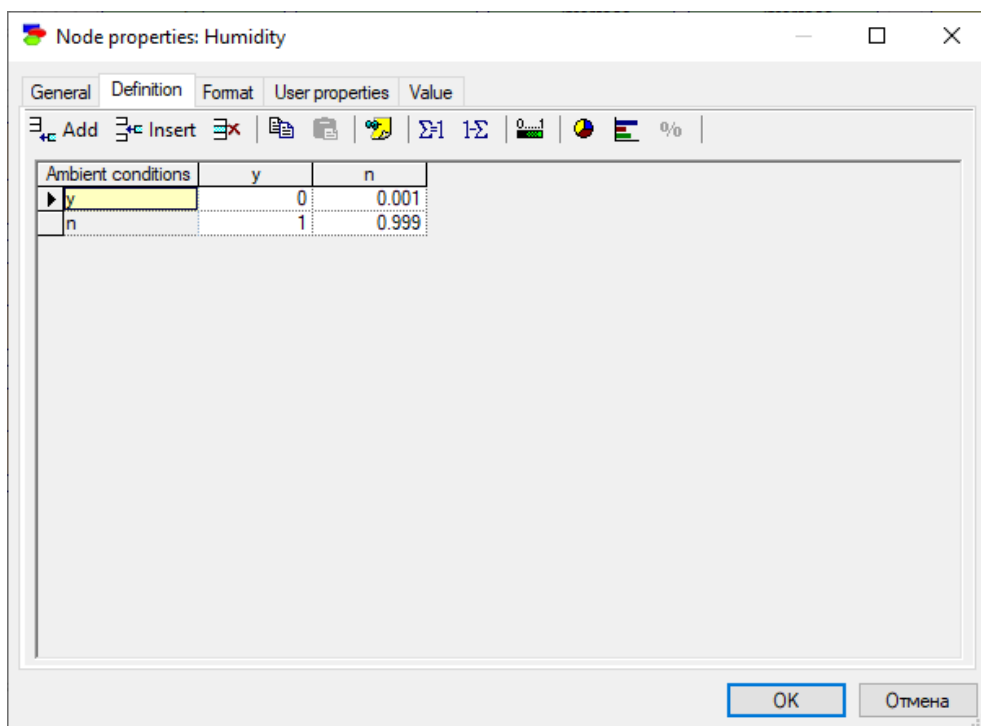


Рисунок 5.5.2.68 – Таблица условных вероятностей узла «Humidity» («Влажность»)

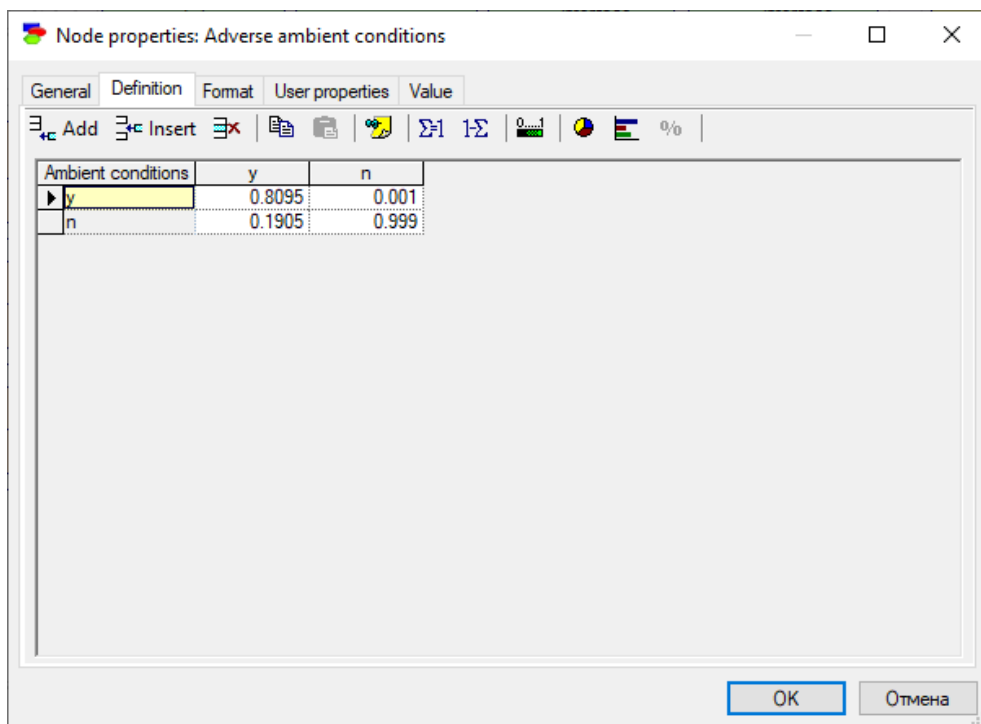


Рисунок 5.5.2.69 – Таблица условных вероятностей узла «Adverse ambient conditions» («Неблагоприятные условия окружающей среды»)

Ambient conditions	y	n
y	0.0952	0.001
n	0.9048	0.999

Рисунок 5.5.2.70 – Таблица условных вероятностей узла «Illumination» («Освещение»)

Ambient conditions	y	n
y	0.1429	0.001
n	0.8571	0.999

Рисунок 5.5.2.71 – Таблица условных вероятностей узла «Temperature»

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Other" with tabs for General, Definition, Format, User properties, and Value. The Definition tab is active, displaying a table with the following data:

Ambient conditions	y	n
y	0	0.001
n	1	0.999

Buttons for "OK" and "Отмена" are visible at the bottom right.

Рисунок 5.5.2.72 – Таблица условных вероятностей узла «Other»

Заполнение таблиц условных вероятностей для ветви «Working conditions» представлено на рисунках 5.5.2.73 – 5.5.2.77.

The screenshot shows a dialog box titled "Node properties: Working conditions" with tabs for General, Definition, Format, User properties, and Value. The Definition tab is active, displaying a table with the following data:

Organisation	y	n
y	0.1189	0.001
n	0.8811	0.999

Buttons for "OK" and "Отмена" are visible at the bottom right.

Рисунок 5.5.2.73 – Таблица условных вероятностей узла «Working conditions»

Node properties: Excessive demand

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Sum 1-Σ Percent

Working conditions	y	n
y	0.4815	0.001
n	0.5185	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.74 – Таблица условных вероятностей узла «Excessive demand» («Чрезмерные требования»)

Node properties: Inadequate work place layout

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo Sum 1-Σ Percent

Working conditions	y	n
y	0.2222	0.001
n	0.7778	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.75 – Таблица условных вероятностей узла «Inadequate work plate layout» («Неадекватная планировка рабочего места»)

Node properties: Inadequate team support

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Working conditions	y	n
y	0.2963	0.001
n	0.7037	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.76 – Таблица условных вероятностей узла «Inadequate team support» («Недостаточная поддержка команды»)

Node properties: Irregular working hours

General Definition Format User properties Value

Add Insert X Copy Paste Undo Redo %

Working conditions	y	n
y	0.3333	0.001
n	0.6667	0.999

OK Отмена

Рисунок 5.5.2.77 – Таблица условных вероятностей узла «Irregular working hours» («Нерегулярное время работы»)

Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Organization» представлен на рисунке 5.5.2.78.

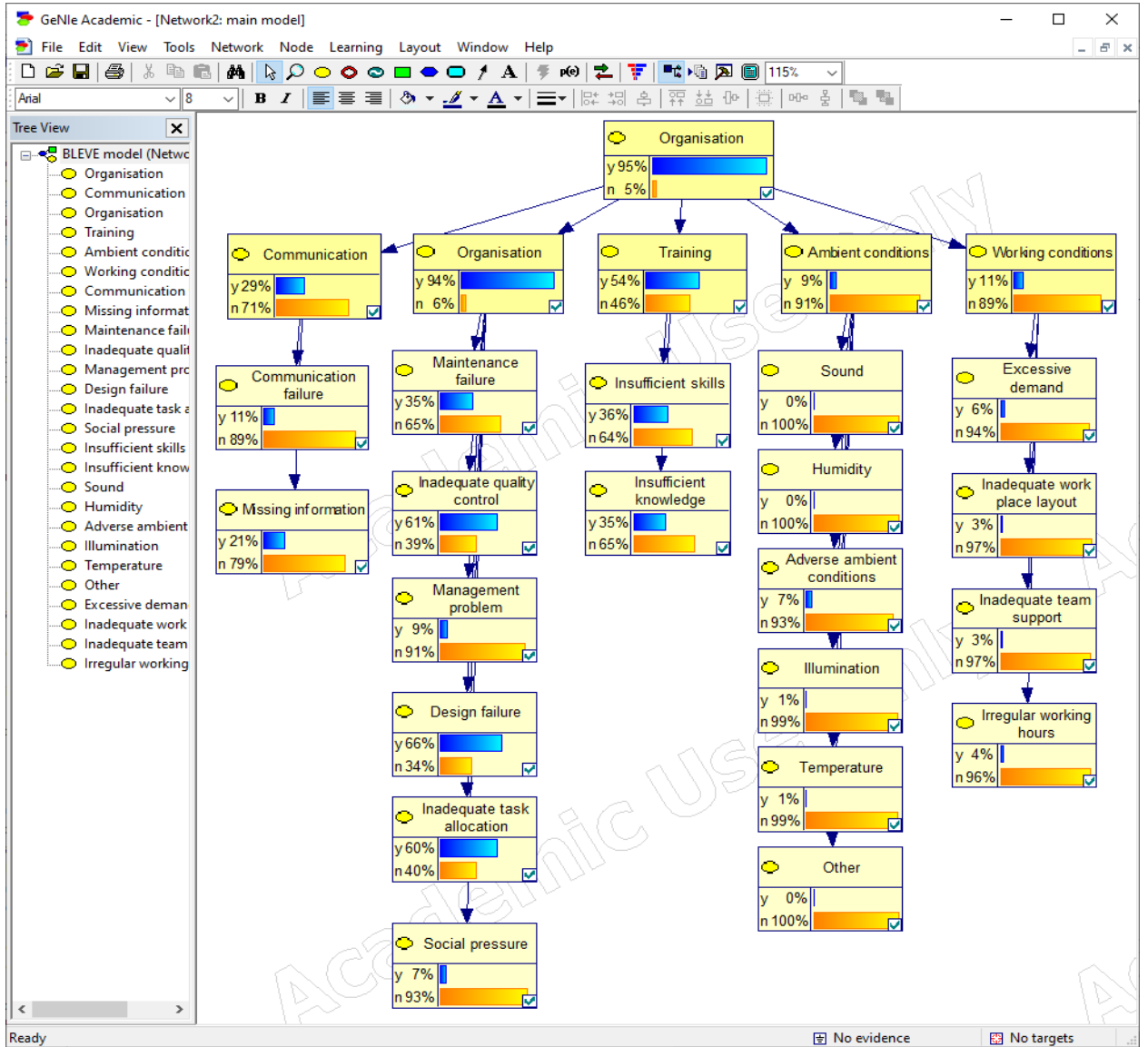


Рисунок 5.5.2.78 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Organization»

Для дальнейшего моделирования три ветви причин человеческих ошибок «Man», «Technology» и «Organization», представленные на рисунках 5.5.2.35, 5.5.2.50 и 5.5.2.78, объединены в одном узле «Human factor». Объединение ветвей показано на рисунке 5.5.2.79.

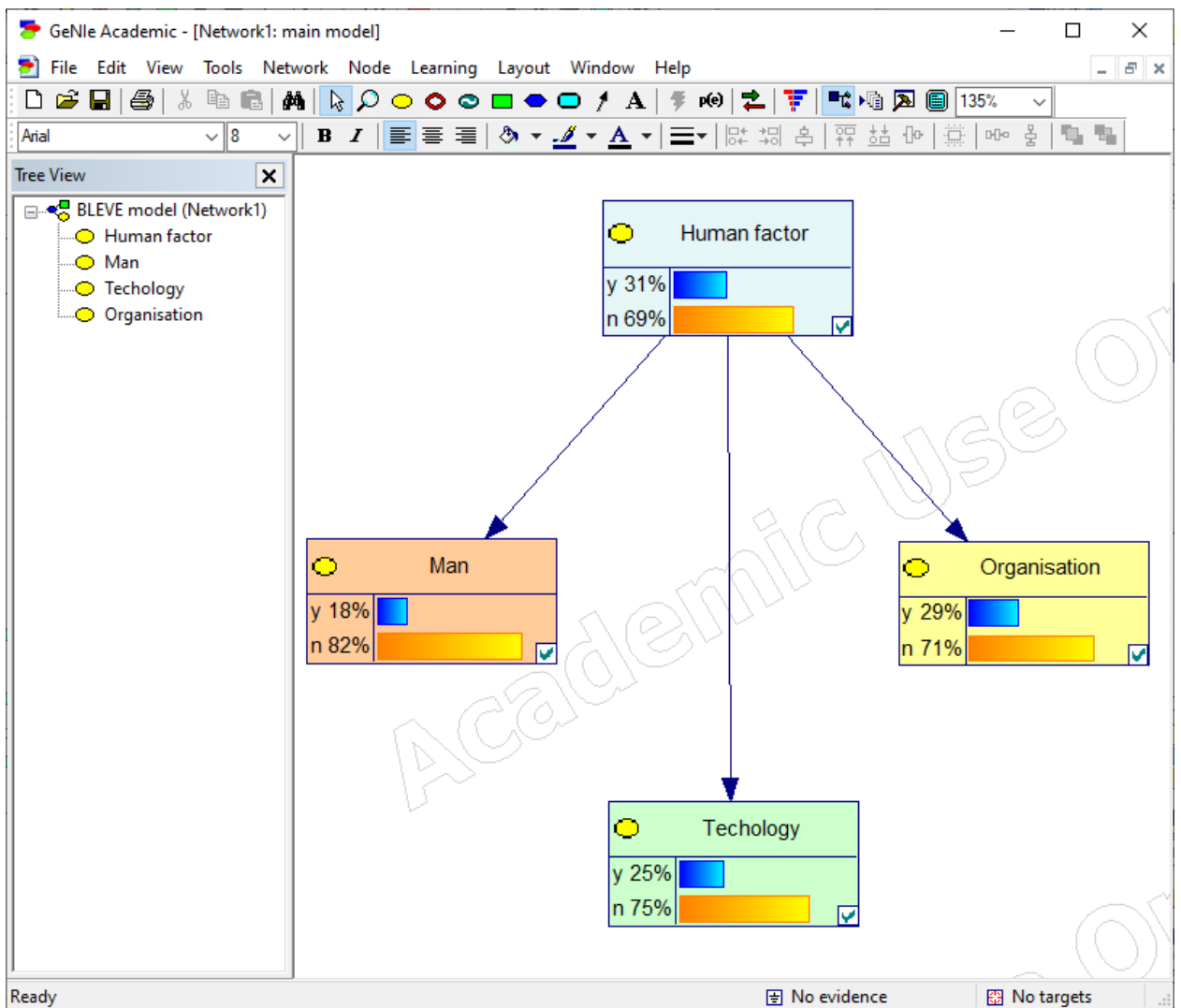


Рисунок 5.5.2.79 – Объединение групп причин человеческих ошибок в узле «Human factor»

Значение вероятности возникновения узла «Human factor» взято согласно таблице 5.4.1.1 – 30,7% (рисунок 5.5.2.80).

y	0.307
n	0.693

Рисунок 5.5.2.80 – Таблица условных вероятностей узла «Human factor»

Объединение в единую модель и определение узла возникновения аварии «BLEVE». Для получения единой модели, отражающей вероятность возникновения аварии в результате рассмотренных выше причин, все отдельные ветви были объединены узлом «BLEVE» (рисунок 5.5.2.81).

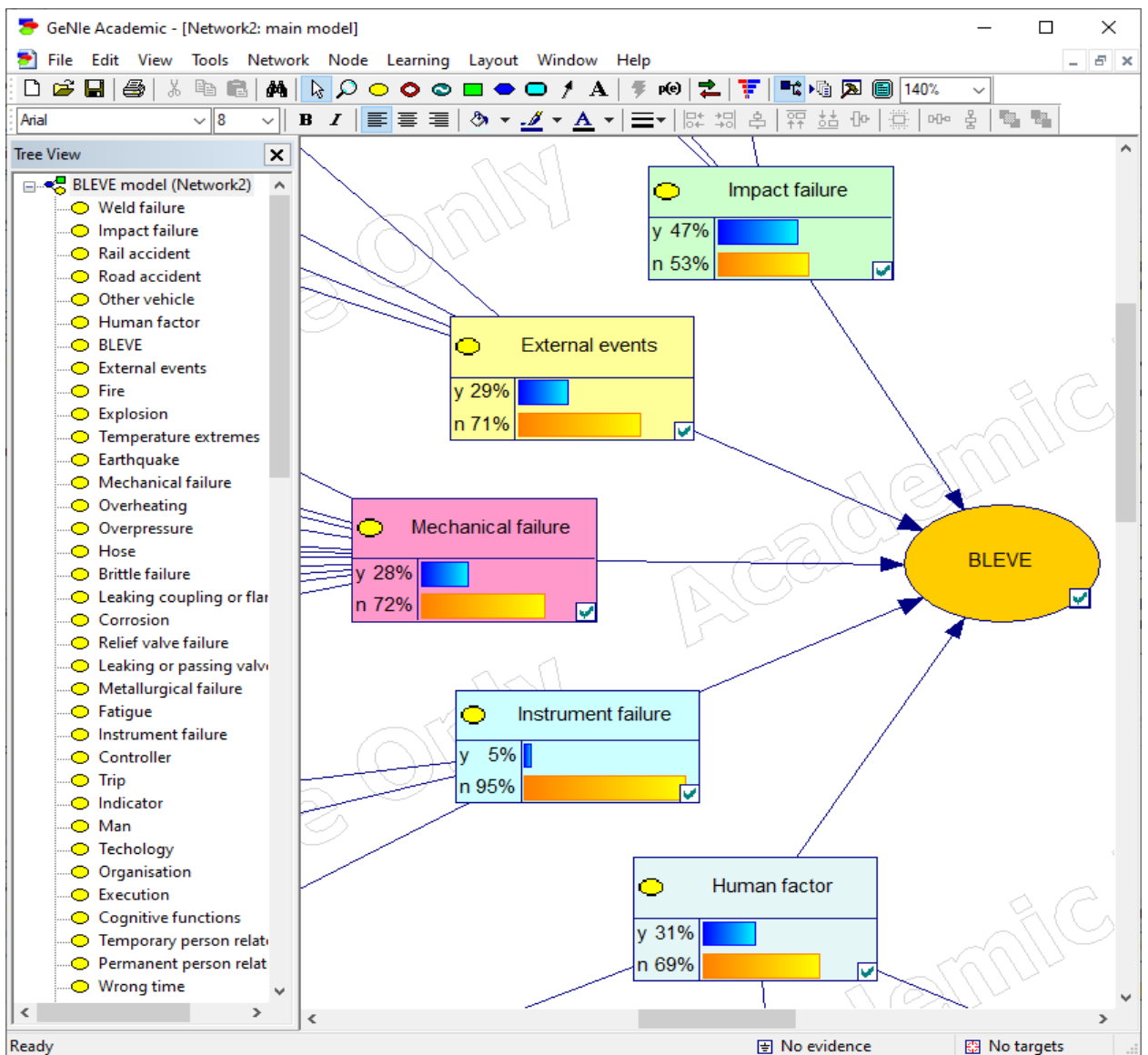


Рисунок 5.5.2.81 – Объединение групп причин в узел «BLEVE»

Для определения вероятности узла «BLEVE» необходимо задать условные вероятности общих причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой причины на вероятность возникновения аварии. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждой из общих причин аварии («Ударное воздействие», «Внешние события», «Механический сбой», «Неисправность прибора» и «Человеческий фактор») значения их влияния (по отдельности) на возникновение аварии, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. Согласно проведенной экспертной оценке аварий с опасными веществами, до 70% от их общего числа относятся к авариям с развитием по эффекту BLEVE. В данном исследовании введено допущение о том, что при возникновении всех вышеперечисленных причин аварии одновременно, условная вероятность возникновения аварии с эффектом BLEVE будет

равна 0,7. Пусть 70 – максимальное суммарное количество баллов, распределим эти баллы по пяти причинам.

В таблице 5.5.2.1 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доля от максимума, которая будет использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «BLEVE».

Таблица 5.5.2.1 – Балльная оценка условной вероятности причин аварии

Причина аварии	Балл влияния	%
Ударное воздействие	20	0,20
Внешние события	15	0,15
Механический сбой	10	0,10
Неисправность прибора	7	0,07
Человеческий фактор	18	0,18

С помощью таблицы 5.5.2.1 была заполнена таблица вероятностей узла «BLEVE» по принципу сложения долей участвующих причин для каждой конкретной ветки дерева по рисунку 5.5.2.82.

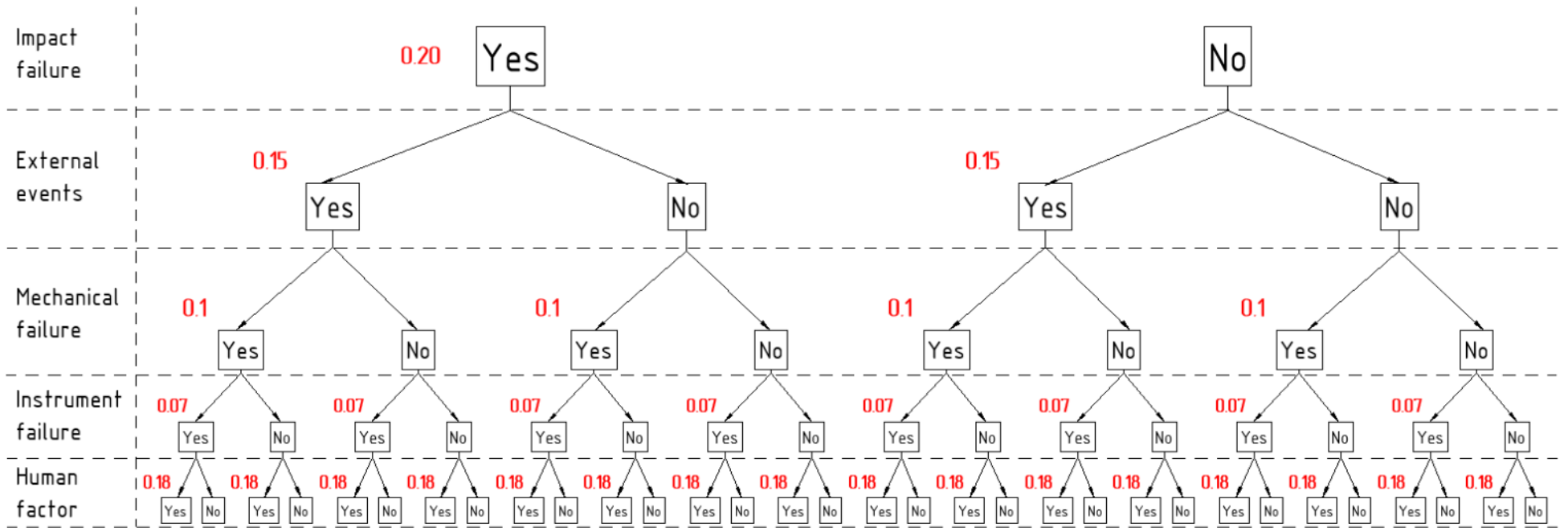


Рисунок 5.5.2.82 – Дерево сложения основных причин аварии в программе

Например, для первой ветки, где все причины имеют значение «у» (то есть «ДА»), условная вероятность равна сумме всех долей, а именно – 0,7. Для предпоследней ветки, где единственной причиной, имеющей значение «у», является «Human factor», значение условной вероятности равно 0,18. Полученные значения условных вероятностей для узла «BLEVE» внесены в таблицу на рисунке 5.5.2.83.

Impact failure	y															
External events	y								n							
Mechanical failure	y				n				y				n			
Instrument failure	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n
Human factor	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n
► y	0.7	0.52	0.63	0.45	0.6	0.42	0.53	0.35	0.55	0.27	0.48	0.3	0.45	0.27	0.38	0.18
► n	0.3	0.48	0.37	0.55	0.4	0.58	0.47	0.65	0.45	0.73	0.52	0.7	0.55	0.73	0.62	0.82

Impact failure	⊕ y	n															
External events	...	y								n							
Mechanical failure	...	y				n				y				n			
Instrument failure	...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n
Human factor	...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n
► y	...	0.5	0.32	0.43	0.25	0.4	0.22	0.33	0.15	0.35	0.17	0.28	0.1	0.25	0.07	0.18	0
► n	...	0.5	0.68	0.57	0.75	0.6	0.78	0.67	0.85	0.65	0.83	0.72	0.9	0.75	0.93	0.82	1

Рисунок 5.5.2.83 – Таблица условных вероятностей для узла «BLEVE»

Таким образом, на рисунке 5.5.2.84 представлен узел «BLEVE» и вероятность возникновения аварии при заданных исходных данных.

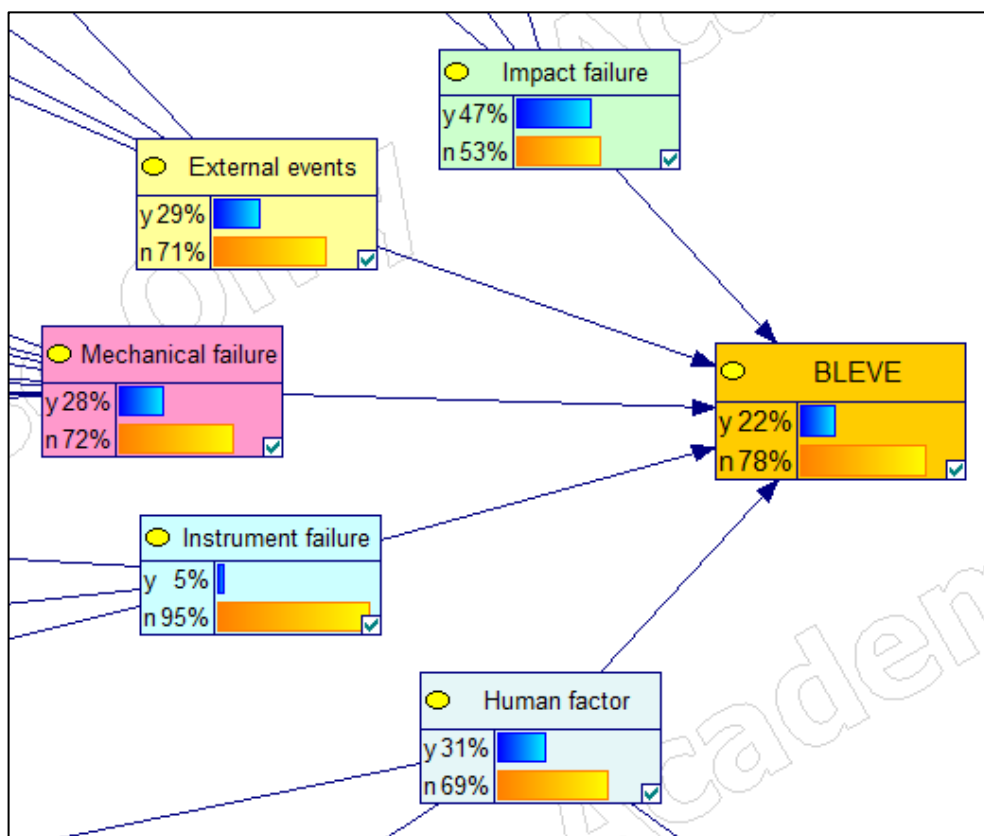


Рисунок 5.5.2.84 – Вид рассчитанного программой узла «BLEVE»

Итоговая модель и результаты расчета программы «GeNIe» рассмотрены в п. 5.6.

5.6. Результаты расчета итоговой модели

Модель, разработанная в настоящем исследовании, представляет собой развернутую байесовскую сеть, основанную на собранных и соответствующим образом подготовленных и структурированных для ввода в программу статистических данных.

Общий вид модели представлен на рисунке 5.6.1 (в бóльшем масштабе приведен в приложении В).

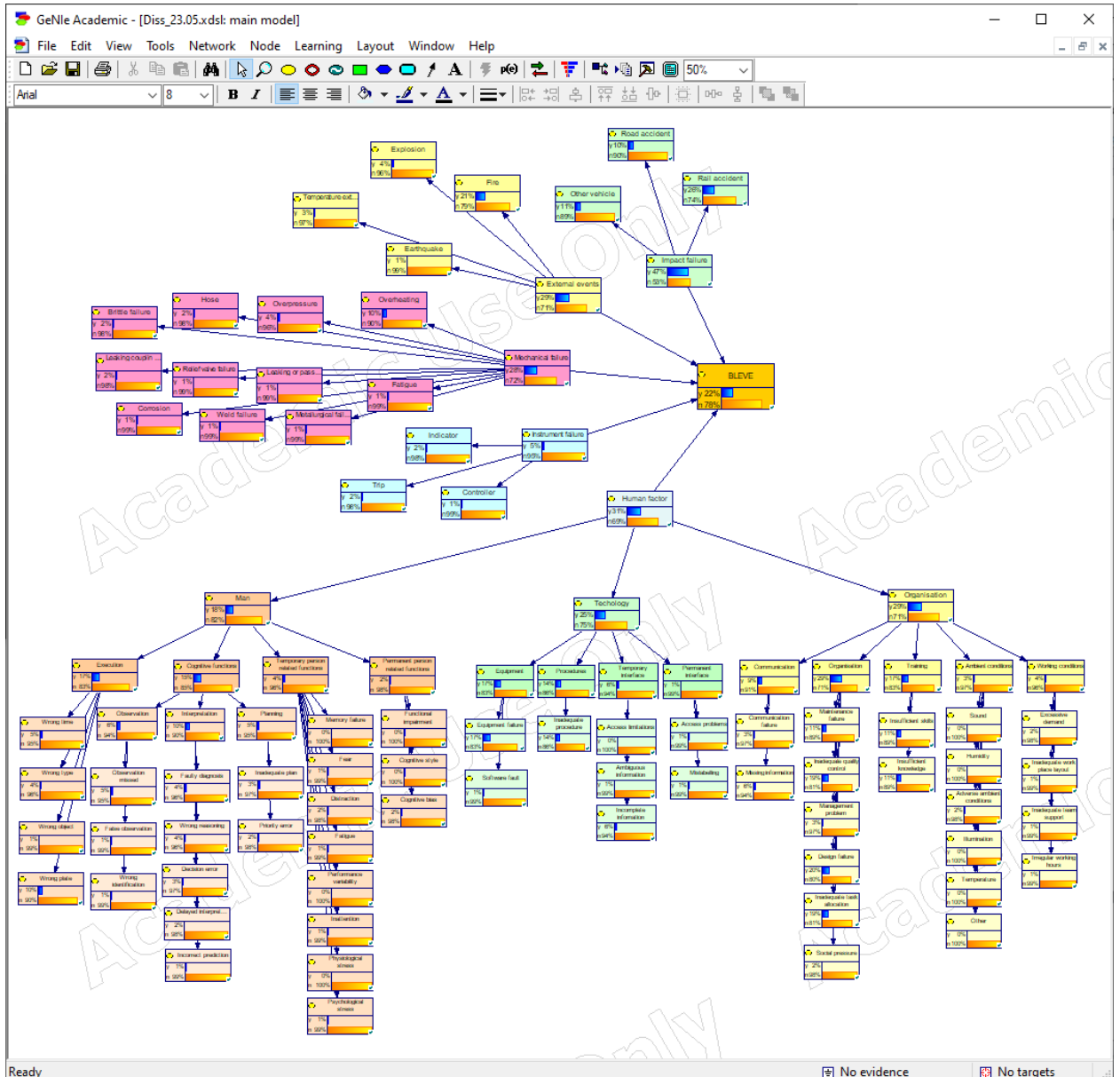


Рисунок 5.6.1 – Общий вид модели развития аварии с эффектом BLEVE

Как видно из рисунка 5.6.2 вероятность возникновения аварии с эффектом BLEVE составляет 22,13%.

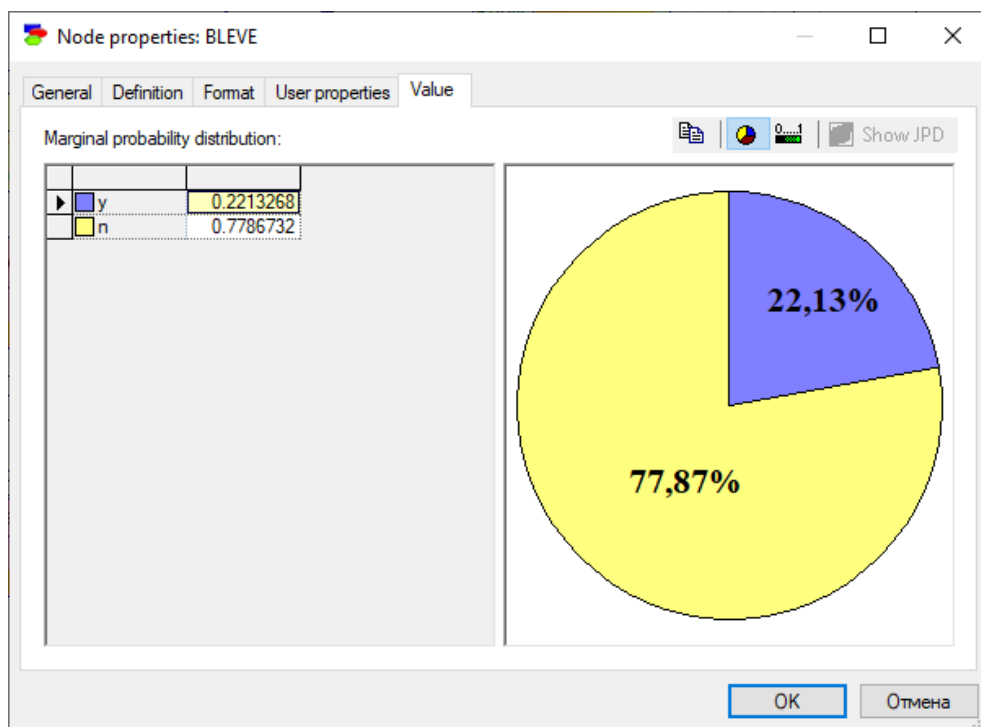


Рисунок 5.6.2 – Итоговая вероятность в узле «BLEVE»

5.7. Примеры моделирования вероятностного развития аварий

Программа «GeNIe» имеет возможность задавать для любого узла конкретное значение. Возможны два варианта значений: «ДА» («y») – выбранная причина однозначно присутствовала в моделируемой ситуации аварии, и «НЕТ» («n») – данная причина никак не повлияла на развитие аварии. Программа позволяет оценить и наглядно показать влияние той или иной причины, а также всевозможных комбинаций причин, на возникновение аварии. Далее смоделированы некоторые аварии и проанализированы результаты расчета в программе по заданным исходным данным.

Пример 1. Оценка риска при транспортировании опасных веществ по территории муниципального образования.

На рисунке 5.7.1 задана ситуация, когда известно, что автоцистерна попала в дорожно-транспортную аварию. Рассмотрим основной узел «Road accident», для которого задано начальное значение «y» («ДА»): стопроцентная вероятность развития аварии.

Это приведет к перерасчету программой вероятностей зависимых узлов, а именно узла «Impact failure», который, в свою очередь, влияет на главный узел модели – «BLEVE».

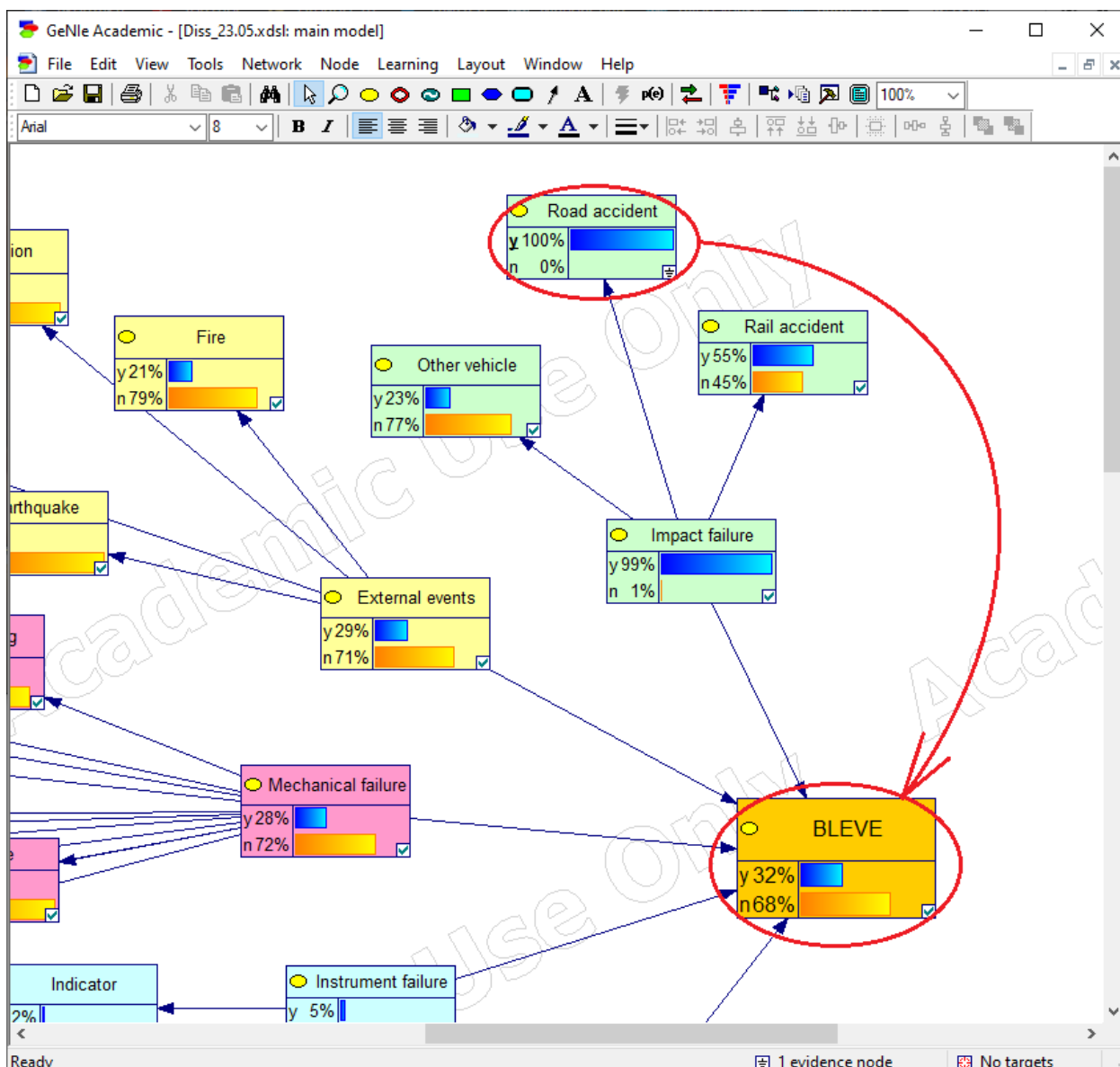


Рисунок 5.7.1 – Пример 1. Моделирование аварии при транспортировании опасных веществ

В большем масштабе рисунок 5.7.1 представлен в приложении В. Ранее, когда модель не имела узлов с заданными значениями вероятностей, программа рассчитывала вероятность возникновения аварии с эффектом BLEVE, учитывая все возможные причины в модели. Узел «BLEVE» имел вероятность, равную 22,13%. В ситуации, смоделированной на рисунке 5.7.1, программа автоматически пересчитала вероятность возникновения аварии, увеличив ее до 32%. Таким образом, можно утверждать, что согласно введенной статистике возникновения ДТП, связанных с транспортированием опасных веществ, в 32% случаев приводит к аварии с эффектом BLEVE.

Пример 2. Оценка риска при возникновении ошибок из группы «Man»

В данном примере для узла «Man» установлено начальное условие – 100% вероятность возникновения аварии, при этом ошибки групп «Technology» и «Organization» исключены, то есть вероятность одноименных узлов равна нулю. Также установлено, что ошибок, связанных с неисправностями приборов «Instrument failure», не наблюдалось (рисунок 5.7.2).

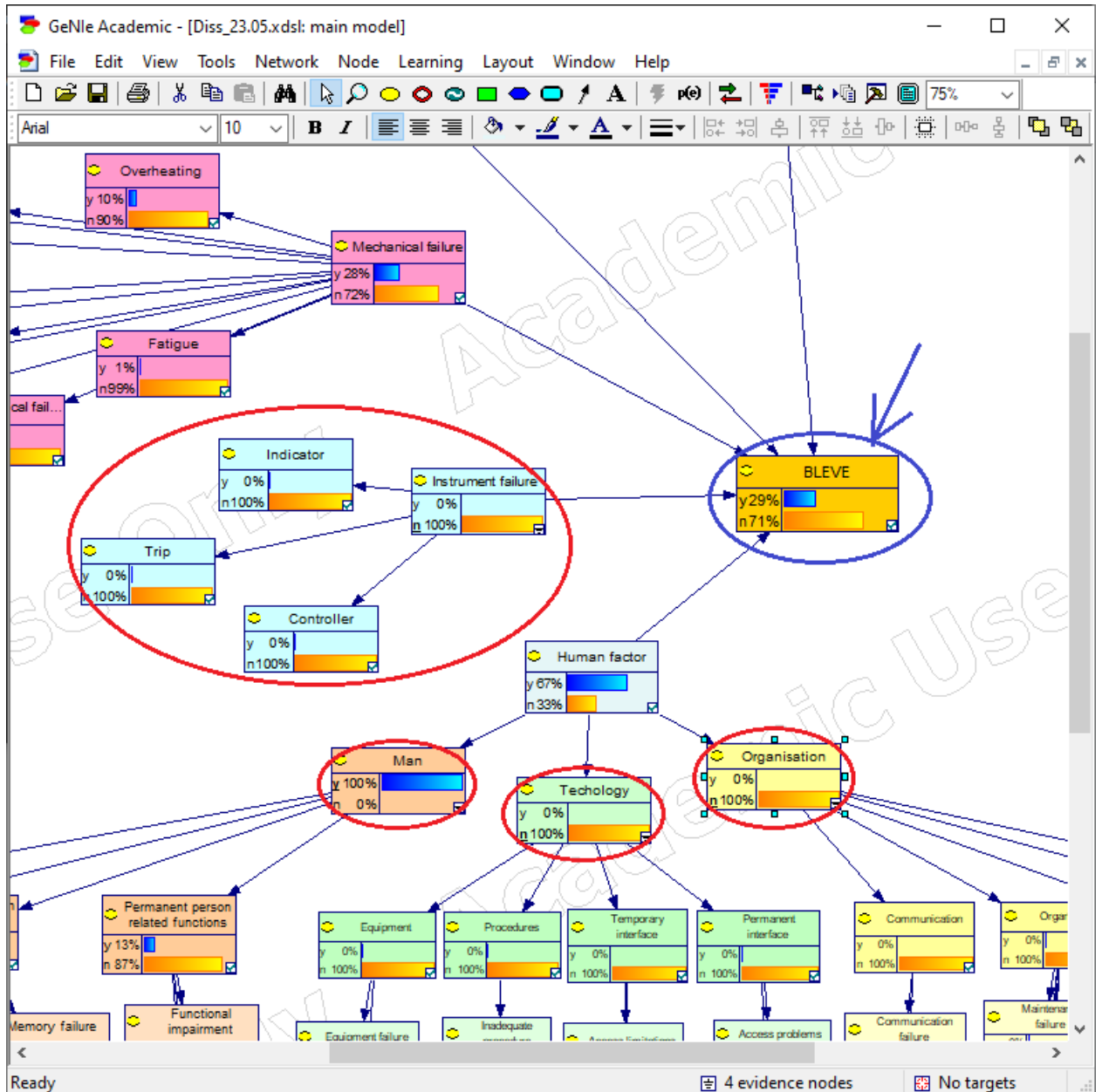


Рисунок 5.7.2 – Пример 2. Оценка риска при возникновении ошибок из группы «Man»

В ситуации, смоделированной на рисунке 5.7.2, программа автоматически пересчитала вероятность возникновения аварии, увеличив ее до 29%, относительно первоначальных 22,13%. Таким образом, можно утверждать, что согласно статистике ошибки из группы «Человек» при абсолютной исправности приборов и отсутствии других человеческих факторов в 29% случаев приводит к аварии с эффектом BLEVE.

Кроме того, при задании показанных на рисунке 5.7.2 условий меняются не только вероятности узлов «Human factor» и «BLEVE», а также вероятности всех конкретных причин ветви «Man». На рисунке 5.7.3 без каких-либо жестко закрепленных узлов в модели, видно, что программа «GeNe» ведет подсчет вероятностей узлов путем умножения вероятности возникновения родительского узла на условные вероятности узлов конкретной ветви модели, следуя по связям сети. Например, вероятность узла «Wrong time» рассчитывается программой по следующей формуле:

$$P_{\text{wrongtime}} = P_{\text{humanfactor}} \cdot P'_{\text{man}} \cdot P'_{\text{execution}} \cdot P'_{\text{wrongtime}} = \\ = 0.307 \cdot 0.5714 \cdot 0.9559 \cdot 0.2692 = 0.05 \cdot 100\% = 5\%,$$

где

$P_{\text{wrongtime}}, P_{\text{humanfactor}}$ – вероятности узлов «Wrong time» и «Human factor» соответственно,

$P'_{\text{man}}, P'_{\text{execution}}, P'_{\text{wrongtime}}$ – условные вероятности узлов «Man», «Execution» и «Wrong time» соответственно.

Значения вероятностей взяты из таблиц 5.4.1.1, 5.4.1.2 и 5.4.1.3.

Таким образом, на рисунке 5.7.4 показывается распределение вероятностей возникновения конкретных человеческих ошибок внутри группы «Man», без учета вероятностей родительских узлов. Это позволяет пользователю оценить, какие из причин возникновения аварии наиболее опасны, а какие оказывают на ситуацию наименьшее влияние.

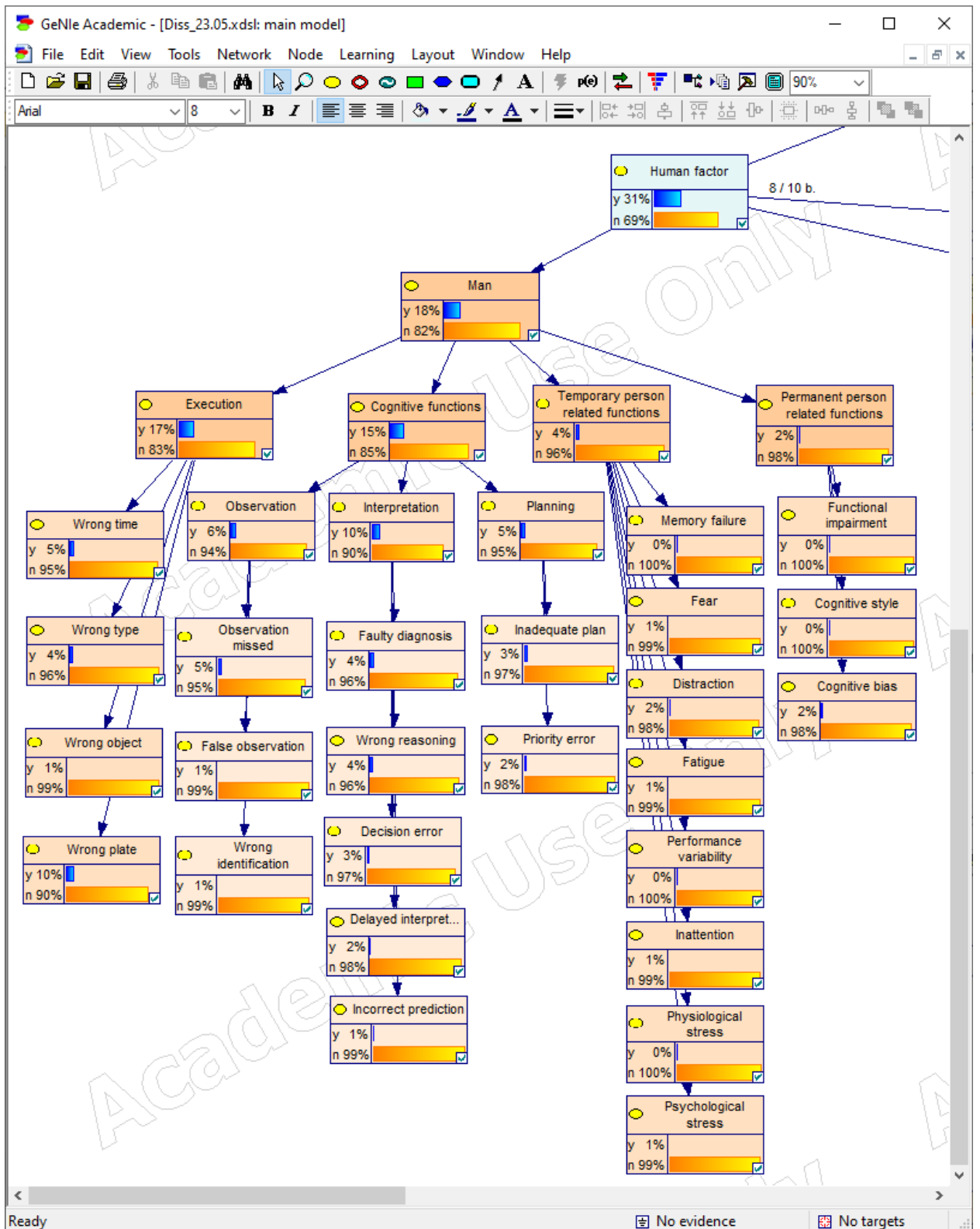


Рисунок 5.7.3 – Пример 2. Причины группы «Man» без задания жестких значений узлов

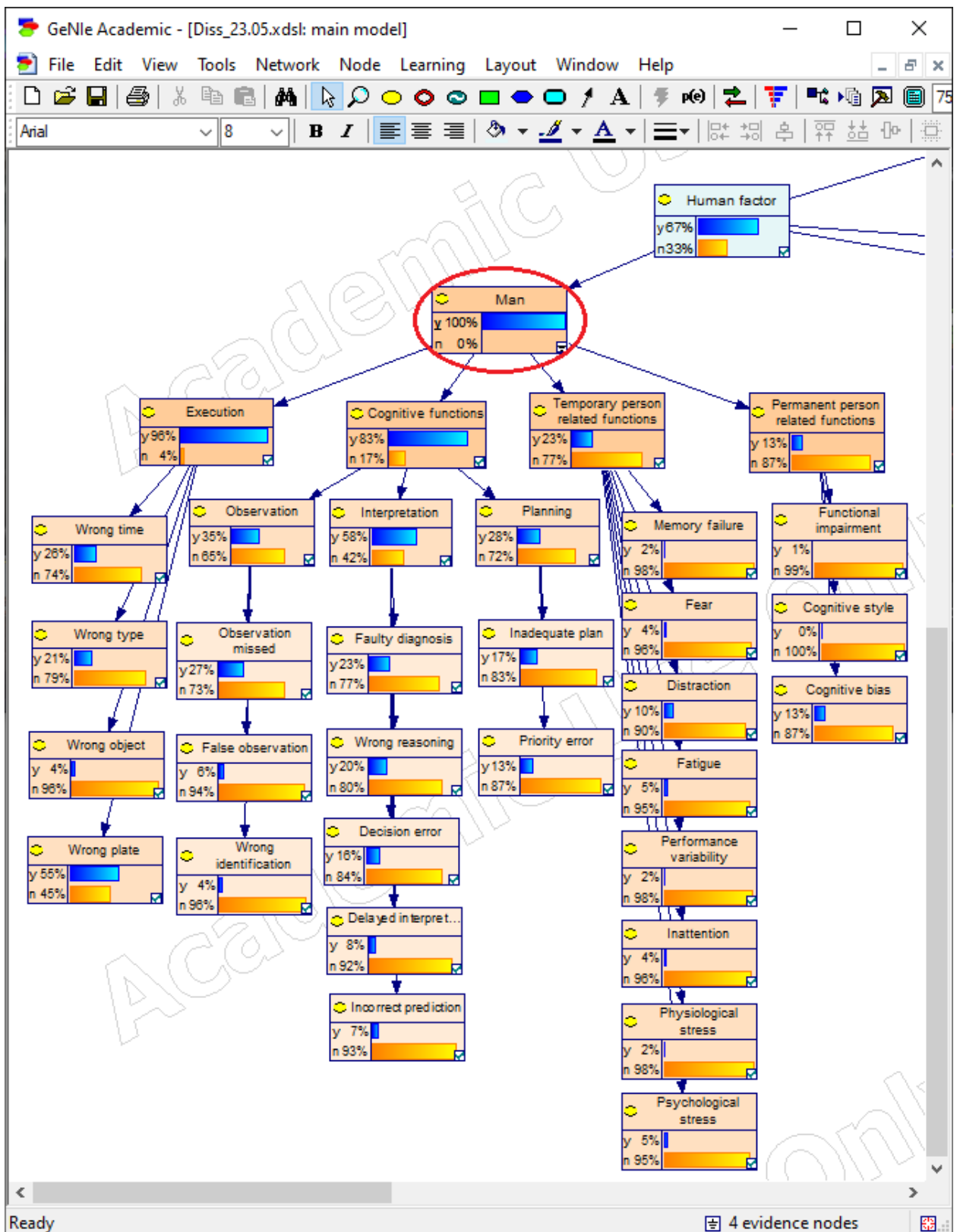


Рисунок 5.7.4 – Пример 2. Причины группы «Man»

В большем масштабе рисунки 5.7.2–5.7.4 представлены в приложении Б.

Пример 3. Оценка риска при совместном возникновении причин «Interpretation», «Fear» («Страх») и «Fatigue» («Усталость») в группе «Man»

Рассмотрена возможность задания начальных значений (установки жестких значений) вероятностей для узлов, не имеющих дочерних зависимостей («последних» в своей ветви). Предположим, что из представленных человеческих факторов в аварийной ситуации имели место одновременно три: неверная интерпретация наблюдаемой информации, страх и усталость оператора. При этом ошибок из групп «Technology» и «Organization» не наблюдалось.

На рисунке 5.7.5 видно, что вероятность узла «Human factor» увеличилась с 31% до 55%, а узла «BLEVE» – с 22,13% до 27%.

Аналогично ситуации 2, рассмотренной выше, при установке 100% вероятности в узле «Interpretation» дочерние узлы данной ветви показывают распределение вероятностей без учета родительских узлов (рисунок 5.7.6), то есть фактически отображают значения условных вероятностей, введенных в модель согласно таблице 5.4.1.3. В бóльшем масштабе рисунок 5.7.5 представлен в приложении Б.

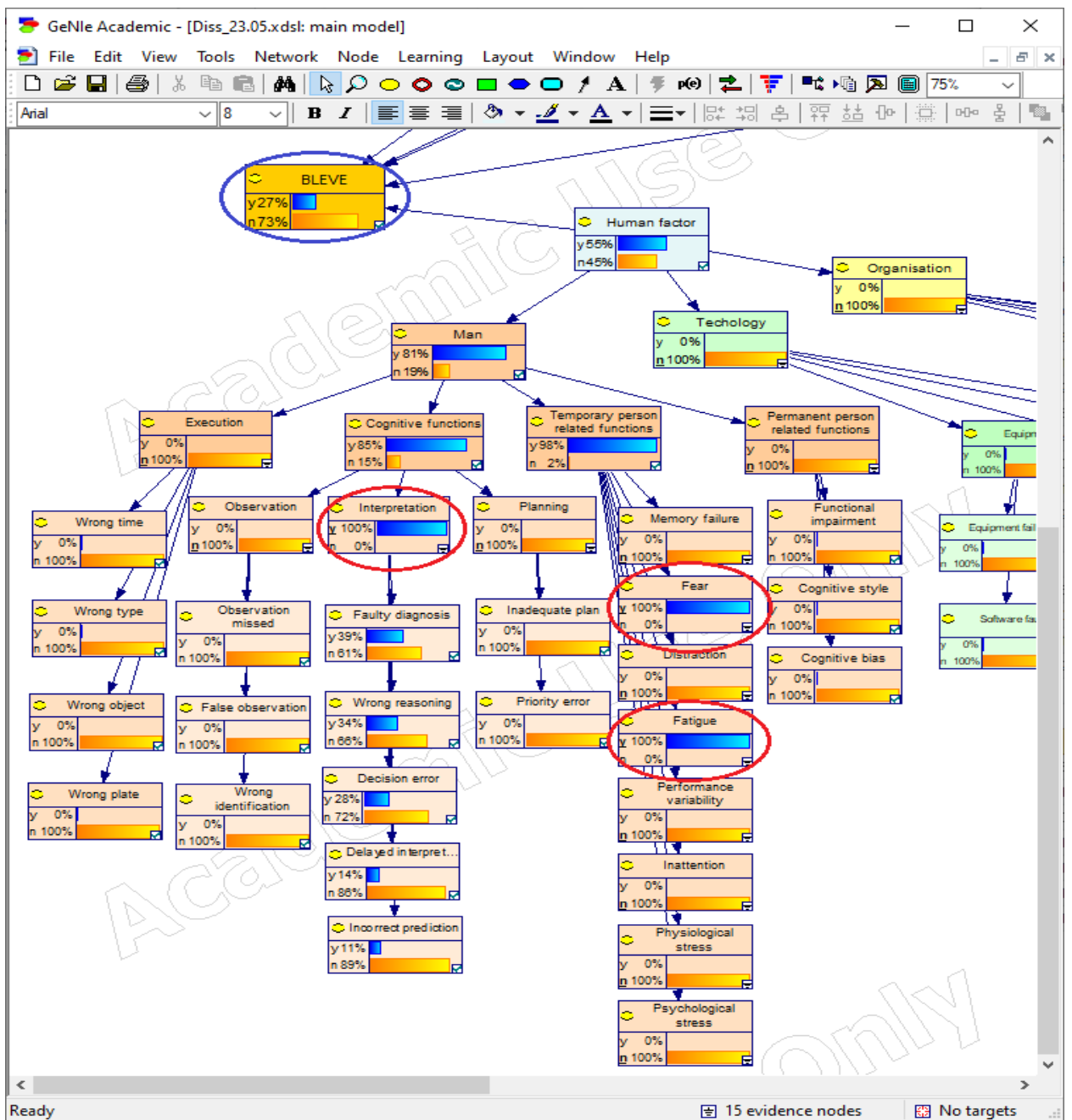


Рисунок 5.7.5 – Пример 3. Оценка риска при совместном возникновении причин «Interpretation», «Fear» и «Fatigue» в группе «Man»

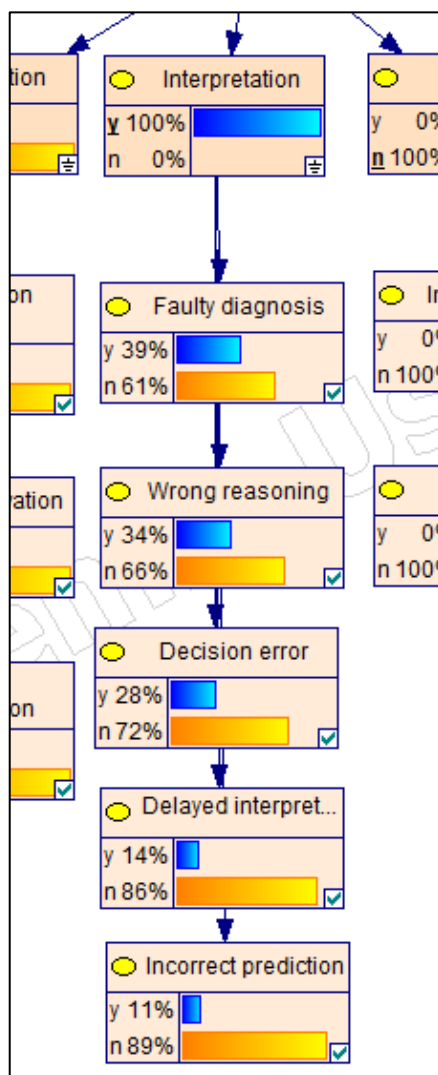


Рисунок 5.7.6 – Пример 3. Причины группы «Interpretation»

По рисунку 5.7.6 можно утверждать, что согласно статистическим данным чаще всего в данной ситуации причиной аварии с эффектом BLEVE становится неверный диагноз, поставленный оператором (39%).

5.8. Заключение к разделу 5

Разработан алгоритм моделирования оценки и прогнозирования риска ПОО с большим количеством причинно-следственных связей между событиями с использованием байесовской сети доверия, учитывающий ЧФ и развитие аварий, сопровождающихся эффектом BLEVE.

Объект исследования – ПОО хранения, переработки и транспортирования углеводородов.

Модель представляет собой БС, основанную на собранных и соответствующим образом подготовленных и структурированных для ввода в программу статистических данных. Она может применяться для анализа и оценки риска возникновения аварий на стадии проектирования/эксплуатации ПОО, выявления «слабых мест» в части причин возникновения аварий и наиболее опасных путей их развития. Алгоритм реализован в программе «GeNIeModeler».

БС позволяет оценить всевозможные варианты причин и их комбинаций, приводящих к возникновению аварии. Кроме того, модели, построенные с использованием байесовских сетей, достаточно гибки. При появлении новых исходных данных они могут включаться в построенную модель.

Следуя традиционной оценке риска, разработанная модель БС может расширить варианты определения частот возникновения инициирующих событий, условных вероятностей факторов, способствующих развитию аварий и быть дополнением к существующей нормативной оценке риска ПОО.

Итоговая модель байесовской сети представлена в приложении В.

6 Методики расчета возможных сценариев развития аварийных ситуаций при взаимодействии конструкции реактора с жидкометаллическим теплоносителем

6.1 Введение

Реакторы с жидкометаллическим теплоносителем [1] имеют хорошо известные преимущества перед распространенными водо-водяными реакторами – использование высококипящего теплоносителя позволяет ограничиться низким давлением в корпусе, повысить температуру и, соответственно, к.п.д., обеспечить замыкание топливного цикла. С точки зрения обеспечения прочности корпуса реактора давление в реакторе БРЕСТ, определяемое гидростатическим давлением свинцового теплоносителя, накладывает меньшие ограничения на конструкцию и безопасность, чем 16 МПа, обеспечивающие отсутствие кипения водяного теплоносителя при рабочей температуре в реакторе ВВЭР-1000 [2]. Однако этот факт не исключает возможности появления аварийных ситуаций, вызванных прочностными отказами (отказы, связанные с физикой реактора, неисправностями или особенностями работы автоматики, действиями персонала здесь не рассматриваются). Возможность появления таких ситуаций определяется несколькими факторами:

- высокой (по сравнению с водо-водяными реакторами) температурой теплоносителя;
- возможностью появления не только высоких температур, но и высоких перепадов температур, например, в деталях в области границы раздела «жидкий теплоноситель – газ над ним»;
- высоким давлением во 2-м контуре;
- реакционной способностью и пожароопасностью натриевого теплоносителя (теплообменники «натрий 1-го контура – вода 2-го контура», трубопроводы транспортировки натрия) в реакторах БН;
- взаимодействием металла конструкций с теплоносителем (свинец-висмутовый сплав в БРЕСТ);
- возможностью расширения теплоносителя при аварийном расхолаживании и застывании – сплав свинец-висмут является одним из тех редких веществ (наряду с водой), объем которых в твердом состоянии может быть больше, чем в жидком.

Ниже рассмотрены особенности расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом некоторых из этих факторов.

6.2 Особенности оценки механизмов деформирования деталей

Циклическое нагружение конструкций в условиях нормальной эксплуатации сопровождается накоплением повреждений, что может влиять на диаграммы деформирования материала и должно быть учтено в расчетах аварийных ситуаций. Накопление повреждений зависит от сочетания размахов и приращений деформаций в цикле (пример экспериментального определения такой зависимости приведен в работе [3]). При этом накопленные повреждения влияют не только на параметры разрушения (удлинение и поперечное сужение при разрыве), но и на вид диаграммы деформирования: накопление деформаций в цикле существенно сказывается на процессах циклического упрочнения и разупрочнения.

Расчет накопления деформаций за цикл – при использовании современных численных подходов – имеет ряд методических особенностей, которые обсуждаются ниже на примере элемента конструкции, типового для реакторов с жидкометаллическим теплоносителем – цилиндрической оболочки, подвергающейся циклическим нагревам и охлаждениям вследствие изменения уровня теплоносителя.

Рассмотрим цилиндрическую оболочку, нижняя часть которой контактирует с горячим теплоносителем (рисунок 6.1а), уровень которого циклически меняется. Изменение уровня вследствие изменения объема теплоносителя, вызванного изменением температуры при смене режима, является типовой ситуацией для быстрых реакторов со свинцовым или натриевым теплоносителем [1, 4]. Анализ этой задачи посвящен ряд работ – см., например, работы [5-7]. Недостатком этих работ является то, что авторы в одном понятии «gatcheting» смешивают накопление деформаций вследствие особенностей поведения материала (циклической и термической ползучести) и накопление деформаций по механизму прогрессирующего формоизменения. Экспериментальному изучению и математическому моделированию термической и циклической ползучести посвящено большое число работ. Рассмотрим влияние и особенности учета второго фактора – прогрессирующего формоизменения.

В качестве методического примера для численных расчетов рассматривалась цилиндрическая оболочка из стали 12X18H10T с наружным диаметром 84 мм и толщиной стенки 2 мм. Оболочка спускается в расплавленный натрий с температурой 500°C (773K); нижний конец оболочки закрыт, и жидкость контактирует только с внешней поверхностью оболочки. Следуя работе [8], коэффициент теплоотдачи от расплавленного металла к стенке оболочки был принят равным 15 кВт/м²К, от стенки оболочки к воздуху – 25 Вт/м²К (эффективный коэффициент теплоотдачи, приблизительно описывающий в

рассматриваемых условиях комбинированный эффект конвекции и излучения). Предполагается, что материал является циклически стабильным (стабилизированным), эффекты циклической ползучести отсутствуют.

Движение оболочки вниз (или, что то же самое, изменение уровня жидкости вверх) создает в оболочке движущееся квазистационарное тепловое поле. Распределение температур рассчитывалось методом конечных элементов (программа ANSYS) с 2-мерными осесимметричными 4-узловыми элементами; размер элемента был достаточно мал, чтобы обеспечить слабую зависимость результатов расчета от этого размера (не более 1/8 толщины стенки). Длина моделируемой оболочки была достаточной для получения квазистационарного поля вне зоны краевых эффектов – не менее $7(Rh)^{1/2}$ (R и h – радиус средней поверхности и толщина стенки оболочки). Опускание оболочки в расплавленный натрий моделировалось ступенчатым изменением граничных условий с помощью специально написанного макроса на языке APDL. Временной шаг расчетов соответствовал перемещению границы раздела сред на длину одного конечного элемента. На рисунке 6.1б показаны рассчитанные распределения температуры по длине оболочки для одного момента времени (квазистационарное движущееся поле вдали от краев оболочки). Линии на рисунке 6.1б показывают температуры на внутренней и внешней поверхностях оболочки для двух разных скоростей 5 и 10 мм/с. Кинетика напряжений и неупругих деформаций анализировалась с использованием одной и той же сетки из 2-мерных осесимметричных 4-узловых элементов. Модель была зафиксирована в осевом направлении только в одной точке, чтобы гарантировать свободу теплового расширения. Охлаждение трубы после быстрого извлечения из расплава предполагалось равномерным, т.е. не вызывающим термических напряжений.

При определенных условиях циклические прохождения тепловой волны могут вызывать накопление деформации (и смещения) в конструкции с числом циклов [9]. Разница значений температуры (рисунок 6.1б) для рассмотренных скоростей невелика, однако расчет кинетики неупругой деформации показывает, что накопление смещений (изменение диаметра оболочки) на разных скоростях имеет разные знаки (рисунок 6.2).

Эта ситуация вызвана тем, что напряжения в цилиндрических оболочках зависят от второй производной температуры по длине [10], а не от температуры или температурного градиента (как обсуждалось, например, в работе [6]). Незначительные видимые различия в температурах (рисунок 6.1б) соответствуют существенно разным вторым производным (рисунок 6.3). В этих условиях моделирование или испытания [5] на ограниченном количестве режимов нагрузки не позволяют предсказать поведение конструкции при

произвольной нагрузке. Расчетное обоснование надежности и безопасности требует при этом рассмотрения всего диапазона возможных скоростей.

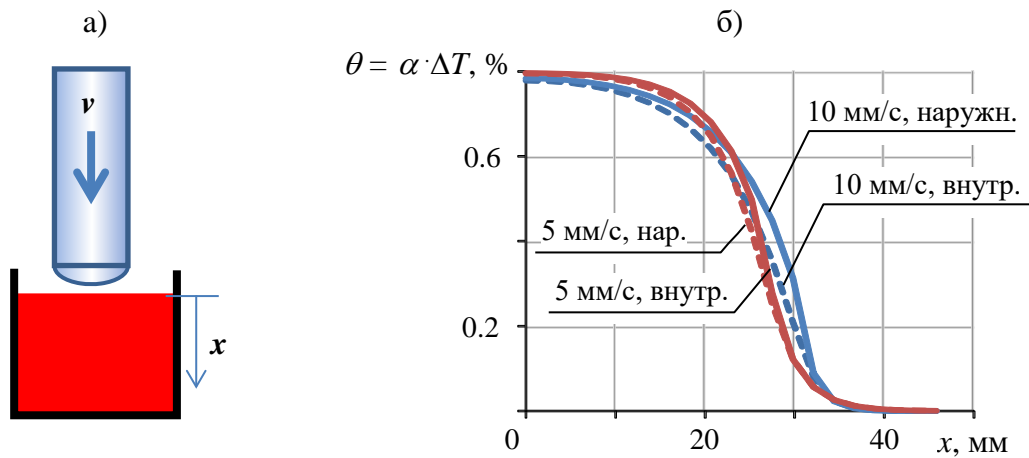


Рисунок 6.1 – Опускание оболочки в горячий теплоноситель: а) схема; б) расчетные распределения температур вдоль оси оболочки (на внутренней и наружной поверхностях, при различных скоростях перемещения)

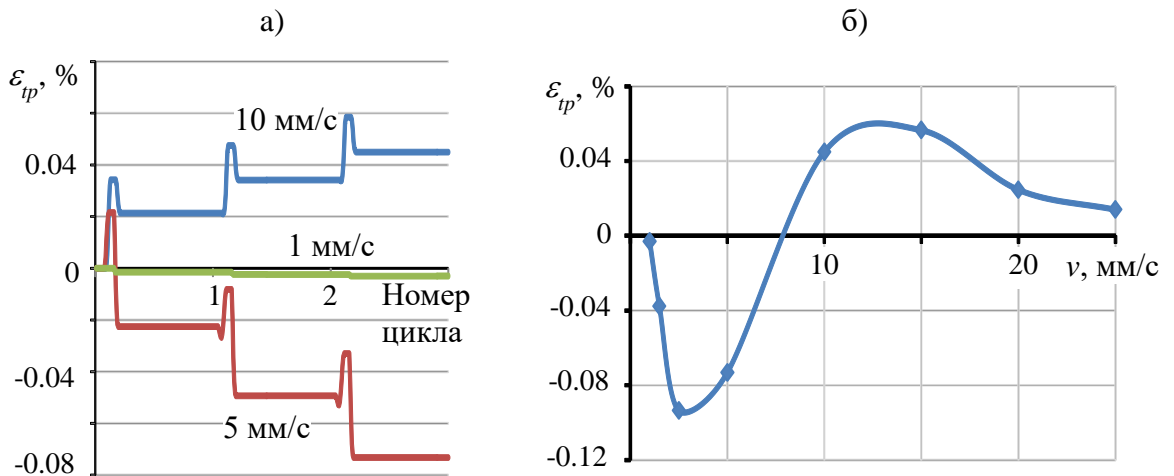


Рисунок 6.2 – Накопление окружной пластической деформации с числом циклов: а) поцикловая кинетика деформаций при различных скоростях оболочки; б) деформация, накопленная за 3 цикла

Отметим, что с точки зрения описания режимов работы установки в рассмотренной задаче менялся лишь один параметр – скорость изменения уровня теплоносителя. Изменение этого параметра приводит к немонотонному (вплоть до изменения знака) изменению реакции конструкции; при этом с точки зрения возможности продолжения эксплуатации конструкции знак изменения диаметра может оказаться критическим

(заклинивание сопряженных деталей и т.п.). Кроме того, знак накопленной деформации – при одной и той же величине деформации – существенно влияет на накопление повреждений и диаграмму деформирования при «доломе» – в аварийной ситуации.

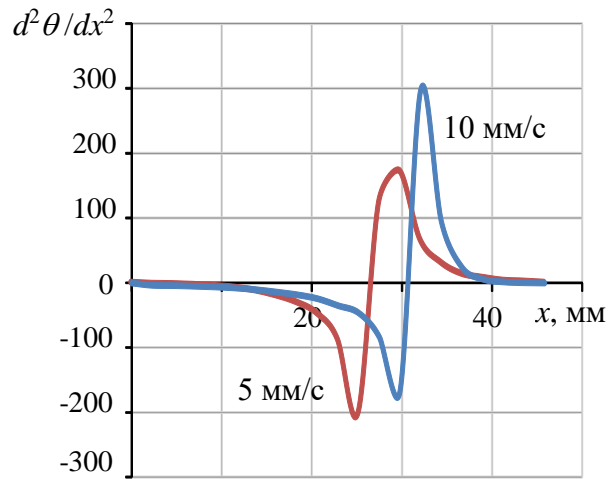


Рисунок 6.3 – Вторая производная от тепловой деформации по длине (на наружной поверхности оболочки)

6.3 Учет особенностей поведения материала

Испытания показывают, что диаграммы деформирования в аварийных условиях могут существенно отличаться от диаграмм, получаемых при стандартных (регламентируемых ГОСТ) испытаниях. Большие скорости деформирования, сопровождающие процессы разрушения (быстрого движения трещин или быстрого движения фрагментов конструкции), вызывают обычно повышение прочности и некоторое уменьшение пластичности, изучению этих эффектов посвящено большое число работ. Однако для высокотемпературных реакторов с жидкометаллическим теплоносителем может быть характерен специфический вид аварийной ситуации: относительно медленное (вследствие большой теплоемкости теплоносителя) повышение температуры выше расчетной, возможно – с одновременным ростом механической нагрузки.

Пример диаграммы деформирования материала в подобных условиях показан на рисунке 6.4, где приведены условные диаграммы деформирования стали 09Г2С при низкой скорости деформирования и температуре 700°С, превышающей рабочую температуру для этого материала. Характер диаграмм – практически отсутствующий участок упрочнения и выраженная «падающая» ветка – принципиально отличается от диаграмм стали 09Г2С при температурах до 400°С. Отметим, что прогноз изменения механических характеристик с

температурой, который может быть сделан по справочным данным при рабочих температурах, вовсе не предвещает подобной ситуации – до температуры 700°C относительная разница между пределом текучести и пределом прочности сохраняется (рисунок 6.5). Аналогичный вид имеют и, например, диаграммы деформирования молибденовых сплавов для высокотемпературных конструкций.

Качественно объяснить наблюдаемый характер диаграммы несложно: если истинная диаграмма деформирования материала характеризуется малым модулем упрочнения, то геометрическая нелинейность (образование шейки) обязательно будет приводить к появлению «падающего» участка на условной диаграмме деформирования (параметры которого, естественно, зависят от формы и размеров образца). Однако количественное описание встречает определенные трудности. Достаточно сказать, что различие диаграмм при разных скоростях деформирования (рисунок 6.4) наводит на мысль о роли ползучести (так называемой «секундной» ползучести при рассматриваемых временах). Однако обычные описания ползучести, например, широко используемая модель Нортона

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_c, \quad \frac{d}{dt} \varepsilon_c = C \sigma^n \quad (6.1)$$

где

ε – полная деформация,

ε_e – упругая деформация,

ε_p – пластическая деформация,

ε_c – деформация ползучести,

σ – напряжение,

C и n – константы материала,

описывают изохронные кривые с упрочнением. Это повышает устойчивость деформирования и затрудняет подбор описания материала (рисунок 6.6). Тем не менее, описание «истинной» диаграммы деформирования и параметры модели ползучести материала могут быть подобраны так, чтобы обеспечить близость наблюдаемой в эксперименте условной диаграммы деформирования образца и диаграммы, получаемой МКЭ-расчетом для этих условий.

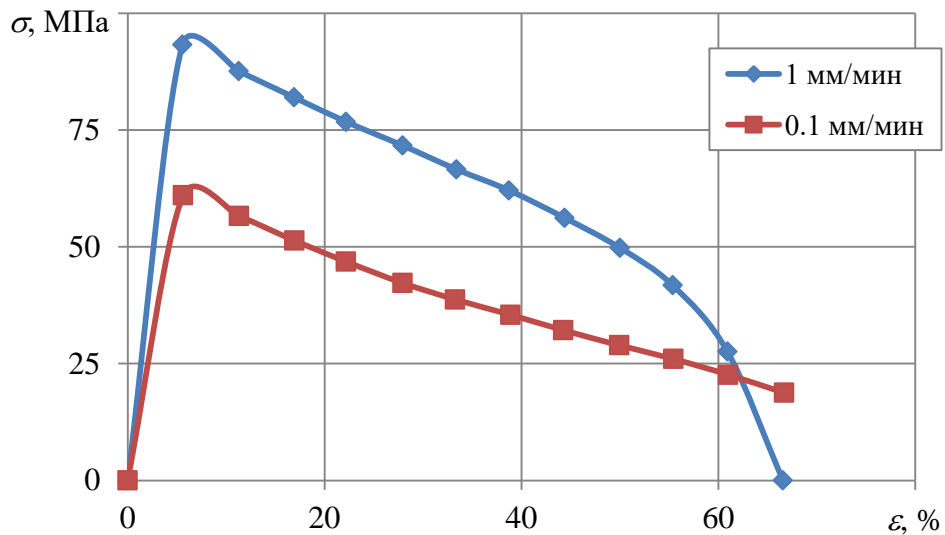


Рисунок 6.4 – Условные диаграммы деформирования стали 09Г2С при двух разных скоростях перемещения захватов

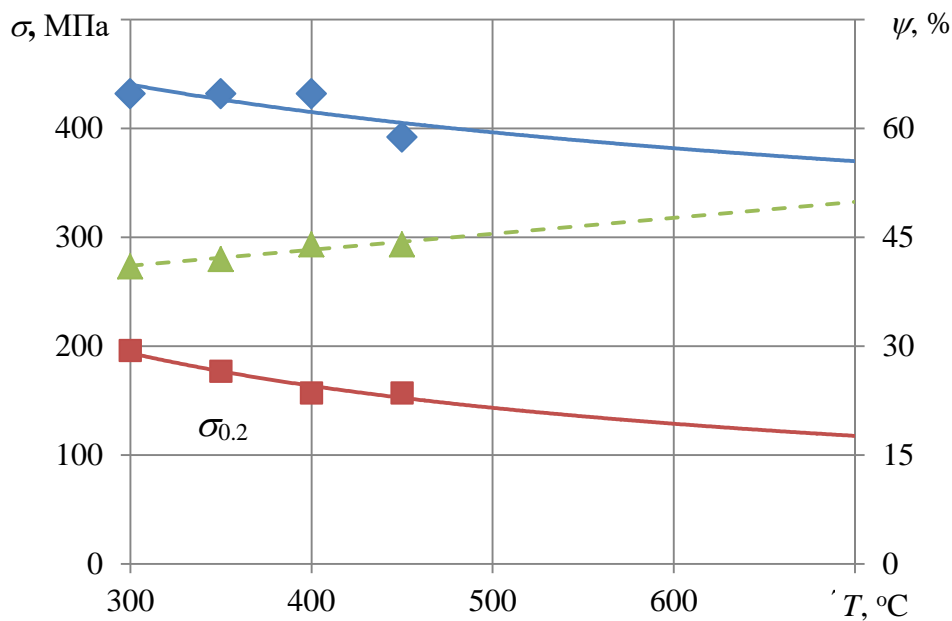


Рисунок 6.5 – Справочные механические характеристики стали 09Г2С при рабочих температурах (символы) и их степенная экстраполяция на 700°C (линии)

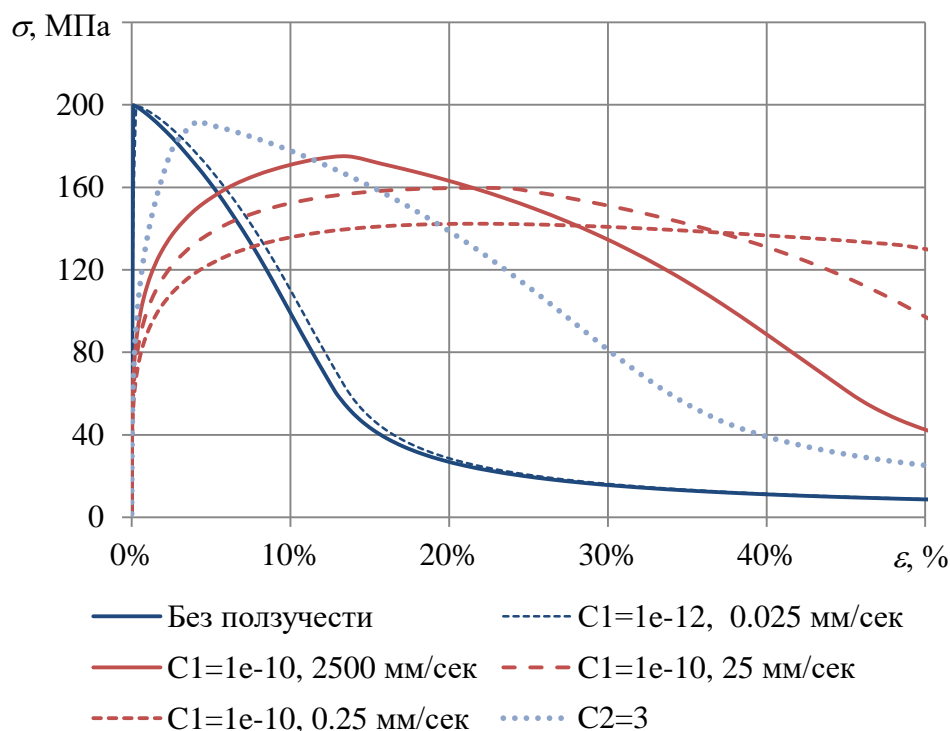


Рисунок 6.6 – Условные диаграммы деформирования образцов, полученные конечно-элементным расчетом с учетом геометрической нелинейности. Истинная диаграмма деформирования материала полагается идеально упруго-пластической ($\sigma_T = 200$ МПа). Показаны диаграммы для различных значений скорости перемещения захвата и константы C в формуле Нортона (во всех случаях $n = 4$)

Наличие «падающего» участка на условной (а в некоторых случаях – и на истинной) диаграмме деформирования существенно влияет на поведение конструкций. Рассмотрим, например, трубки теплообменника реактора с жидкометаллическим теплоносителем в 1-м контуре и водой под давлением во 2-м – рисунок 6.7 (традиционная схема для реакторов серии БН, БРЕСТ и др.). Температура стенок трубок T_2 примерно равна среднему арифметическому температур теплоносителя 1-го контура и охлаждающей воды, а температура корпуса T_1 близка к температуре теплоносителя 1-го контура. Таким образом, $T_2 < T_1$ и трубки на режиме нормальной эксплуатации оказываются растянутыми.

Нормы расчета на прочность, как российские [12], так и американские [13], выделяют тепловые напряжения в отдельную категорию, учитываемую только при вычислении размахов напряжений и оценке усталостной долговечности. Такой подход основан на соображениях, что тепловая деформация невелика по сравнению с ресурсом пластичности материала (для традиционно используемых в этих конструкциях высокопластичных сталей), т.е. при однократном нагружении нагрев (охлаждение) не может привести к исчерпанию ресурса пластичности и разрушению. Это совершенно верно для упрочняющихся материалов, но оказывается неверным для материалов с диаграммой

деформирования типа показанной на рисунке 6.4. Образование утонения в одном (произвольном) месте образца при недостаточном упрочнении материала создает эффект «положительной обратной связи»: накопление деформаций в этом месте ускоряется. Для этого истинная диаграмма деформирования не обязательно должна иметь «падающий» характер – достаточно, чтобы упрочнение было малым (хотя и положительным).

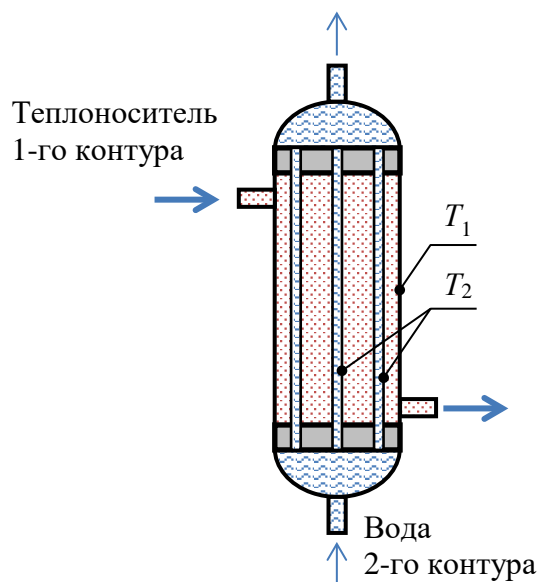


Рисунок 6.7 – Теплообменник (схема)

На рисунке 6.8 приведены результаты расчета охлаждения стержня с двумя зашеченными концами. Истинная диаграмма деформирования материала такова, что расчетная условная диаграмма соответствует рисунку 6.4. Эта диаграмма близка к диаграмме с линейным упрочнением, модуль упрочнения $E_t \approx 100$ МПа (положительный). По горизонтальной оси отложена разность температур (аналогичная $T_1 - T_2$ на рисунке 6.7), по вертикальной – максимальная пластическая деформация в образце. Числа у кривых – отношение поперечного сечения стержня к длине. Для сравнения: тепловая деформация при $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ составляет всего 0.15%.

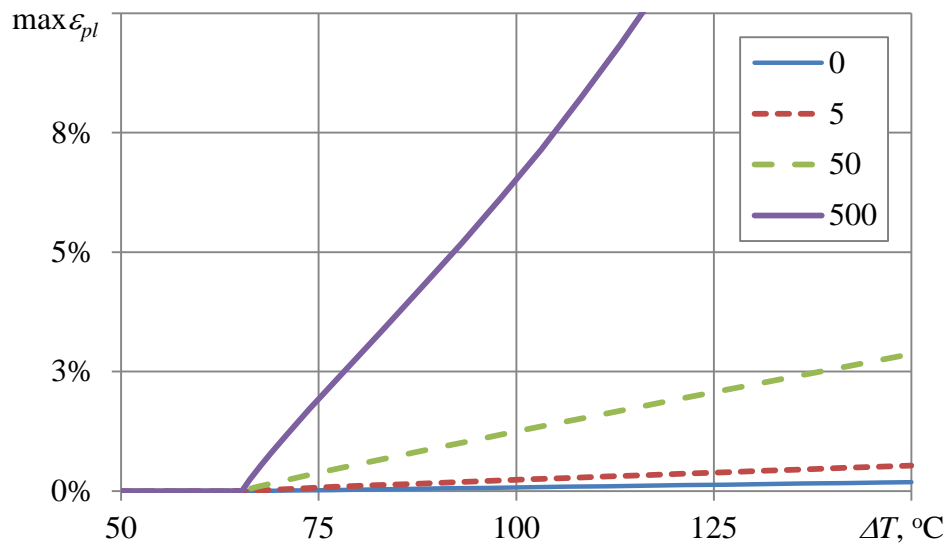


Рисунок 6.8 – Максимальные пластические деформации в охлаждаемом защемленном стержне из материала с малым упрочнением

Зависимость отношения максимальной деформации к тепловой от отношения длины стержня к поперечному размеру показана на рисунке 6.9.

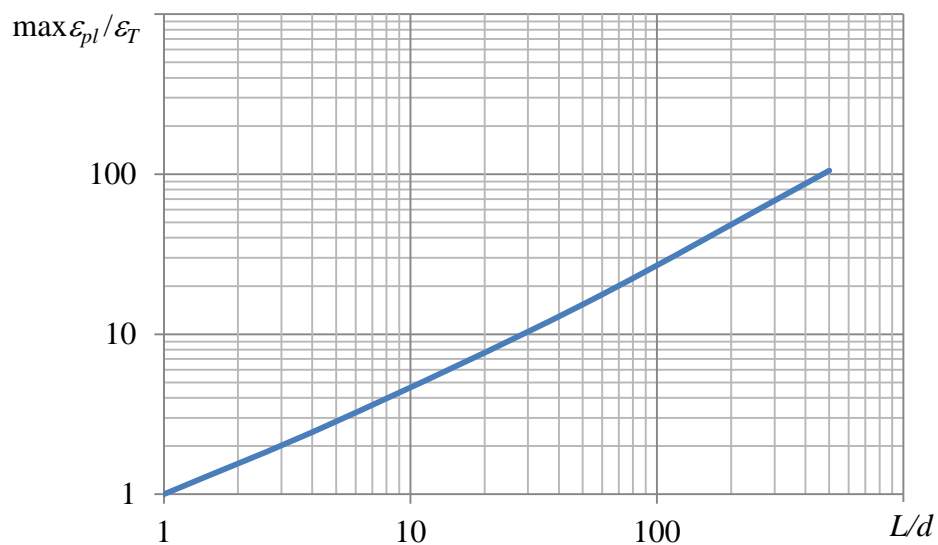


Рисунок 6.9 – Зависимость отношения максимальной деформации к тепловой от отношения длины стержня к поперечному размеру

Следует учесть, что в реальных теплообменниках длины трубок измеряются метрами, а в качестве поперечного размера следует рассматривать толщину стенки трубки – единицы миллиметров. Таким образом, отношение длины трубки к характерному поперечному размеру в реальных теплообменниках измеряется тысячами, и в соответствии

с рисунком 6.9, максимальная деформация может в сотни раз превышать тепловую. Получаемая деформация даже при относительно небольших перепадах температур ($T_1 - T_2$) – на уровне, скажем, 30°C – будет достигать уровня 5%, т.е. той величины, которая нормами [13] (и проектами обновленных отечественных норм) рассматривается как опасная (с учетом малого упрочнения при таких деформациях и необходимости иметь определенный запас по нагрузке и деформации).

Рассмотренный фактор должен быть принят во внимание при проектировании. Обеспечение безопасности эксплуатации, в том числе на аварийных режимах, может быть либо подбором материала с достаточным деформационным упрочнением на всех режимах, либо конструктивными мерами (разгрузкой элементов конструкции от тепловых напряжений за счет компенсаторов теплового расширения). Показанные выше расчеты иллюстрируют необходимые (и не выполняемые сейчас) проверки.

6.4 Механизмы разрушения и моделирование аварийных ситуаций

Одной из гипотетических аварий, которые должны быть рассмотрены для обоснования безопасности реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем, является разрыв трубок теплообменника. Этот разрыв может сопровождаться химической реакцией (натрий–вода в теплообменниках БН). Однако даже при использовании свинцового теплоносителя, не реагирующего химически с водой, этот разрыв может сопровождаться значительным выделением энергии: давление жидкометаллического теплоносителя 1-го контура значительно ниже, чем давление вода в трубках теплообменника (высокое для исключения кипения воды), поэтому разрыв трубок будет сопровождаться вскипанием воды, образованием пара и значительными реактивными силами. Эти силы способны вызвать движение трубки, ее удар по соседним и лавинное развитие аварии.

С другой стороны, жидкометаллический теплоноситель создает значительное сопротивление движению разорванной трубки – в силу своей вязкости и плотности. Таким образом, вопрос о возможности лавинного развития аварии остается открытым и требует аккуратного исследования.

Исследование предлагается выполнять путем математического моделирования. При этом возникает ряд сложностей:

- моделирование разрушения стенки трубы (выбор адекватного критерия разрушения и способа описания распространения трещины),

- описание поведения воды в широком диапазоне давлений и температур с учетом возможности изменения фазового состояния,
- расчет динамического поведения системы, состоящей как из деформируемых твердых тел, так и взаимодействующей с ними жидкости (газа).

Для преодоления этих сложностей построена вычислительная модель в программе LS-DYNA. Расчеты выполняются в явной динамической постановке. Схема модели, использованная на этапе отладочных расчетов, показана на рисунке 6.10 (она аналогична схеме испытательной установки, описанной в работе [14]). Для наглядности, важной на этапе отладки, и сокращения времени счета, в модель включены фрагменты только 3 соседних трубок, а расстояние между трубками увеличено по сравнению с расстоянием в реальных теплообменниках. Стенки трубок как деформируемые твердые тела моделируются с использованием подхода Лагранжа (сетка конечных элементов связана с материальными точками и деформируется вместе с телом), жидкости и газ (пар) – с использованием подхода Эйлера (сетка КЭ неподвижна в пространстве, материал перетекает из одного элемента в другой). Использована специальная технология «связывания» сеток, исключая протекание жидкостей через стенку трубы – включая ситуацию, когда стенка движется под действием реактивной силы, создаваемой вытекающим через разрыв в стенке теплоносителем.

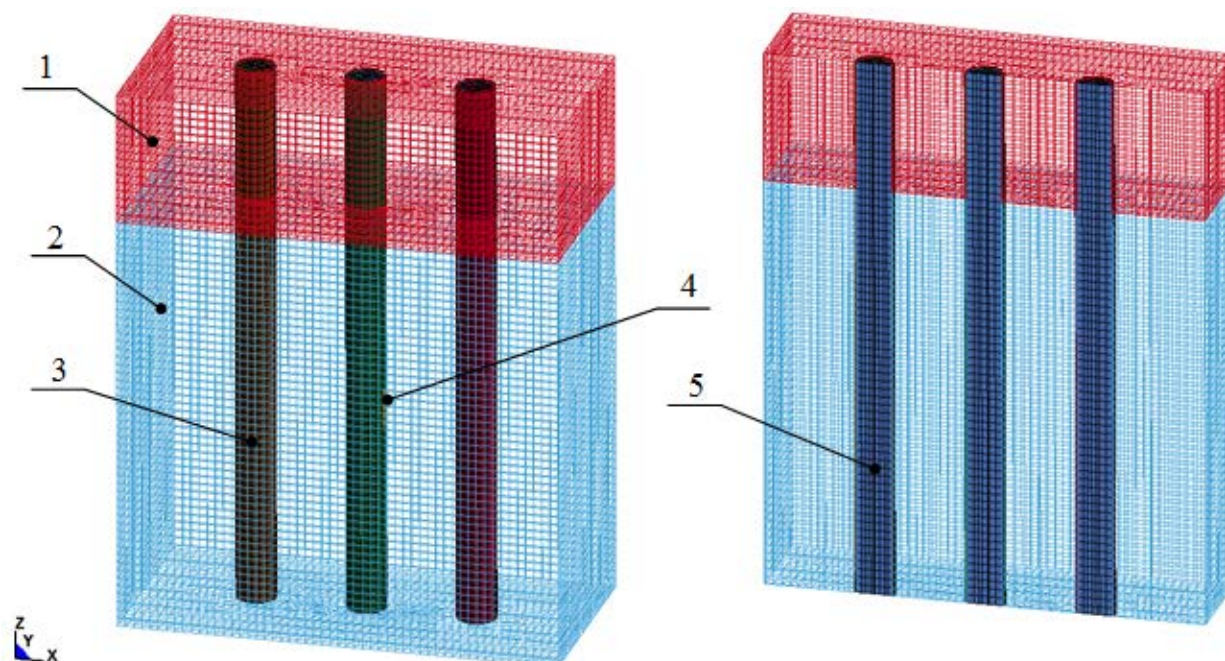


Рисунок 6.10 – Конечно-элементная модель. 1 – инертный газ, 2 – жидкий свинец, 3 – стенка трубки теплообменника, 4 – часть стенки для инициирования разрушения, 5 – вода

Разрушение стенки трубки теплообменника моделируется как чисто вязкое, без использования подходов механики разрушения – такой подход для рассматриваемых материалов и толщин стенок допускается п. 5.8.1.9 Норм [12]. Моделирование трубки в начальном (ненапряженном) состоянии и задание давления заполняющей трубку воды приводят к тому, что на старте расчета происходит расширение трубки – соответствующее напряжениям от внутреннего давления. Это расширение сопровождается осцилляциями. Для подавления осцилляций и перехода к установившемуся состоянию, после которого начинается расчет разрушения, приходится выполнять расчет поведения системы в течение некоторого (начального) отрезка времени с искусственно введенным демпфированием; последующий расчет разрушения выполняется при отключенном искусственном демпфировании (вязкость жидких сред и их инерция, естественно, учитываются в расчете).

После достижения установившегося состояния имитируется разрушение трубки по дефекту, для чего удаляется несколько конечных элементов (выноска «4» на рисунке 6.10). Дальнейшее деформирование сопровождается появлением неупругих деформаций и развитием разрушения. Для описания неупругого деформирования и вязкого разрушения материала используется модель Джонсона-Кука с критерием разрушения, учитывающим жесткость напряженного состояния (по Колмогорову). Параметры модели взяты из работы [15]. Развитие трещин моделируется исключением из расчета («удалением») конечных элементов, в которых выполнен соответствующий критерий разрушения.

Описание свойств свинцового теплоносителя взято из базы данных [16]. Для описания воды использованы уравнения состояния (зависимость «давление – изменение объема») в табличной форме, что позволяет описать фазовые превращения «вода – пар»: вскипание воды при снижении давления (попадание воды из трубки, где вода находилась под давлением 18 МПа, в расплав свинца с давлением, близким к атмосферному), появление паровых пузырей, разную сжимаемость жидкой воды и пара. Характеристики сжимаемости жидкой воды и пара при адиабатическом сжатии взяты из общедоступных справочников.

Некоторые результаты иллюстрируют рисунки 6.11–6.14.

На рисунке 6.11 показано развитие разрушения в стенке трубки: прямолинейное распространение трещины в меридиональном направлении до достижения трещиной некоторой длины, затем – ветвление и раскрытие. При рассматриваемых параметрах длина прямолинейного участка составила около 1 диаметра трубки.

На рисунке 6.12 показано моделирование истечения воды (пара) через разрушенную стенку трубки в один из моментов времени. Истечение приводит к снижению давления в трубке в окрестностях трещины (рисунок 6.13) и остановке разрушения – трещина не достигает большой длины, как это иногда наблюдается в магистральных нефте- и

газопроводах. Выход пара из разрушенной трубки сопровождается появлением волн на поверхности раздела «свинец–инертный газ» – рисунок 6.14.

Реактивная сила, вызываемая истекающей водой, приводит в движение разрушенную трубку и теоретически может вызвать лавинное развитие аварии в виде последовательного разрушения трубок – рисунок 6.15. Однако в рассмотренной модели при наличии свинцового теплоносителя, обеспечивающего демпфирование за счет не только вязкости, но и высокой плотности, лавинного развития аварии не наблюдалось – трубки (за исключением дефектной) не разрушаются.

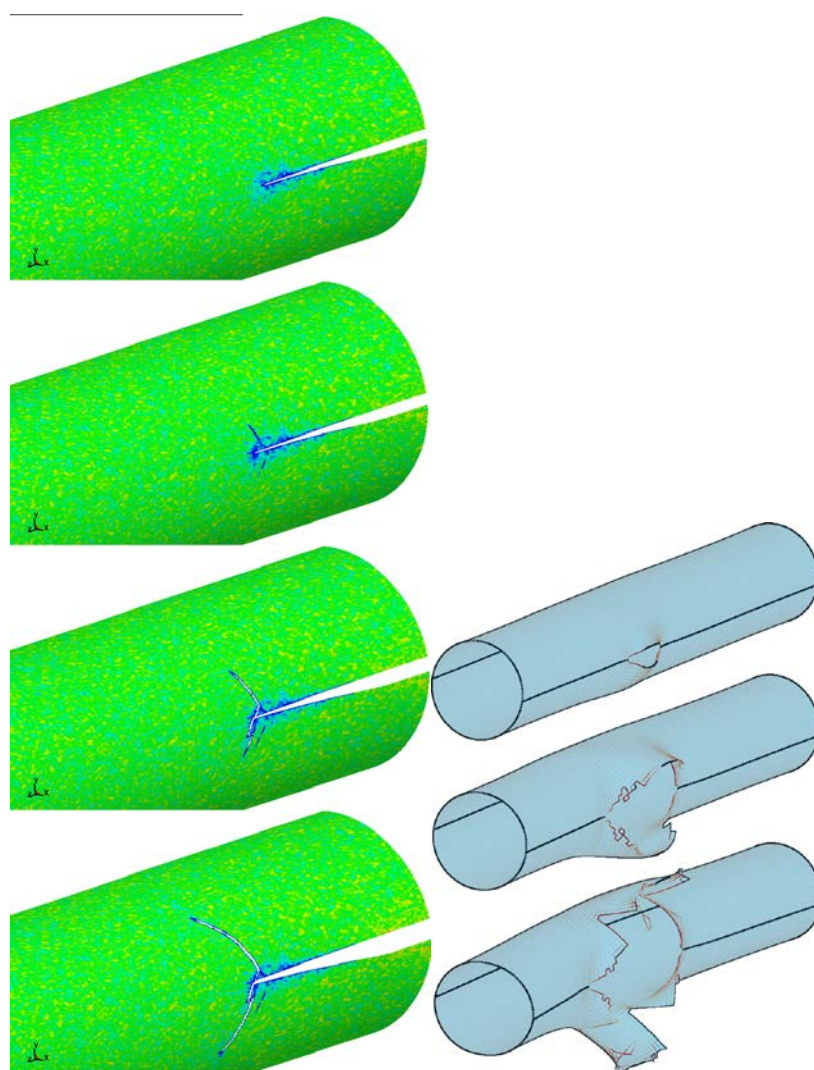


Рисунок 6.11 – Ветвление трещины в стенке трубки теплообменника

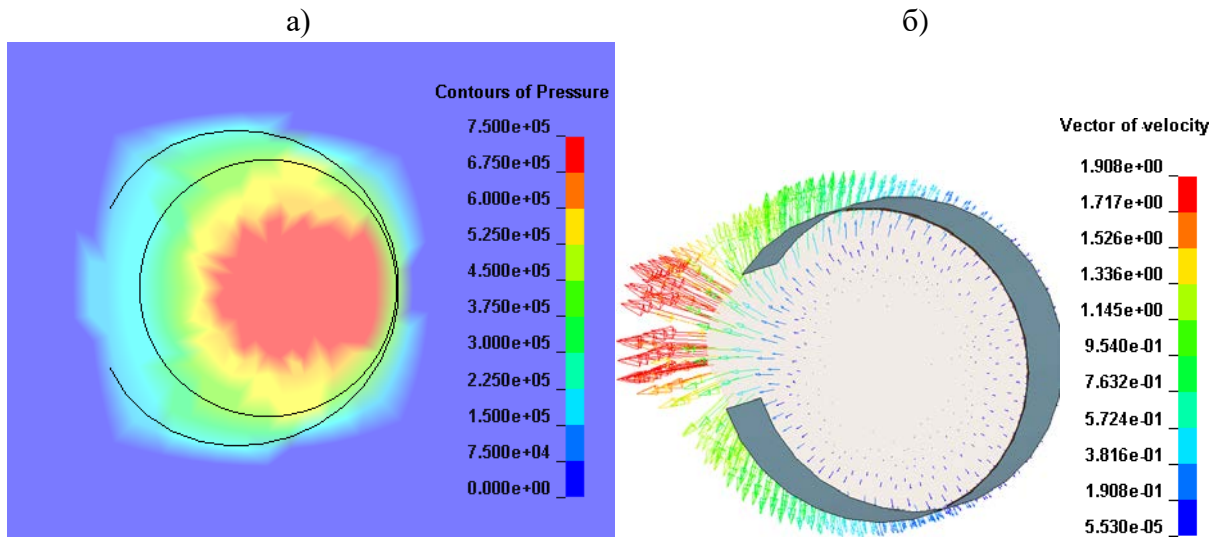


Рисунок 6.12 – Моделирование истечение воды и пара из разрушенной трубы:
 а) распределение давлений; б) распределение скоростей

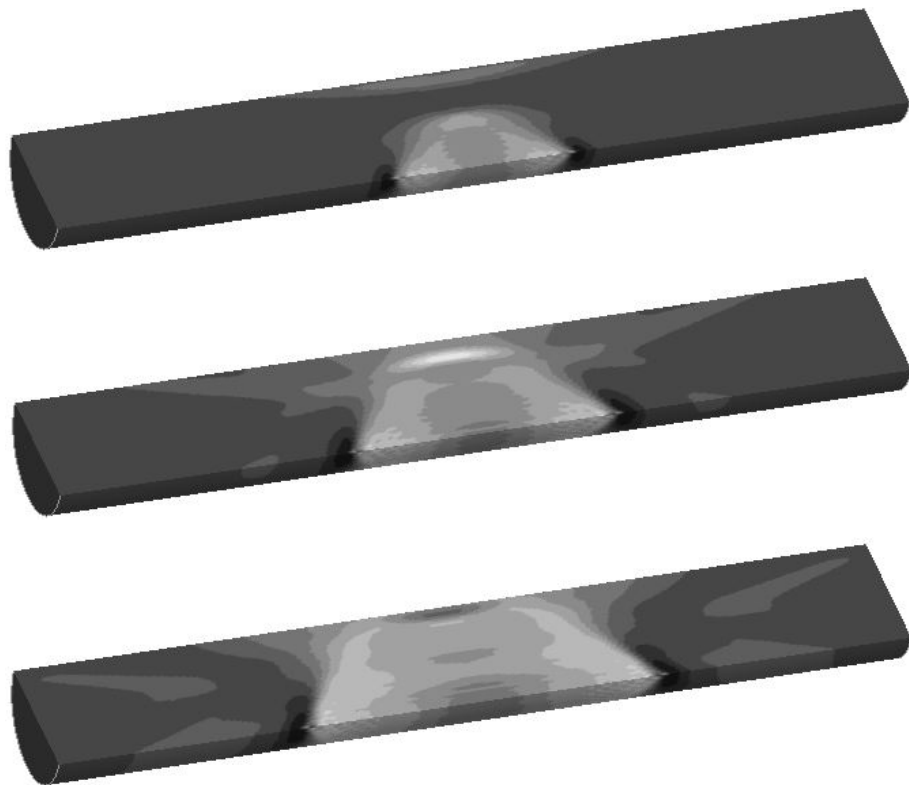


Рисунок 6.13 – Волна снижения давления в трубке (интенсивность закрашки пропорциональна давлению)

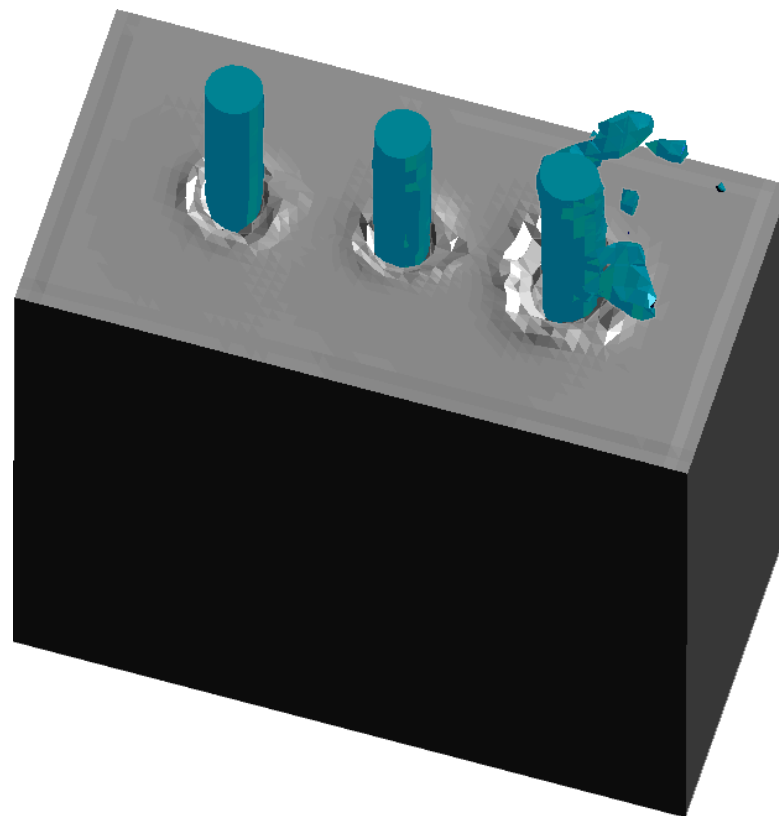


Рисунок 6.14 – Вода, пар и жидкометаллический теплоноситель в один из моментов времени

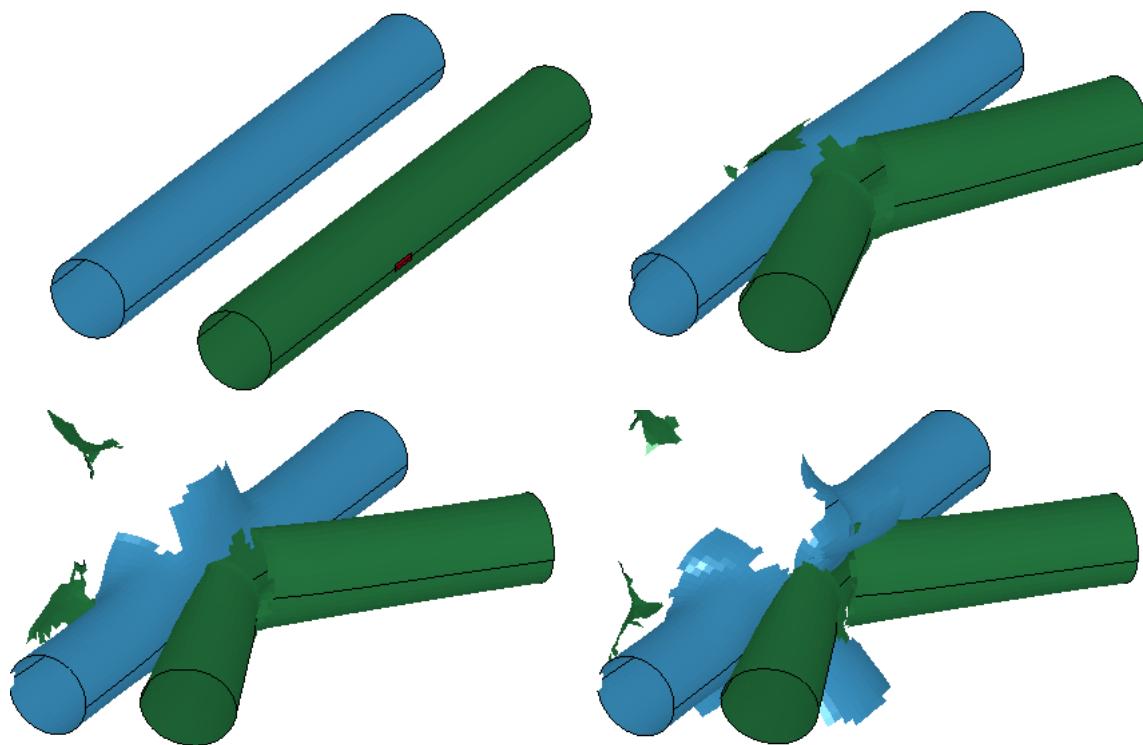


Рисунок 6.15 – Возможность лавинного разрушения трубок теплообменника (разрушенная трубка ударяет по соседней и вызывает ее разрушение)

Нужно отметить, что приведенные выше расчеты представляют собой лишь демонстрацию методики. Расчет реального теплообменника или хотя бы его фрагмента с большим (> 3) количеством близко расположенных трубок требует мелкой сетки конечных элементов, малого шага по времени и, соответственно, компьютерных ресурсов, превышающих доступные на одиночном персональном компьютере.

6.5 Заключение к разделу 6

- 1) Оценка поведения конструкции при термоциклическом нагружении должна обязательно включать выяснение типа и механизма неупругого деформирования для оценки долговечности и возможных предельных состояний. В работе показано, что изменение нагрузки, описываемое даже одним монотонно меняющимся параметром, может приводить к качественным изменениям механизма деформирования, существенно влияющим на прогноз поведения конструкции.
- 2) Малое деформационное упрочнение материалов, характерное для высоких температур и уровней деформации (в аварийных ситуациях), может приводить к неустойчивому деформированию конструкции. При механическом (кинематическом) нагружении это проявляется в виде появления «падающих» участков условных диаграмм деформирования (сила уменьшается с увеличением перемещения). При тепловом нагружении этот же эффект может приводить к концентрации деформаций и разрушению. Подходы Норм прочности (как отечественных, так и американских), ориентированные на материалы с заметным упрочнением в нормальных условиях эксплуатации, недостаточно учитывают этот фактор.
- 3) Разработана методика численного моделирования гипотетической аварии – разрушения трубки теплообменника «жидкометаллический теплоноситель – вода». Методика отличается учетом фазового перехода «вода-пар» и возможности адиабатического расширения паровых пузырей. Проведены пробные расчеты. Расчет реальных конструкций требует дополнительных вычислительных ресурсов.

7 Методики расчета узлов трения машин и механизмов в условиях пониженных температур (до – 150 град. Цельсия)

Методика расчёта узлов трения машин и механизмов в условиях пониженных температур базируется на результатах экспериментальных исследований модельного узла трения модернизированной машины ИИ-5018.

Для проведения физического моделирования подшипника скольжения был собран трибологический стенд на базе серийной машины трения ИИ5018. Модельный узел трения изображен на рисунке 7.1.

В качестве объекта исследования выбран подшипник скольжения, как наиболее распространённый узел трения.

Стенд состоит из доработанной камеры трения машины ИИ5018, вновь разработанного узла трения, смазочной системы с возможностью подогрева масла, системы измерения падения напряжения в контакте. Нагружение узла трения осуществлялось стандартным нагрузителем машины.

Стандартный узел трения, предназначенный для испытаний по схеме «вал-втулка» машины ИИ-5018, является не пригодным для проведения исследований по ряду причин. Во-первых, рабочие поверхности ролика и втулки требуют дополнительной обработки. Во-вторых, втулка не имеет антифрикционного покрытия. В-третьих, для проведения большого количества исследований требуется изготовление большого количества втулок.

Кроме того, величина погрешности измерений момента обратно пропорциональна значению измеряемого коэффициента трения и диаметру ведущего ролика, измеренные значения момента требуют корректировки за вычетом потерь мощности в шпинделе машины при изменении частоты вращения и нагрузки [1]. Исследования Даровского Г.В и Елманова И.М. показали, что коэффициенты трения, определяемые по общепринятой методике без учёта потерь в шпинделе машины в 1,1...1,5 раза больше в паре «ролик-колодка» (сталь 45 - фторопласт 4), а в паре сталь 45-БрАЖ 9-4 – в 1,3...2,9 раза.

При малых значениях коэффициента трения погрешность может составлять 100% и более.

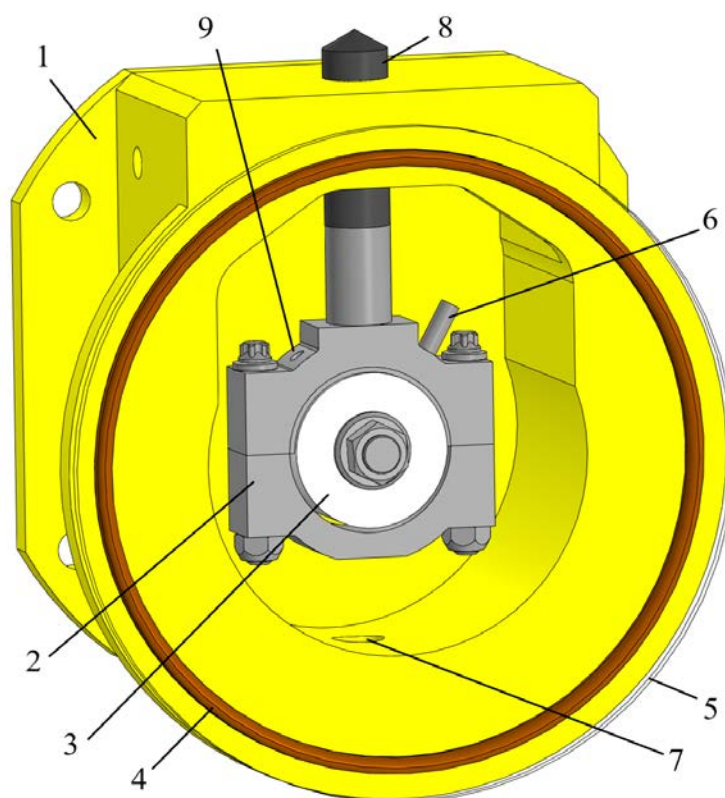


Рисунок 7.1 – Модельный узел трения для машины ИИ5018.

1 – доработанная камера трения машины ИИ5018, 2 – корпус подшипника с углом охвата 180 градусов, 3 – ролик, 4 – уплотнительное кольцо, 5 – защитное стекло, 6 – штуцер для подвода масла, 7 – отверстие для слива масла в бак, 8 – нагружатель, 9 – место установки термопары

По этим причинам был изготовлен узел трения (рисунок 7.1), представляющий собой подшипник скольжения, геометрические параметры которого соответствуют шатунному подшипнику двигателя ВАЗ 2108. Выбор геометрических параметров подшипника обусловлен компоновкой камеры трения машины ИИ5018. Корпус подшипника изготовлен из шатуна, указанного двигателя. Геометрические параметры узла трения следующие:

- наружный диаметр ролика 47,83 мм,
- ширина ролика 30 мм,
- ширина вкладыша 21 мм,
- радиальный зазор для испытуемого подшипника составлял от 30 до 60 мкм в разных испытаниях.

Ролик, который имитирует шейку коленчатого вала, был изготовлен из стали 40Х. Такой узел трения позволяет использовать сталеалюминиевые шатунные вкладыши двигателя ВАЗ 21083 стандартного и ремонтных размеров. Проведение измерений с использованием вкладышей ремонтного размера в сочетании с разными роликами

позволяют исследовать влияние величины зазора в подшипнике на его работу. Для фиксации перехода между жидкостной и граничной смазкой использовалось измерение падения напряжения в контакте.

Диаграммы Герси-Штрибека для испытываемого подшипника при смазке моторными маслами классов вязкости 5W-40 и 0W-20 представлены на рисунке 7.2.

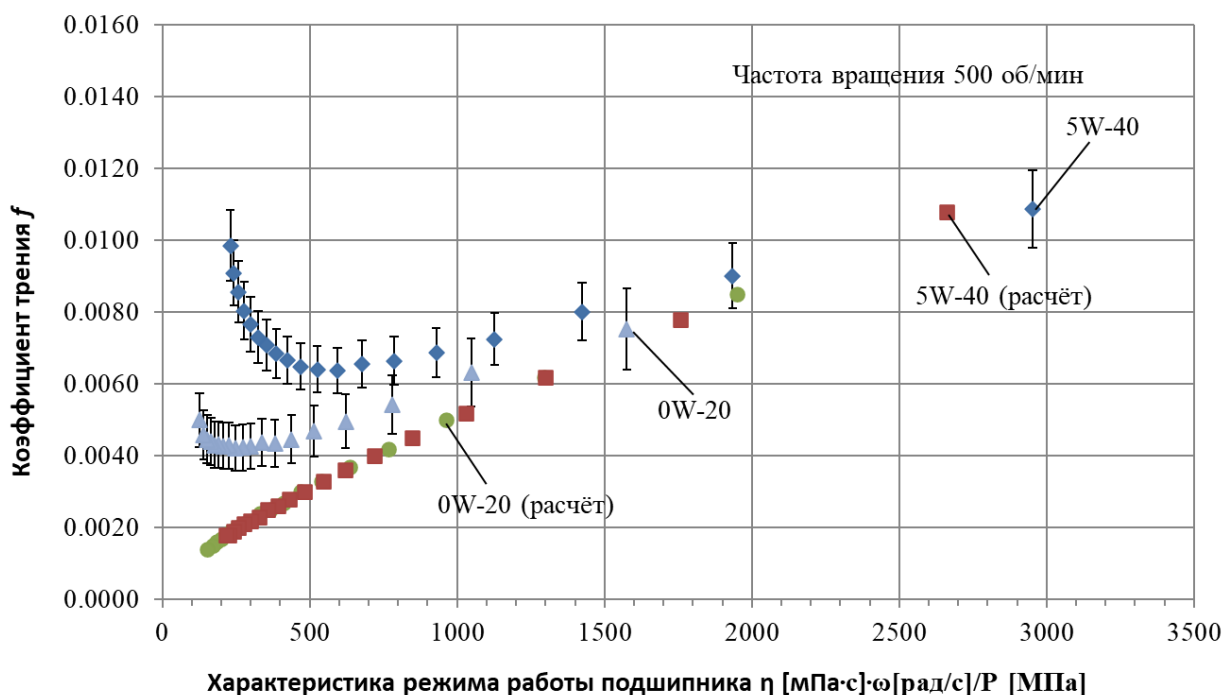


Рисунок 7.2 – Диаграммы Герси-Штрибека для испытываемого подшипника при смазке моторными маслами 5W-40 и 0W-20

Для проведения исследований работы подшипника скольжения в условиях низких температур до -150 градусов Цельсия необходимо изготовить криокамеру трения. В настоящий момент идёт проработка вариантов конструкции такой камеры для стандартной машины трения ИИ-5018.

Новизна исследования заключается в установлении закономерностей работы подшипника скольжения со смазкой в условиях пониженных температур до -150 градусов Цельсия. Результаты исследования имеют большую значимость для проектирования подшипников скольжения машин и механизмов, работающих в условиях Крайнего Севера, а также в открытом космическом пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в отчете результаты, в своей совокупности, являются крупным очередным шагом в направлении построения фундаментальных и прикладных компонент теории управления живучестью и безопасностью ключевых объектов и критичных инфраструктур по обобщенным региональным критериям, которые сконструированы согласно принципов и целей управления государством, зафиксированных в Основном Законе страны.

Исследования выполнены на основе концепции конвергентных технологий МАБИКС с использованием принципов зонтичной науки инфранетики, что позволило органично увязать между собой методы теории надежности сооружений, механики разрушения, риск-анализа, теории оптимизации, демографии и макроэкономики, когнитивных, социальных наук, а также наук, которые определяют специфику конкретных ПОО, инфраструктур и регионов. Это позволяет использовать полученные результаты при разработке фундаментальных основ супраживучести ключевых стратегических объектов и гармоничного управления в условиях рынка (говернанса) умными инфраструктурами и территориями по плану НИР 2021–2013 гг.

Дана классификация источников неопределенности и разделение неопределенностей на алеаторные (врожденные, случайные) и эпистемные (провалы, пробелы в знаниях) при анализе риска, живучести и надежности инфраструктур и в кодифицированном (основанных на нормах) проектировании или основанном на заданных функциональных характеристиках дизайна. Приведена обобщенная блок-схема оценки надежности сложной системы, отказывающей по ряду типов отказов с учетом алеаторных и эпистемных неопределенностей.

Категоризация неопределенностей как алеаторных или эпистемных, является прерогативой создателя модели и прагматическим выбором, зависящим от контекста и приложения. Различие между случайными и эпистемными неопределенностями определяется выбранной моделью объекта и технологией ее создания. Эта дихотомия полезна для: (1) выявления источников неопределенности, которые могут быть уменьшены в ближайшем будущем (до значительного прогресса в научных знаниях), а также (2) при разработке состоятельных, робастных моделей риска, живучести и надежности. Различение также важно с точки зрения прозрачности принятия решений, поскольку тогда становится ясно, какие уменьшаемые неопределенности не были уменьшены принятыми решениями.

Для правильной постановки задач риска и надежности следует уделять особое внимание категории неопределенностей (эпистемная, случайная, эргодическая или

неэргодическая, редчайшая (черный лебедь), редкая, нередкая). Невыполнение этого требования может привести к недооценке или переоценке вероятности отказа, которая в некоторых случаях может быть весьма значительной (на несколько порядков).

Предлагается концепция интеграции метода Байесовских сетей (BN) с иерархическим Байесовским анализом (НВА) для моделирования редких событий с учетом как исходных и собираемых в ходе эксплуатации системы данных, так и неопределенности исходной модели. Эта иерархия осуществляется с привлечением понятия и аппарата энтропии разрушения.

В теории живучести, надежности и безопасности инфраструктур все ещё недостаточно внимания уделяется (1) чувствительности хвостов ФПВ, используемых при решении задач стохастической механики, надежности и безопасности; (2) характеристикам неопределенностей, возникающих при моделировании и оценке рисков, и (3) эффекту статистической зависимости, возникающий из эпистемных неопределенностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

К разделу 1.1:

1. Тимашев С.А. Системный подход к проблеме надежности инженерных сооружений / В кн.: Исследования в области надежности инженерных сооружений. – Л., 1979.
2. Тимашев С.А. Надёжность больших механических систем. – М.: Наука, 1982. – 182 с.
3. Тимашев С.А. Инфраструктуры: в 3 т. Т. 1: Надёжность и долговечность. – Екатеринбург: УрО РАН, 2016. – 530 с. Т. 2: Диагностика. Мониторинг. Мейнтенанс. Человеческий фактор. Живучесть. – Екатеринбург: УрО РАН, 2020. – 696 с.
4. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надёжности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций). Препринт. – Екатеринбург: АМБ, 2018. – 38 с.
5. Benjamin J.R., Cornell C.A. Probability statistics and decision for civil engineers. – New York, NY: McGraw-Hill, 1970. – 624 p.
6. Faber M.H. On the treatment of uncertainties and probabilities in engineering decision analysis // J. Offshore Mech. Arctic Eng., 2005. – 127. – P. 243–248.
7. Lindley D. The philosophy of statistics // J. of the Royal Statistical Society: Ser. D (The Statistician), 2000. – 49(3). – P. 293–337.
8. Paté-Cornell M.E. Uncertainties in risk analysis: six levels of treatment // Reliability Engineering & System Safety, 1996. – 54. – P. 95–111.
9. Vrouwenvelder A.C.W.M. Uncertainty analysis for flood defense systems in the Netherland // In: Proc. ESREL, 2003.
10. Ditlevsen O. Model uncertainty in structural reliability // Structural Safety, 1982. – 1(1). – P. 73–86.
11. Beck J.L., Yuen K.V. Model selection using response measurements: Bayesian probabilistic approach // J. Eng. Mech., 2004. – 130. – P. 192–203. 2002. – 128(10). – P. 1024–38.
12. Field Jr. R.V., Grigoriu M. Model selection in applied science and engineering: a decision-theoretic approach // J. of Engineering Mechanics, ASCE, 2007. – 133. –P. 780–791.
13. Box G.E.P., Tiao G.C. Bayesian inference in statistical analysis. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1992. – 600 p.

14. Gardoni P., Der Kiureghian A., Mosalam K. Probabilistic capacity models and fragility estimates for RC columns based on experimental observations // J. of Engineering Mechanics, 2002. – 128 (10). – P. 1024-1038.
15. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. – New York, NY: J. Wiley & Sons, 1996. – Vol. 178.
16. Ditlevsen O. Distribution arbitrariness in structural reliability. In: Schuëller G., Shinozuka M., Yao J., editors. Proc. of ICOSSAR'93. Structural Safety & Reliability. – The Netherlands: Rotterdam, 1994. – P. 1241–1247.
17. Der Kiureghian A. Measures of structural safety under imperfect states of knowledge // ASCE J. of Structural Engineering, 1989. – Vol. 115. – P. 1119–1140.
18. Ditlevsen O., Madsen H.O. Proposal for a code for the direct use of reliability methods in structural design. – JCSS Working Document, 1989.
19. Matheron G. Estimating and choosing [Hasofer AM, Trans.]. – Berlin: Springer Verlag, 1989. – 141 p.
20. Popper K.R. The logic of scientific discovery. – London: Hutchinson, 1972.
21. Cornell C.A., Krawinkler H. Progress and challenges in seismic performance assessment. – PEER Center News, 2000. – URL: <http://peer.berkeley.edu/news/2000spring/index.html>.
22. Malak El-Gheriani, Faisal Khan, Ming J. Zuo. Rare Event Analysis Considering Data and Model Uncertainty // ASCE-ASME J. of Risk and Uncertainty in Engineering Systems. Part B. Mech. Engrg., 2017. – 3(2): 021008 (15 p.). – No: RISK-16-1125.
23. Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or Epistemic? Does it matter? // Structural Safety, 2009. – 31. – P. 105–112.
24. Der Kiureghian A. Non-ergodicity and PEER's framework formula // Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005. – 34(13). – P. 1643–1652.

К разделу 1.2:

1. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М. и др. Надежность технических систем и техногенный риск. – М.: Деловой экспресс, 2002. – 368 с.
2. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Елизаров А.И. и др. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем. – М.: Логос, 2001. – 232 с.
3. Соложенцев Е.Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. 2-е изд. – СПб.: Бизнес-пресса, 2006. – 560 с.

4. Тимашев С.А., Тырсин А.Н. Модели безопасности систем критичных инфраструктур // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – М.: ВИНТИ, 2008. – № 4. – С.20–28.
5. Вильсон А.Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем: Пер. с англ. – М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1978. – 248 с.
6. Скоробогатов С.М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории). – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 512 с.
7. Федулов А.Г., Федулов Ю.Г., Цыгичко В.Н. Введение в теорию статистически ненадежных решений. 2-е изд. – М.: КомКнига, 2007. – 280 с.
8. Прангишвили И.В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. – М.: Наука, 2003. – 428 с.
9. Приц А.К. Принцип стационарных состояний открытых систем и динамика популяций. – Калининград: Калининградский государственный университет, 1974. – 124 с.
10. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам: Пер с англ. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
11. Хазен А.М. Введение меры информации в аксиоматическую базу механики: 2-е изд. – М.: Рауб, 1998. – 168 с.
12. Попков Ю.С. Математическая демозкономика: Макросистемный подход. –М.: ЛЕНАНД, 2013. – 560 с.
13. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal, 1948. – Vol. 27. – Pp. 379-423, 623-656.
14. Гельфанд И.М., Колмогоров А.Н., Яглом А.М. Количество информации и энтропия для непрерывных распределений. В кн.: Тр. III Всесоюз. математического съезда. – Т. 3. – М.: АН СССР, 1958. – С. 300–320.
15. Тырсин А.Н. Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем. – Воронеж: Научная книга, 2016. – 156 с.
16. Эсбенсен К. Анализ многомерных данных. Избранные главы: пер. с англ. – Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. – 160 с.
17. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 910 с.
18. Орлов А.И. Прикладная статистика. – М.: Экзамен, 2006. – 671 с.
19. Тюрин Ю.Н. Многомерная статистика: гауссовские линейные модели. – М.: Изд-во Московского университета, 2011. – 136 с.
20. Pena D., Rodriguez J. Descriptive Measures of Multivariate Scatter and Linear Dependence // J. of Multivariate Analysis, 2003. – Vol. 85. – № 2. – Pp. 361–374.

21. Pena D., Van der Linde A. Dimensionless Measures of Variability and Dependence for Multivariate Continuous Distributions // Communications in Statistics: Theory and Methods, 2007. – Vol. 36. – № 10. – Pp. 1845–1854.
22. Тырсин А.Н. Мера совместной корреляционной зависимости многомерных случайных величин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2014. – Т. 80. – № 1. – С. 76–80.
23. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
24. Сошникова Л.А., Тамашевич В.Н., Уебе Г., Шефер М. Многомерный статистический анализ в экономике. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 598 с.
25. Manly B.F.J., Navarro A.J.A. Multivariate Statistical Methods. A Primer. – 4th ed. – CRC Press, 2017. – 255 p.
26. Елисеева И.И., Курышева С.В., Коростелева Т.В. и др. Эконометрика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 576 с.
27. Тырсин А.Н. Взаимосвязь между энтропийным моделированием и корреляционным анализом // Современные методы теории краевых задач: Матер. Межд. конф. «Воронежская весенняя математическая школа. Понtryгинские чтения – XXXI» (3–9 мая 2020 г.). – Воронеж: АНО «Наука-Юнипресс», 2020. – С. 216–217.
28. Chakravarty S.R. A Generalized Human Development Index // Review of Development Economics, 2003. – Vol. 7. – Pp. 99–114.
29. Кабаков Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 588 с.
30. Буховец А.Г., Москалев П.В., Богатова В.П., Бирючинская Т.Я. Статистический анализ данных в системе R: Уч. пособие / Под ред. Буховца А.Г. – Воронеж: ВГАУ, 2010. – 124 с.
31. Официальный веб-сайт RStudio [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rstudio.com/> (дата обращения: 12.12.2020).
32. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Уч. пособие. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.
33. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, ФИЗМАТЛИТ, 1988. – 552 с.

К разделу 2:

34. Baron S., Field J., Schuller T. Social Capital: Critical Perspectives. – Oxford: Oxford University Press, 2000. – Pp. 4–7.

35. Odendaal N. Information and communication technology and local governance: understanding the difference between cities in developed and emerging economies // Computers, environment and urban systems, 2003. Vol. 27(6). – Pp. 585–607.

36. Caragliu A., Del Bo C., Nijkamp P. Smart cities in Europe. Serie Research Memoranda 0048, VU University Amsterdam, Faculty of Economics, Business Administration and Econometrics, 2009.

37. Тимашев С.А. Стратегия трансформации Иссык-Кульской области республики Кыргызстан в супраживучий умный регион: препринт. Екатеринбург, 2019. – 66 с.

38. Орлов А.И. Методы экспертных оценок // Заводская лаборатория, 2009. – С. 54–60.

39. Орлов А.И., Устойчивость в социально-экономических моделях, 2006. – С. 78.

К разделу 3:

1. Katharina F., Edgar V., Mauricio S.-S. and Michael H.F. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria // J. of Structural Safety, 2016. – № 44. – Pp. 37–46.

2. Yaari M. E. Uncertain Lifetime, Life Insurance and the Theory of the Consumer // J. of Review of Economical Studies, 1965. – V. 32(2). – Pp. 137–150.

3. Usher D. An imputation to the measure of economic growth for changes in life expectancy National Accounting and Economic Theory: The Collected Papers of Dan Usher –UK: Edward Elgar Publishing, 1994. – № 1. – Pp. 105–144.

4. Ramsey F.P. A mathematical theory of saving // J. of Econ, 1928. – V. 38. – Pp. 543–559.

5. Makeham W. M. On the law of mortality and the construction of annuity tables // J. of Inst. Actuaries, 1860. – № 8. – Pp. 301–310.

6. Shepard D. S. and Zeckhauser R. J. Survival versus consumption // J. of Manage Sci, 1984. – V. 30(4). – Pp. 423–439.

7. Haldar A. Recent developments in reliability-based civil engineering. – World Scientific Publ. Co Inc., 2006. – 296 p.

8. Nathwani J. S., Lind N. C. and Pandey M. D. Affordable safety by choice: the life quality method. – Waterloo: Institute for Risk Research, University, 1997. – 230 p.
9. Rackwitz R. The Philosophy Behind the Life Quality Index and Empirical Verification // J. of Risk Assessment in Engineering, 2008.
10. Rackwitz R. Optimization and risk acceptability based on the life quality index // J. of Struct Safety, 2002. – № 24. – Pp. 297–331.
11. Easterlin R. A. The worldwide standard of living since 1800 // J. of Econ Persp, 2000. – 14(1). – Pp. 7–26.
12. Jakobovits I. Jewish Medical Ethics. – New York, 1975.
13. Maddison A. Monitoring the world economy 1820–1992. – Paris: OECD, 1995.
14. Pandey M. D. and Nathwani J. S. Canada wide standard for particulate matter and ozone: cost–benefit analysis using a life-quality index // J. of Risk Anal, 2003. – 23 (1). – Pp. 55–68.

К разделу 4:

1. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник в 4 т. / Под общей ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2: Надежность электроэнергетических систем. Справочник / Под ред. М.Н. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
2. Руденко Ю.Н. Надежность и резервирование в энергосистемах / Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. – Новосибирск: Наука, 1974. – 260 с.
3. Дубицкий М.А., Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоиздат, 1988. – 272 с.
4. Чукреев Ю.Я. Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. – Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1995. – 176 с.
5. Zhu J. Optimization of power system operation. – New York, NY: John Wiley & Sons Inc., 2009. – 624 p.
6. Endrenyi J. Reliability Modeling in Electric Power Systems. – New York: John Wiley & Sons, 1979. – 338 p.
7. Billinton R., Allan R.N. Reliability evaluation of power systems. New York: Plenum Press, 1996. – 534 p.
8. Чукреев Ю.Я., Чукреев М.Ю. Модели оценки показателей балансовой надежности при управлении развитием электроэнергетических систем. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2014. – 208 с.

9. Г.Ф. Ковалев. Надежность систем электроэнергетики / Г.Ф. Ковалев, Л.М. Лебедева; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2015. – 224 с.
10. Зоркальцев В. И., Пержабинский С. М. Модели оценки дефицита мощности электроэнергетической системы // Сиб. журн. индустр. матем., 2012. – 15:1. – С. 34–43.
11. Зоркальцев В.И., Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М., Пержабинский С.М. Минимизация дефицита мощности в ЭЭС с учетом потерь мощности в линиях электропередачи // Электричество, 2010. – № 9. – С. 56–60.
12. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии / Под. общ. ред. В.Г. Герасимова. – М.: МЭИ, 2004. – 964 с.
13. Непомнящий В.А. Учет надежности при проектировании энергосистем. – М.: Энергия, 1978. – 200 с.
14. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. – М.: Наука, 1986. – 252 с.
15. Чукреев Ю.Я. Сравнение отечественных и зарубежных вероятностных показателей балансовой надежности электроэнергетических систем // Известия РАН. Энергетика, 2012. – № 6. – С. 27–37.
16. Мельников Н.А. Матричные методы расчета рабочих режимов замкнутых электрических сетей: [уч. пособие] / Н.А. Мельников, Л.А. Солдаткина; кол. авт. Московский энергетический институт. – М.: МЭИ, 1965. – 131 с.
17. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

К разделу 5:

1. Franciosi C., et al. A Taxonomy of Performance Shaping Factors for Human Reliability. Analysis in Industrial Maintenance // J. of Industrial Engineering and Management, 2018. – P. 115–132.
2. РИА Новости. Ростехнадзор назвал причину 90% аварий в промышленности, 2019. – URL: <https://ria.ru/20191213/1562356581.html> (дата обращения: 10.05.2020).
3. Yongchun Miao, Rongxue Kang. Research on Human Reliability of Large-Scale Chemical Production System // Proc. of AIP Conf., 2017. – 1839(1):020114. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.4982479> (дата обращения: 12.04.2020).

4. Zhonghao Zhao, et al. Selective Maintenance Optimization for a Multi-State System Considering Human Reliability // *Symmetry*, 2019. – URL: <https://doi.org/10.3390/sym11050652> (дата обращения: 12.04.2020).
5. De Felice F., Petrillo A. An Overview on Human Error Analysis and Reliability Assessment // *Springer Series in Reliability Engineering*, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_2 (дата обращения: 16.04.2020).
6. Helle I. Assessing Oil Spill Risks in the Northern Baltic Sea with BN Applications: academic dissertation. – Helsinki: University of Helsinki, 2015.
7. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Expert Systems: Networks of Plausible Inference. – San Francisco, 1988. – 552 p.
8. Тулупьев А.Л. Байесовские сети: Логико-вероятностный подход. – СПб.: Наука, 2006. – 607 с.
9. Fenton N., Neil M. Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks. – Boca Raton: CRC Press, 2013.
10. Pearl J. Causality: Models, Reasoning, and Inference, 2nd ed. – New York: Cambridge University Press, 2009. – 484 p.
11. Baoping Cai, et al. A Dynamic Bayesian Networks Modeling of Human Factors on Offshore Blowouts // *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012. – №26. – P. 639–649.
12. Morais C., Moura R., Beer M., Patelli E. Human Reliability Analysis – Accounting for Human Actions and External Factors through the Project Life Cycle // *European Safety and Reliability Conf.*, 2018. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/325763502> (дата обращения: 16.04.2020).
13. Birk A.M., Cunningham M.H. The Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion // *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, 1994. – №7. – P. 474–480.
14. Abbasi T., Abbasi S.A. The Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE): Mechanism, Consequence Assessment, Management // *J. of Hazardous Materials*, 2007. – 141. – P. 489–519.
15. Khan F.I., Abbasi S.A. Risk Assessment in the Chemical Process Industries: Advanced Techniques. – New Delhi: Discovery Publishing House, 1998.
16. Lees F.P., Loss. Prevention in the Process Industries-Hazard Identification, Assessment, and Control. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.
17. Behrouz Hemmatian. Contribution to the Study of Boiling Liquid. Expanding Vapor Explosions and Their Mechanical Effects: doct. disser. – Polytechnic University of Catalonia, Spain, 2016.

18. Moura R.N. Learning from Accidents: Human Errors, Preventive Design and Risk Mitigation: doctoral dissertation. – University of Liverpool, England, 2017.
19. ГОСТР ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска».
20. Castelletti A., Soncini-Sessa R. Bayesian Networks and Participatory Modelling in Water Resource Management // Environmental Modelling & Software, 2007. – №22. – P. 1075–1088.
21. GeNIe Modeler. USER MANUAL. – URL: <https://support.bayesfusion.com/docs/GeNIe.pdf> (дата обращения: 20.11.2019).
22. Core Topic 2: HF in Accident Investigations. Human Factors View of Accident Causation. – URL: <https://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/core2.pdf> (дата обращения: 18.04.2020).
23. Core Topic 3: Identifying Human Failures. – URL: <https://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/core3.pdf> (дата обращения: 18.04.2020).
24. Venart J.E.S. Chapter 21. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVEs): the Causes and Consequences — Recent Evidence // Semantic Scholar. – URL: [https://www.semanticscholar.org/paper/CHAPTER-21-BOILING-LIQUID-EXPANDING-VAPOR-\(-BLEVEs-Venart/a0803e86bfa_ffb3d8347d1a7b30f264bd110e018#paper-header](https://www.semanticscholar.org/paper/CHAPTER-21-BOILING-LIQUID-EXPANDING-VAPOR-(-BLEVEs-Venart/a0803e86bfa_ffb3d8347d1a7b30f264bd110e018#paper-header) (дата обращения: 18.04.2020).
25. Russell A. Ogle, Juan C. Ramirez, and Suzanne A. Smyth. Calculating the Explosion Energy of a Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion Using Exergy Analysis // American Institute of Chemical Engineers Journals. – URL: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/prs.10465> (дата обращения: 18.04.2020).
26. Xie Mengmeng. Thermodynamic and Gas Dynamic Aspects of a BLEVE // TU Delft Publication environment. – URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a3514a6a-49d8-41b3-ada5-7a7dccb376ea?collection=research> (дата обращения: 23.04.2020).
27. Huiyue Diao and Majid Ghorbani. Production Risk Caused by Human Factors: a Multiple Case Study of Thermal Power Plants // Frontiers of Business Research in China (FBR). – URL: <https://fbr.springeropen.com/articles/10.1186/s11782-018-0035-9> (дата обращения: 23.04.2020).
28. Marie Havlikova, Miroslav Jirgl, Zdenek Bradac. Human Reliability in Man-Machine Systems // Procedia Engineering, 2015. – № 100. – P. 1207–1214.
29. Dr Nic Cavanagh. A Risk Based Approach to Human Vulnerability Modelling and Occupied Building Analysis // IChemE. – URL: <https://www.icheme.org/media/9094/xxii-paper-06.pdf> (дата обращения: 20.04.2020).

30. Fenton N., Neil M. *Managing Risk in the Modern World: Bayesian Networks and the Applications*. – London: London Mathematical Society, 2007.
31. Johansson H. *Decision Making in Fire Risk Management*. // Research Portal of Lund University. – URL: [https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/decision-making-in-fire-risk-management\(8237ce19-296a-45fe-a556-8f2c0ad44a1c\).html](https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/decision-making-in-fire-risk-management(8237ce19-296a-45fe-a556-8f2c0ad44a1c).html) (дата обращения: 12.04.2020).
32. Henk W.M. Witlox. *Overview of Consequence Modelling in the Hazard Assessment Package Phast* // Research Gate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/242554994_OVERVIEW_OF_CONSEQUENCE_MODELING_IN_THE_HAZARD_ASSESSMENT_PACKAGE_PHAST (дата обращения: 13.03.2020).
33. Nic Cavanagh. *Recent Advances in Software for Modelling the Risks Associated with Gas Explosions in Congested Spaces Using the Multi Energy Method* // DNV GL. – URL: <https://www.dnvgl.com/publications/recent-advances-in-software-for-modelling-the-risks-associated-with-gas-explosions-in-congested-spaces-using-the-multi-energy-method-13462> (дата обращения: – 13.03.2020).
34. Brian Bain et al. *Domino Effect Modelling Considerations for Quantitative Risk Assessment of Offshore Installations* // DNV GL. – URL: <https://www.dnvgl.com/software/campaigns-2016/safeti-offshore-whitepaper-domino-effect.html> (дата обращения: 13.03.2020).
35. Хлопотов М.В. *Применение байесовской сети при построении моделей обучающихся для оценки уровня сформированности компетенций* // *Науковедение*, 2014. – № 5 (24).
36. Linda J. Bellamy. *Success in the Face of Uncertainty: Human Resilience and the Accident Risk Bow-tie* // Research Gate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/303034352_Success_in_the_face_of_uncertainty_Human_resilience_and_the_accident_risk_bow-tie (дата обращения: 18.04.2020).
37. *Growing a Technical Asset Management Program*. // DNV GL. – URL: <https://www.dnvgl.com/software/campaigns-2018/cascade-growing-a-technical-asset-management-program-in-electric-utilities-whitepaper.html> (дата обращения: 13.03.2020).
38. Petrillo A. and Zomparelli F. *The Importance of Human Error and Reliability Management in Critical Conditions and Infrastructures* // *Springer Series in Reliability Engineering*, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_1 (дата обращения: 16.04.2020).

39. De Vasconcelos V., et al. Integrated Engineering Approach to Safety, Reliability, Risk Management and Human Factors // Springer Series in Reliability Engineering, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_4 (дата обращения: 16.04.2020).
40. Nivolianitou Z., Konstantinidou M. A Fuzzy Modeling Application for Human Reliability Analysis in the Process Industry // Springer Series in Reliability Engineering, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_5 (дата обращения: 16.04.2020).
41. Maritza Rodriguez Gual, et al. Prevention of Human Factors and Reliability Analysis in Operating of Sipping Device on IPR-R1 TRIGA Reactor, a Study Case // Springer Series in Reliability Engineering, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_6 (дата обращения: 16.04.2020).
42. De Felice F., Petrillo A., Zomparelli F. Human Factors Challenges in Disaster Management Scenario // Springer Series in Reliability Engineering, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_7 (дата обращения: 16.04.2020).
43. Leva M.C., Hansen P.F. Use of Bayesian Network for Human Reliability Modelling: Possible Benefits and an Example of Application // Springer Series in Reliability Engineering, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_8 (дата обращения: 16.04.2020).
44. Cacciabue P.C., Oddone I. A Methodology to Support Decision Making and Effective Human Reliability Methods in Aviation Safety // Springer Series in Reliability Engineering, 2018. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62319-1_9 (дата обращения: 16.04.2020).
45. Venart J.E.S. Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions (BLEVE); Possible Failure Mechanisms and Their Consequences // Semantic Scholar. – URL: https://www.researchgate.net/publication/286746489_Boiling_liquid_expanding_vapour_explosions_BLEVE_Possible_failure_mechanisms_and_their_consequences (дата обращения: 18.04.2020).

К разделу 6:

1. Безносков А.В., Бокова Т.А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2012. – 536 с.
2. Махутов Н.А., Фролов К.В., Драгунов Ю.Г. и др. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов / Под ред. Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. – М.: Наука, 2008. – 464 с.

3. Cherniavsky O., Rebiakov Yu., Cherniavsky A. Properties of steels and chromium-nickel alloys under low-cycle combined deformation // *Int. Journal of Fatigue*, 2017. – 103. – P. 415–418.
4. *Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors* / Ed. Pascal Yvon. – Woodhead Publishing, 2017. – 684 p.
5. Watanabe D., Chuman Y., Otani T., Shibamoto H., Inoue K., Kasahara N. An experimental validation of the guideline for inelastic design analysis through structural model tests // *Nuclear Engineering and Design*, 2008. – Vol. 238(2). – P. 389–398.
6. Angiolini M.E., Aiello G., Matheron P., Pilloni L., Giannuzzi G.M. Thermal ratcheting of a P91 steel cylinder under an axial moving temperature distribution // *Journal of Nuclear Materials*, 2016. – Vol. 472. – P. 215–226.
7. Lee, H.-Y., Kim, J.-B., and Lee, J.-H. Thermal Ratchetting Deformation of a 316 L Stainless Steel Cylindrical Structure Under an Axial Moving Temperature Distribution // *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 2003. – 80(1). – P. 41–48.
8. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
9. Gokhfeld D.A., Cherniavsky O.F. Limit analysis of structures at thermal cycling. – The Netherlands: Suthoff & Noordhoff, 1980. – 537 p.
10. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с.
11. Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б., Кононов К.М. и др. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. – 408 с.
12. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 526 с.
13. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII. Division III. Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels. – ASME, 2015. – 422 p.
14. Грабежная В.А., Михеев А.С., Штейн Ю.Ю., Семченков А.А. Расчетно-экспериментальное исследование работы модели парогенератора БРЕСТ-ОД-300 // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*, 2013. – № 1. – С. 101–109.
15. Экспериментальное исследование и математическое моделирование поведения сталей марок ст.3, 20х13 и 08х18н10т в широких диапазонах скоростей деформаций и температур / А.М. Брагов, Л.А. Игумнов, В.Б. Кайдалов, А.Ю. Константинов, Д.А. Лапшин, А.К. Ломунов, Ф.М. Митенков // *Прикладная механика и техническая физика*, 2015. – Т. 56. – № 6. – С. 51–57.

16. База данных по теплофизическим свойствам жидкометаллических теплоносителей перспективных ядерных реакторов. Теплофизические свойства жидкого свинца и эвтектического сплава свинца и висмута – Государственная служба стандартных справочных данных в области использования атомной энергии. "РОСАТОМ" – НИЯУ МИФИ. Головной научно-методический центр данных. – 2020. – URL: <http://www.gsssd-rosatom.mephi.ru/DB.php>.

К разделу 7:

1. Даровской, Г.В. Влияние неуравновешенности механизма сжатия образцов машины ИИ 5018 на величину коэффициента трения / Г.В. Даровской, И.М. Елманов // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2011. – №10. – С. 29–33.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Abdel Menaem A., Oboskalov V. Integration of renewable energy sources into microgrid considering operational and planning uncertainties // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 982. Pp. 225–241. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_21.
2. Budarin A., Alekhin V., Avdonina L. Numerical modelling of the reinforced concrete beam shear failure // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, V. 687. № 3 (2019) 033044. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033044.
3. N. M. Barbin, A. M. Kobelev, D. I. Terent'ev, and S. G. Alekseev. Thermodynamic Analysis of the Oxidation of Radioactive Graphite in the CuO–NaCl–KCl–Na₂CO₃–K₂CO₃ Melt in Water Vapor // *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2020, No. 2. Pp. 155–163. DOI: 10.1134/S0036029520020020.
4. Серебрянский С.М., Тырсин А.Н. Повышение точности решения обратных задач за счет уточнения граничных условий // *Информатика и ее применения*. 2020. Т. 14. Вып. 1. С. 56–62. DOI: 10.14357/19922264200108.
5. Тырсин А.Н., Масленников Д.Л. Моделирование риска в неоднородных стохастических системах // *Современные наукоемкие технологии*, 2020. № 10. С. 101–107. DOI: 10.17513/snt.38262.
6. Тырсин А.Н., Васильева Е.В. Бинарная логистическая регрессия как модель управления на примере задачи повышения качества жизни населения // *Фундаментальные исследования*, 2020. № 10. С. 96–102. DOI: 10.17513/fr.42862.
7. Сурин В.А., Тырсин А.Н. Применение обобщенного метода наименьших модулей в задачах обработки и анализа изображений // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*, 2020. № 2. С. 45–55. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-2-45-55.
8. Алексеев С.Г., Гурьев Е.С., Полуян Л.В., Барбин Н.М. О показателях пожаровзрывоопасности // *Безопасность труда в промышленности*, 2020. № 6. С. 40–45. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-6-40-45.
9. Алексеев С.Г., Смирнов В.В., Гурьев Е.С., Полуян Л.В. Эволюция идей огненных тестов качества керосина // *Безопасность труда в промышленности*, 2020. № 9. С.30–35. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-9-30-35.
10. Обоскалов В.П. Алгоритмические аспекты расчета вероятностных показателей дефицита мощности в задаче балансовой надежности ОЭС // *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2020. № 2. С. 59–74. DOI: 10.31857/S0002331020010094.

11. Burukhina O.S., Bushinskaya A.V., Timashev S.A. Assessment of reliability of the above-ground arctic oil pipeline under the influence of a random process of subsidence/heaving of supports // Proc. of the 29th European Safety and Reliability Conf., ESREL 2019, Hannover, Germany, 2000. Pp. 4060 – 4067. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3_0607-cd.

12. Bushinskaya A.V., Timashev S.A. The toll of incidents, accidents and disasters on the average life expectancy in good health // Proc. of the 29th European Safety and Reliability Conf., ESREL 2019, Hannover, Germany, 2000. Pp. 102–109. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3_0614-cd.

13. Bushinskaya A.V., Timashev S.A. Assessment of Residual Lifetime Based on the Gompertz–Makeham Law and Its Application to Insurance // Proc. of the 29th European Safety and Reliability Conf., ESREL 2019, Hannover, Germany, 2000. Pp. 4233–4240. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3_0613-cd.

14. N. Makhutov, M. Gadenin, A. Cherniavsky, O. Cherniavsky, V. Nadein. Mechanics of contact interaction and deformation of main pipelines in the conditions of extreme external actions // Int. J. of Materials and Structural Integrity, 2020. V. 14, № 1. Pp. 54–64. DOI: 10.1504/IJMSI.2020.107302.

15. Alekhin V., Antipin A., Avdonina L. Structure behaviour analysis and detection of errors made at the design stage // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Int. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies «FarEastCon-2019», 2020. № 032063. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032063.

16. Menaem A.A., Oboskalov V. Comparing three methods for solving probabilistic multi-area load shedding distribution // In Proc. of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. Sochi; Russian Federation; 18–22 May 2020; Код 160947. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111926.