

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 614.8-027.21:519.2 504:519.2 621.316
Рег. № НИОКТР АААА-А21-121011490020-5



Директору НИЦ «НИР БСМ» УрО РАН

Л.В. Полюян

«16» декабря 2022 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ СУПРАЖИВУЧЕСТИ КЛЮЧЕВЫХ
СТРАТЕГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ГАРМОНИЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ (ГОВЕРНАНСА)
УМНЫМИ ИНФРАСТРУКТУРАМИ
(промежуточный)
(FUUF-2021-0001)

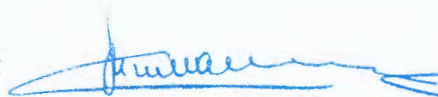
Руководитель НИР,
Научный руководитель НИЦ УрО РАН,
глав. науч. сотр., д-р техн. наук


С.А. Тимашев

Екатеринбург 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, науч. рук.,
глав. науч. сотр., д-р техн. наук



С.А. Тимашев
(введение, разделы 1, 2,
заключение)

(подпись, дата)

Исполнители:

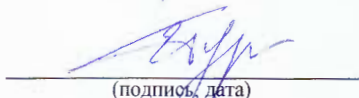
Директор, канд. техн. наук



Л.В. Полуян
(раздел 3)

(подпись, дата)

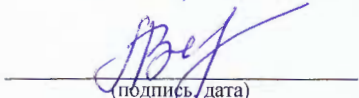
Уч. секретарь, канд. техн. наук



Е.С. Гурьев
(раздел 6)

(подпись, дата)

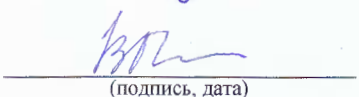
Вед. науч. сотр., канд. техн. наук



А.В. Бушинская
(разделы 1, 2)

(подпись, дата)

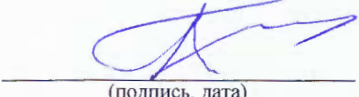
Вед. науч. сотр., д-р техн. наук



В.П. Обоскалов
(раздел 4)

(подпись, дата)

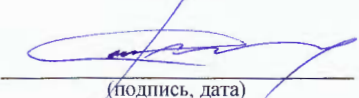
Вед. науч. сотр., д-р техн. наук



А.Н. Тырсин
(раздел 5)

(подпись, дата)

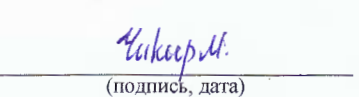
Стар. науч. сотр., канд. техн. наук



В.Н. Алехин
(раздел 1)

(подпись, дата)


Млад. науч. сотр., б. с.



М.В. Чикир
(раздел 3)

(подпись, дата)

Млад. науч. сотр., б. с.



Т.В. Макеева
(раздел 1)

(подпись, дата)

Млад. науч. сотр., б. с.



Е.В. Малютина
(раздел 1)

(подпись, дата)

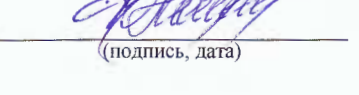
Стар. инженер-исслед., б. с.



Т.Г. Ковальчук
(раздел 1)

(подпись, дата)

Нормоконтроль, инженер



Ф.В. Пономарева

(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Отчет 317 с., 1 кн., 173 рис., 44 табл., 160 источн., 1 прил.

СИСТЕМЫ СИСТЕМ ИНФРАСТРУКТУР, КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ АЗРФ, МОНИТОРИНГ, НАДЕЖНОСТЬ, СУБЖИВУЧЕСТЬ, УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ, БЕЗОПАСНОСТЬ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, БАЙЕСОВСКИЕ СЕТИ, ЭНТРОПИЯ

Объектом фундаментального, фундаментального ориентированного и прикладного исследования являются сложные нелинейные взаимозависимые системы ключевых и стратегических инфраструктур (электроэнергетические системы, промышленные, урбанистические и региональные инфраструктуры и др.), их комплексные и эмерджентные свойства, и разработка новых способов управления рисками их эксплуатации, в том числе, при возникновении событий типа *черный лебедь*, *король-дракон*.

Цель работы – создание цифровой методологии оптимального говернанса индустриальными, агропромышленными и муниципальными системами умных инфраструктур по локальным и планетарным критериям.

Методы проведения работы – теория толстохвостых распределений, байесовское сетевое моделирование, теория популяционной, кросс- и многомерной энтропии, в контексте зонтичной науки инфранетики и МИБИКС-конвергентных технологий.

Результатами НИР являются:

- энтропийный подход к оценке снижения ожидаемой продолжительности жизни при рождении от воздействия негативных факторов окружающей среды;
- применение к-статистики Каниадакиса к распределениям экстремальных ветровых нагрузок (на примере Арктического региона РФ);
- разработка математических методов идентификации редких событий типа *дефицит мощности* при расчете балансовой надежности ЭЭС;
- управленческая стратегия системного подхода прогнозирования аварий на критически важных объектах с использованием сетевого байесовского моделирования;
- вероятностно-энтропийная модель многомерного риска как инструментарий в задачах мониторинга состояния систем критичных инфраструктур.

Область применения – поддержка и подготовка принятия решений лицами, принимающими решения корпоративного, муниципального и регионального уровня, связанных с обеспечением нормативной надежности при проектировании стратегически важных объектов, подверженных воздействию исключительно редких стрессоров с плохо предсказуемыми последствиями (ЭЭС, уникальные объекты АЗРФ); оценкой снижения ожидаемой продолжительности жизни при рождении от воздействия негативных факторов окружающей среды, которая трактуется как субживучесть населения; прогнозированием параметров аварий критически важных объектов; оценкой риска при мониторинге состояния региональных систем инфраструктур.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1 Эントロπийный подход к оценке снижения ожидаемой продолжительности жизни при рождении от воздействия негативных факторов окружающей среды	10
1.1 Введение	10
1.2 Нагрузочная модель экологического риска	11
1.3 Эントロπийный подход в демографии	16
1.4 Влияние изменения интенсивности смертности на ожидаемую продолжительность жизни при рождении	22
1.5 Анализ изменения СОПЖ на примере Свердловской области.....	26
1.6 Заключение к разделу 1.....	32
2 Применение к-статистики Каниадакиса к распределениям экстремальных ветровых нагрузок (на примере Арктического региона)	33
2.1 Введение.....	33
2.2 Математическое описание к-статистики	35
2.3 Применение к-статистики к анализу экстремальных скоростей ветра	42
2.4 Заключение к разделу 2	49
3 Управленческая стратегия системного подхода прогнозирования аварий на критически важных объектах с использованием сетевого байесовского моделирования	50
3.1 Введение.....	50
3.2 Сетевое прогнозирование риска железнодорожного транспортирования опасных грузов по территории муниципального образования	51
3.2.1 Введение	51
3.2.2 Методология проведения исследования	53
3.2.3 Моделирование аварии на железной дороге при транспортировании опасных грузов 65	
3.2.4 Учет износа железнодорожного оборудования	68
3.2.5 Алгоритм реализации разработанной методики на примере железнодорожной аварии с участием опасных грузов	78
3.2.6 Диагностика и прогнозирование причин аварии.....	82

3.2.7	Тестирование модели в режиме диагностики.....	83
3.2.8	Тестирование модели в режиме «Sensitivity Analysis (Анализ чувствительности)»	89
3.2.9	Сравнительный анализ параметров чувствительности и диагностирования разработанной модели.....	94
3.2.10	Выводы	98
3.3	Оценка риска потенциально опасных объектов топливно-энергетического комплекса с использованием Байесовских сетей.....	99
3.3.1	Введение	99
3.3.2	Основные причины аварий.....	100
3.3.3	Моделирование сети Байеса для прогнозирования риска в резервуарном парке ТЭК	128
3.3.4	Алгоритм сетевого моделирования основных причин разрушения резервуара	129
3.4	Заключение к разделу 3	176
4	Разработка математических методов идентификации редких событий при расчете балансовой надежности ЭЭС	178
4.1	Введение.....	178
4.2	Непрерывная случайная нагрузка и детерминированная генерация	183
4.3	Аналитические методы определения вероятности и МО дефицита мощности	187
4.4	Выделение суточной неравномерности нагрузки	191
4.5	Взаимосвязь интервальных и точечных оценок вероятности и МО ДМ.....	191
4.6	Заключение к разделу 4	194
5	Вероятностно-энтропийная модель многомерного риска как инструментарий в задачах мониторинга состояния систем критических инфраструктур.....	196
5.1	Введение.....	196
5.2	Энтропийное моделирование сетевых структур	196
5.2.1	Введение	196
5.2.2	Постановка задачи энтропийного моделирования сетевых структур	198
5.2.3	Энтропийная мера взаимосвязи между несколькими подсистемами сетевой структуры	200
5.2.4	Энтропия в отдельном узле сетевой структуры	204
5.2.5	Риск каскадных сбоев в сетевых структурах	209
5.2.6	Выводы	222

5.3	Энтропийно-вероятностный мониторинг сложных систем	222
5.3.1	Введение	223
5.3.2	Материал и методы	224
5.3.3	Результаты исследования и их обсуждение.....	226
5.3.4	Выводы	232
5.4	Заключение к разделу 5	232
6	Разработка методологии прогнозирования ресурса узлов трения машин на основе моделирования изнашивания	234
6.1.	Введение.....	234
6.2.	Исследование свойств смазочного материала	235
6.3.	Физическое моделирование подшипника скольжения	238
6.4.	Математическое моделирование изнашивания подшипника скольжения	240
6.4.1.	Обоснование предельного износа подшипника	241
6.4.2.	Моделирование стендовых испытаний	244
6.4.3.	Построение карты скоростей изнашивания подшипника	249
6.4.4.	Статистическое моделирование ресурса ПС	250
6.5.	Безразборное восстановление топливного насоса высокого давления.....	252
6.6.	Заключение к разделу 6	253
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	254
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	255
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	268
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	317

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АЗРФ – Арктическая зона Российской Федерации
- БЛ – «белый лебедь»
- БН – балансовая надежность
- ВР – вероятностный ряд
- ГМХ – гидромеханическая характеристика
- ДАД – диастолическое артериальное давление
- ДВС – двигатель внутреннего сгорания
- ДМ – дефицит мощности
- ДР – «дракон»
- ИС – интенсивность смертности
- КВО – критически важный объект
- КИ – критическая инфраструктура
- МИБИКС – цифровая стохастическая Механика, Искусственный интеллект, Биотехнологии, Информатика, Когнитивные и Социальные науки
- ММК – метод Монте-Карло
- МО – математическое ожидание
- ОДУ – обыкновенное дифференциальное уравнение
- ОПО – опасный производственный объект
- ОРМ – оптимальный резерв мощности
- ПБ – промышленная безопасность
- ПБН – показатель балансовой надежности
- ПОО – потенциально опасный объект
- ПС – подшипник скольжения
- РВС – резервуар вертикальный стальной
- САД – систолическое артериальное давление
- СКО – среднеквадратичное (стандартное) отклонение
- СМ – смазочный материал
- СОПЖ – средняя ожидаемая продолжительность жизни
- ТНВД – топливный насос высокого давления
- ТЭК – топливно-энергетический комплекс
- ФД – функция дефицитности
- ФПВ – функция плотности вероятности
- ЧЛ – «черный лебедь»

ЧС – чрезвычайная ситуация

ЧСС – частота сердечных сокращений

ЧФ – человеческий фактор

ЭЭС – электроэнергетическая система

CPT – Conditional Probability Table (таблица условных вероятностей)

QRA – Quantitative Risk Assessment (количественная оценка риска)

Обозначения к разделу 4

T	Расчетный период времени
T_k	Подынтервал интервала T
m_t^L, σ_t^L	МО и СКО мощности нагрузки в момент времени t
$\mathcal{P}_k, m_k, \lambda_k,$ τ_k, ω_k	Соответственно: вероятность, МО, интенсивность, МО длительности и частота ДМ на интервале k ; при $k = t$ – точечные, а при $k = T$ – интервальные ПН
$p_{j,t}^S$	Вероятность состояния j системы S ($S = G$ – генерация; $S = L$ – нагрузка) в момент времени t
$F(x, m, \sigma)$	Функция распределения случайной величины с МО m и СКО σ
$\bar{F}(x, m, \sigma)$	Дополнительная функция распределения, $\bar{F}(x, m, \sigma) = 1 - F(x, m, \sigma)$
S_k	Интервал неизменности вероятностного состояния системы
p_k	Вероятность состояния S_k
$[\psi_{s,k}]$	Матрица оперативного резерва мощности
$\mathcal{F}_{def,T}(R)$	Интервальная вероятность дефицита мощности
ψ	Функция дефицитности
φ	Случайная составляющая функции дефицитности
y_0	Удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям
$m_{def,T}$	Интервальное МО дефицита мощности
$G_{вкл}; G_{уст}$	Текущая включенная и установленная мощность генерирующей системы
n_{new}	Число дополнительных энергоблоков
$L; L_{max}$	Текущая и максимальная на расчетном периоде мощность нагрузки
R	Резерв мощности в ЭЭС, $R = G_{уст} - L_{max}$
$\Delta L; \delta L$	Текущее и прогнозное отклонение нагрузки от максимальной на периоде
$\Delta \mathcal{E}$	Суммарный на периоде недоотпуск электроэнергии
τ_t	Длительность интервала неизменности вероятностного состояния системы.
$k_{T/h}^{m/F}$	Коэффициент перехода от вероятности на часовом интервале h к МО ДМ на расчетном интервале T

ВВЕДЕНИЕ

Данный отчет содержит результаты НИР, проведенных коллективом НИЦ «НиР БСМ» УрО РАН в 2022 г. Эти результаты получены на основании оценки современного состояния решаемой проблемы, ее актуальности и необходимости получения результата, новизна, форма и структура которого соответствуют остроте момента.

Полученные результаты являются логическим продолжением исследований, проводимых в рамках разработанной НИЦ УрО РАН концепции зонтичной науки инфранетики и МИБИКС-конвергентных технологий.

Актуальность и практическая ценность фундаментальных и прикладных исследований в области безопасности критически важных инфраструктур, потенциально опасных объектов огромна: уменьшение рисков их эксплуатации приводит к увеличению средней ожидаемой продолжительности жизни населения в добром здравии и увеличению регионального валового продукта. А это и есть императивные цели государства, региона, муниципалитета, корпорации.

1 Энтропийный подход к оценке снижения ожидаемой продолжительности жизни при рождении от воздействия негативных факторов окружающей среды

1.1 Введение

Большинство ученых и исследователей считает, что хвосты распределений случайных величин, участвующих в вероятностном анализе физических инфраструктур (нагрузки и воздействия, погрешности изготовления узлов и конструкций, свойства материалов изделия и др.), несущественны и ими в обычной практике можно пренебречь,

Согласно Указа Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 перед органами власти субъектов Федерации поставлена задача достижения к 2024 г. целевых показателей: увеличения ожидаемой продолжительности жизни населения до 78 лет; снижения показателей смертности населения по причинам нарушения здоровья – системы кровообращения (до 450 случаев на 100 тыс. населения), новообразований, в том числе от злокачественных (до 185 случаев на 100 тыс. населения).

Ожидаемая продолжительность жизни населения – это показатель качества не только системы здравоохранения, но и условий жизнедеятельности человека.

Анализ динамики численности населения, подверженного воздействию негативных экологических факторов (загрязнение почвы, воды, атмосферного воздуха), за последние годы выявил тревожную тенденцию ее сокращения [1].

Со временем происходит снижение ассимиляционного потенциала окружающей среды – способности экосистемы нивелировать негативные воздействия хозяйственной деятельности, особенно в субъектах с высокой плотностью населения, застроек, большого количества автомобильных дорог и автотранспорта [2]. При экспозиции комплекса химических факторов загрязнения атмосферного воздуха, транспортного шума, негативных факторов образа жизни, неприемлемый риск здоровью человека формируется к возрасту 47 лет, а высокий риск – к 58 годам [3]. Это обусловлено, прежде всего, возрастным снижением адаптационных возможностей и способности организма приспособляться к изменяющимся условиям окружающей среды [4]. В докладе Всемирной организации здравоохранения сделан вывод о том, что экологические риски причиняют наибольший урон детям раннего возраста до пяти лет и пожилым в возрасте 50–75 лет [5].

Согласно проведенному анализу [1], суммарное влияние экологического фактора объясняет 87 % вариации ожидаемой продолжительности жизни населения.

1.2 Нагрузочная модель экологического риска

Обострение экологической ситуации, обусловленное возрастающими масштабами загрязнения окружающей среды, уже давно выдвинуло в разряд первоочередных задачу разработки надежных методов прогнозирования возможных последствий воздействия разнообразных физических и химических факторов на человека и другие объекты живой природы. Ее актуальность с особой силой выявилась после крупных экологических катастроф последнего времени и в особенности после аварии на Чернобыльской АЭС.

В экспериментах по изучению динамики смертности млекопитающих, как правило, измеряют три статистические биометрические функции [4]: вероятность длительности жизни $S(t)$, плотность вероятности длительности жизни $f(t)$ и скорость смертности $\lambda(t)$. Последнюю функцию называют также интенсивностью или силой смертности. Функция $S(t)$ определяет отношение числа особей $n(t)$, доживших до возраста t , к исходному их количеству N : $S(t) = \frac{n(t)}{N}$. Поэтому в демографии используют еще один термин для ее обозначения — функция дожития. Биометрическая функция $f(t)$ характеризует скорость уменьшения числа особей в результате гибели в возрасте t , отнесенную к исходному их количеству: $f(t) = -\frac{dn(t)}{dt} / N$. Функция $\lambda(t)$ описывает скорость уменьшения числа особей в результате гибели в возрасте t , отнесенную к числу особей, доживших до возраста t : $\lambda(t) = -\frac{dn(t)}{dt} / n(t)$. Биометрические функции плотность вероятности $f(t)$ и вероятность $S(t)$ длительности жизни связаны с функцией скорости смертности $\lambda(t)$ следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \frac{f(t)}{S(t)}; \\ S(t) &= \exp\left(-\int_0^t \lambda(u) du\right).\end{aligned}\tag{1.1}$$

По определению интенсивность смертности $\lambda(x)$ (синоним сила смертности) — это вероятность наступления смерти в течение бесконечно малого интервала в возрасте x , отнесенная к длительности этого интервала

$$\lambda(t) = -\frac{1}{S(t)} \frac{dS}{dt}. \quad (1.2)$$

Основной закономерностью, выявляемой опубликованными данными о смерти животных и людей, является экспоненциальное или близкое к нему увеличение $\lambda(x)$ с возрастом у половозрелых особей. Эта закономерность, впервые подмеченная Б. Гомперцем при изучении продолжительности жизни людей [5], впоследствии была подтверждена на многих биологических видах, сильно различающихся анатомо-физиологическими характеристиками, условиями и продолжительностью жизни. Согласно закону смертности Гомперца

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) e^{\alpha_0(t-t_0)}, \quad (1.3)$$

где

$\lambda(t)$ – интенсивность смертности в возрасте t ;

$\lambda(t_0)$ – начальный уровень смертности (обратная величина $\lambda^{-1}(t_0)$ характеризует начальный уровень «жизнеспособности»);

α_0 – скорость прироста смертности с возрастом или интенсивность износа жизнеспособности (проще говоря, скорость старения, отражающая скорость нарастания смертности с возрастом).

Б. Гомпертц рассматривал смертность как величину, обратную жизнеспособности – способности противостоять всей совокупности разрушительных процессов.

Гомперц также предположил, что скорость уменьшения жизнеспособности во времени снижается пропорционально ей самой. Для смертности (величины, обратной жизнеспособности) такое предположение соответствует экспоненциальному нарастанию с возрастом. Он также предполагал, что наряду со смертностью, экспоненциально растущей с возрастом, существует компонента смертности, не зависящая от возраста, то есть смерть является следствием двух причин [6]: 1) случайная – без предшествующей предрасположенности к смерти или физическому износу, 2) износ или повышенная неспособность противостоять разрушению.

Иначе говоря, наряду с экспоненциально растущей компонентой смертности, обусловленной старением, должна существовать не зависящая от возраста компонента, связанная с экстремальными ситуациями.

В 1860 г. другой специалист по страхованию жизни — У. Мейкхем добавил в формулу Гомперца не зависящее от возраста слагаемое [7], которое получило название параметра Мейкхема. Таким образом, появился закон Гомперца–Мейкхема (Г–М):

$$\lambda(t) = M + \lambda(t_0) e^{\alpha_0(t-t_0)}, \quad (1.4)$$

где

M – коэффициент Мейкхема, характеризующий вклад в смертность воздействий, эффект от которых не зависит от возраста (случайная смертность).

Закон Мэйкхама наиболее подходит для изучения процесса смертности человека, так как в нем учитывается, что для малых возрастов преобладающую роль в смертности играют несчастные случаи, а с увеличением возраста их роль ослабевает. Модель наилучшим образом описывает динамику смертности человека в диапазоне возраста 20–80 лет. В области большего возраста смертность не возрастает так быстро, как предусматривается этим законом смертности. Исторически смертность человека до 1950-х гг. была в большей мере вызвана независимым от времени компонентом закона смертности (параметром Мейкхема), тогда как зависимый от возраста компонент (Гомпертца) почти не изменялся. После 1950-х гг. картина изменилась, что привело к снижению смертности в позднем возрасте и сглаживанию кривой выживания.

В защищённых средах, где внешние причины смерти отсутствуют (в лабораторных условиях, в зоопарках или для людей в развитых странах) независимый от возраста компонент часто становится малым, и формула (1.4) упрощается до функции Гомпертца (1.3).

Ниже приведена математическая нагрузочная модель радиационного риска, первоначально разработанная в применяемая для расчета и нормирования радиационного риска при космических полетах [8–12]. Данная модель, по сути, не является специфически радиационной, она основана на общих предположениях, не накладывающих принципиальных ограничений ни на тип воздействующего фактора, режим и интенсивность воздействия, ни на биологический вид. Поэтому ее можно распространить и на другие химические вещества и физические факторы, присутствующие в окружающей среде, помимо радиационной нагрузки [4].

Представляется весьма проблематичным установить прямую количественную зависимость вероятности гибели индивидуума от показателей состояния систем и тканей организма под действием неблагоприятных экологических факторов на допустимом по современным нормам уровне. Поэтому необходимо иметь связь математической модели возрастной зависимости интенсивности смертности с математическими моделями, негативных экологических эффектов (в том числе и радиобиологических). Причем такую связь, которая по своей форме была бы неспецифической по отношению к ионизирующему излучению. Эта связь осуществляется с помощью вспомогательной функции — интенсивности нагрузки [9, 11, 12].

Рассмотрим однородную популяцию взрослых особей, находящуюся в некоторых заданных условиях. Факторы внешней и внутренней среды формируют нагрузку на живой организм, проявляющуюся в виде локальных или генерализованных отклонений анатомно-физиологических показателей состояния организма от нормы. В результате возникают некоторые повреждения (дефекты), снижающие надежность (жизнеспособность) организма. Очевидно, что старение организма с возрастом (интенсивность смертности) при воздействии неблагоприятных факторов окружающей среды (то есть накопление повреждений (дефектов), снижающих жизнеспособность организма) будет зависеть лишь от экспоненциальной составляющей интенсивности смертности, т.е. коэффициент Мейкхема M в этом случае не влияет на смертность.

Исходной величиной, через которую определяют экологический риск и сокращение продолжительности жизни, является интенсивность смертности (ИС). Считается, что в любом возрасте интенсивность смертности зависит как от нагрузки на организм, так и состояния самого организма. Для описания надежности систем организма (состояния организма) вводят величину $\rho(t)$, придав ей смысл вероятности преодоления единичной нагрузки в возрасте t в условиях воздействия вредного фактора. Предполагается, что интенсивность смертности, т.е. вероятность умереть в единицу времени в возрасте x , дожив до этого возраста, равна произведению нагрузки $h(t)$, которую испытывает организм, и вероятности $\rho(t)$ того, что организм погибает в результате преодоления единичной нагрузки [9, 11, 12]

$$\lambda(t) = h(t)\rho(t). \quad (1.5)$$

Общепризнанная фундаментальность экспоненциального (или почти экспоненциального) роста ИС, характерного для всех животных (разумеется, со своими

значениями α_0), делает целесообразным анализ наклона графика $\lambda(t)$ в логарифмическом масштабе, т. е. анализ величины

$$\alpha(t) = \frac{d}{dt} \ln \lambda(t) \quad (1.6)$$

и диктует необходимость моделирования именно ее зависимости от воздействия вредных факторов на организм человека.

В предложенной модели принято, что для слабых воздействий [12]

$$\alpha(t) = \alpha_0 \frac{h(t)}{h(t_0)}. \quad (1.7)$$

Если нагрузка $h(t)$ постоянна, т.е. $h(t) = h(t_0)$, то получаем модель Гомперца. При анализе роли отдельной техногенной нагрузки (например, радиационной), ее считают дополнительной и обозначают как $\Delta h(x)$ (дополнительный компонент нагрузки, обусловленный воздействием рассматриваемого вредного фактора), т.е. совокупная нагрузка на организм $h(t) = h(t_0) + \Delta h(t)$. В таком случае

$$\lambda(t, \Delta h) = \lambda(t_0) \exp \left(\alpha_0 (t - t_0) + \alpha_0 \int_{t_0}^t \frac{\Delta h(\tau)}{h(t_0)} d\tau \right), \quad (1.8)$$

т.е. ИС увеличивается на множитель $\exp \left(\alpha_0 \int_{t_0}^t \frac{\Delta h(\tau)}{h(t_0)} d\tau \right)$.

Величину

$$\Delta t(t_0, t) = \int_{t_0}^t \frac{\Delta h(\tau)}{h(t_0)} d\tau \quad (1.9)$$

называют *дополнительным старением*, обусловленным воздействием рассматриваемого вредного фактора. В этом случае результат воздействия некоторого фактора, например, ионизирующего излучения, формально записывается как

$$\lambda(t, \Delta h) = \lambda(t_0) \exp(\alpha_0(t - t_0 + \Delta t(t_0, t))). \quad (1.10)$$

Предложенная выше модель дает возрастание ИС, которое наблюдается только при слабых длительных воздействиях, в то время как при острых воздействиях, вызывающих частичную гибель в ближайшее время ИС резко возрастает и затем спадает. Подробно этот вопрос освещен в работах [9, 11, 12].

Далее рассмотрено как влияет изменение параметров ИС $\lambda(t_0)$, α_0 в модели Гомперца на среднюю ожидаемую продолжительности жизни при рождении. Эта задача решается с помощью энтропийного подхода.

1.3 Энтропийный подход в демографии

Возраст на момент смерти является неопределенной случайной величиной. В связи с этим можно процитировать Thomas Paine – “Nothing, they say is more certain than death, and nothing more uncertain than the time of dying”. Тем не менее, известно, что риск смерти зависит от многих факторов: окружающая среда, возраст, пол, генетика, образ жизни и др. Эти знания получены в результате анализа конкретных групп людей и полученная информация представляется в таблицах дожития, которые дают полное описание смертности в рассматриваемой популяции. Статистика таблиц смертности (дожития) дает представление об ожидаемой продолжительности жизни в зависимости от возрастных коэффициентов смертности. Однако среднестатистический человек обычно не имеет представление о риске смерти относительно своего возраста, а также о скорости, с которой этот риск увеличивается по мере взросления или ухудшения экологической обстановки. Были предложены различные меры для количественной оценки неопределенности смерти, в том числе и концепция энтропии. Наиболее распространенной является энтропия Кейфитца (Keyfitz) [13].

Эта энтропия была предложена [13] для измерения изменения продолжительности жизни, которая представляет собой нормализованную версию энтропии Шеннона и может быть интерпретирована как «эластичность» продолжительности жизни относительно изменения интенсивности смертности.

Энтропия Кейфитца используется для количественной оценки влияния уровня смертности на ожидаемую продолжительность жизни. Более высокая энтропия означает, что ожидаемая продолжительность жизни более чувствительна к изменениям уровня

смертности, и наоборот. Энтропия Кейфитца показатель, измеряющий чувствительность ожидаемой продолжительности жизни к изменению уровня смертности.

Пусть интенсивность смертности $\lambda(t)$ изменяется (увеличивается) пропорционально на постоянную величину $\Delta > 0$ для всех возрастов, то есть *новая интенсивность смертности* $\lambda_{\Delta}(t) = (1 + \Delta)\lambda(t) = \lambda(t) + \Delta\lambda(t)$. Тогда вероятность выживания в возрасте t , обусловленная увеличением ИС

$$S_{\Delta}(t) = e^{-\int_0^t (1+\Delta)\lambda(u)du} = \left(e^{-\int_0^t \lambda(u)du} \right)^{(1+\Delta)} = S^{(1+\Delta)}(t). \quad (1.11)$$

Среднее ожидаемое остаточное время жизни при рождении определяется по формуле

$$e_0 = \int_0^{+\infty} S(t) dt. \quad (1.12)$$

Тогда среднее ожидаемое остаточное время жизни $e_{\Delta}(0)$ при рождении, обусловленное увеличением интенсивности смертности

$$e_0(\Delta) = \int_0^{+\infty} S^{1+\Delta}(t) dt. \quad (1.13)$$

Предположим, что относительное увеличение смертности вызовет относительное снижение ожидаемой продолжительности жизни при рождении. В таком случае, чтобы измерить это уменьшение, необходимо вычислить

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = \int_0^{+\infty} \frac{dS^{1+\Delta}(t)}{d\Delta} dt = \int_0^{+\infty} S^{1+\Delta}(t) \ln S^{1+\Delta}(t) dt. \quad (1.14)$$

При достаточно малых Δ

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{e_0(\Delta) - e_0}{\Delta}. \quad (1.15)$$

Тогда

$$\frac{\Delta e_0}{e_0} \approx \Delta \left. \frac{de_0(\Delta)}{e_0 d\Delta} \right|_{\Delta=0} = \Delta \left(\frac{\int_0^{+\infty} S(t) \ln S(t) dt}{\int_0^{+\infty} S(t) dt} \right). \quad (1.16)$$

Так как $0 \leq S(t) \leq 1$, то в (1.16) отношение в скобках отрицательно, что подтверждает предположение, что относительное увеличение смертности должно приводить к относительному уменьшению ожидаемой продолжительности жизни.

Выражение

$$H_K = \frac{-\int_0^{+\infty} S(t) \ln S(t) dt}{\int_0^{+\infty} S(t) dt} \quad (1.17)$$

известно как *энтропия Кейфитца или энтропия популяции* (таблицы дожития).

Таким образом,

$$\frac{\Delta e_0}{e_0} \approx -H_K \Delta. \quad (1.18)$$

Выражение (1.18) позволяет следующую интерпретацию для H_K [14]: небольшое увеличение Δ уровня смертности во всех возрастных группах приводит к пропорциональному уменьшению ожидаемой продолжительности жизни примерно в H_K раз от Δ . Например, при $H_K = 0.5$ и когда уровень смертности во всех возрастных группах увеличивается на 1 %, СОПЖ уменьшается на 0.5 % [13]. Таким образом, H_K измеряет, как пропорциональное изменение интенсивности смертности влияет на относительное изменение ожидаемой продолжительности жизни населения.

Рассмотрим граничные значения величины H_K . Если $H_K = 0$, то вся смертность сосредоточена в одном возрасте. Если, например, все доживают до 70 лет, а затем умирают, то $S(t) = 1$ для всех возрастов до 70 лет, а ее логарифм будет равен нулю. С другой стороны, если смертность λ одинакова для всех возрастов, то

$$S(t) = e^{-\lambda t}, \quad e_0 = \frac{1}{\lambda}.$$

В таком случае

$$\frac{\Delta e_0}{e_0} \approx -\Delta,$$

т.е. $H = 1$ и пропорциональное изменение интенсивности смертности приводит к такому же изменению продолжительности жизни (но в противоположном направлении). Например, при $H = 1$, когда смертность во всех возрастных группах увеличивается на 1 % ожидаемая продолжительность жизни уменьшается на 1 %. При $H = 0.5$, $S(t)$ будет линейной функцией.

С другой стороны, имея изменение СОПЖ при рождении, можно оценить соответствующую величину Δ изменения интенсивности смертности. Рассмотрим отношение [13]

$$g(\Delta) = \frac{e_0(\Delta)}{e_0} = \frac{\int_0^{+\infty} S^{1+\Delta}(t) dt}{\int_0^{+\infty} S(t) dt}, \quad (1.19)$$

как функцию величины Δ .

Раскладывая это отношение в ряд Тейлора

$$g(\Delta) = g(0) + g'(0)\Delta, \quad (1.20)$$

и принимая во внимание, что $g'(0) = \frac{de_0(\Delta)}{e_0 d\Delta} = -H_K$, получим

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} \approx 1 - H_K \Delta. \quad (1.21)$$

Например, если СОПЖ при рождении увеличивается на 10 %, а $H_K = 0.2$, то интенсивность смертности уменьшится на 50 %:

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} = 1.10 = 1 - 0.2\Delta \Rightarrow \Delta = -0.50.$$

Таким образом, популяция, которая имеет СОПЖ при рождении на 10 % больше, будет иметь интенсивность смертности наполовину меньше.

Следует отметить, что при уменьшении СОПЖ при рождении на 10 % интенсивность смертности увеличится на ту же процентную величину, т.е. на 50 %. Таким образом, при увеличении или уменьшении СОПЖ интенсивность смертности будет уменьшаться или увеличиваться на одинаковую величину соответственно, но с противоположным знаком.

Функция

$$\Lambda(t) = -\ln S(t) = \int_0^t \lambda(u) du \quad (1.22)$$

называется *кумулятивной функцией риска*.

Тогда энтропию Кейфитца можно переписать через кумулятивную функцию риска

$$H_K = \frac{\int_0^{+\infty} S(t) \Lambda(t) dt}{\int_0^{+\infty} S(t) dt}. \quad (1.23)$$

Числитель $\int_0^{+\infty} S(t) \Lambda(t) dt$ равен *среднему количеству лет жизни, потерянных из-за смерти*.

Перепишем модель закон Гомперца–Мейкхема в виде

$$\lambda(t) = M + \beta e^{\alpha t}.$$

Нетрудно показать, что энтропия Кейфитца в таком случае [15] равна

$$H_K = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{e_0} - (M + \beta) \right) + M\bar{t} = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\alpha} + M\bar{t}, \quad (1.24)$$

где

$\bar{\lambda} = \frac{1}{e_0}$ – средний уровень смертности стационарной популяции;

$\lambda_0 = M + \beta$ – начальный уровень смертности;

\bar{t} – средний возраст стационарной популяции:

$$\bar{t} = \frac{1}{e_0} \int_0^{+\infty} tS(t) dt. \quad (1.25)$$

Согласно [16, 17], энтропия Кейфитца может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} H_K &= \frac{-\int_0^{+\infty} S(t) \ln S(t) dt}{\int_0^{+\infty} S(t) dt} = \frac{-\int_0^{+\infty} \lambda(t) S(t) e(t) dt}{\int_0^{+\infty} S(t) dt} = \\ &= \frac{-\int_0^{+\infty} f(t) e(t) dt}{\int_0^{+\infty} S(t) dt} = -\frac{e^\dagger}{e_0}, \end{aligned} \quad (1.26)$$

где

$e(t)$ – СОПЖ в возрасте t , $e(t) = \frac{1}{S(t)} \int_t^{+\infty} S(\tau) d\tau$.

Поскольку $\int_0^{+\infty} f(t) dt = 1$, величину e^\dagger можно рассматривать как средневзвешенное

значение ожидаемой продолжительности жизни в возрасте t . На самом деле она обозначает среднее количество лет будущей жизни, потерянное из-за наблюдаемых смертей или среднее количество лет, которые человек мог бы прожить, если бы у него был второй шанс на жизнь. Рассматривается как мера неравенства продолжительности жизни.

1.4 Влияние изменения интенсивности смертности на ожидаемую продолжительность жизни при рождении

Рассмотрим более общий случай. Предположим, что интенсивность смертности $\lambda(t)$ в возрасте t лет увеличивается за счет величины Δ таким образом, что выполняется условие

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} \lambda(t, \Delta) = \lambda(t, 0) = \lambda(t), \quad \forall t, \quad (1.27)$$

где

$\lambda(t, \Delta)$ – новая, возмущенная интенсивность смертности.

Как было отмечено выше, чтобы вычислить относительное уменьшение СОПЖ при рождении необходимо вычислить

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{e_0(\Delta) - e_0}{\Delta}. \quad (1.28)$$

Разложим интенсивность смертности в ряд Тейлора, используя его первые два члена

$$\lambda(t, \Delta) \approx \lambda(t) + \Delta \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(t, 0). \quad (1.29)$$

В таком случае

$$S(t, \Delta) \approx e^{-\int_0^t \lambda(u) du - \Delta \int_0^t \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(u, 0) du} = S(t) e^{-\Delta \int_0^t \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(u, 0) du}. \quad (1.30)$$

Применяя разложение Тейлора к экспоненте, получим

$$S(t, \Delta) \approx S(t) \left(1 - \Delta \int_0^t \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(u, 0) du \right). \quad (1.31)$$

Интегрируя это выражение, найдем новую СОПЖ при рождении

$$e_0(\Delta) \approx e_0 - \Delta \int_0^{+\infty} S(t) \int_0^t \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(u, 0) du dt. \quad (1.32)$$

Применяя метод интегрирования по частям, получим

$$e_0(\Delta) \approx e_0 - \Delta \int_0^{+\infty} \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(t, 0) e(t) S(t) dt, \quad (1.33)$$

где

$$(e(t)S(t))' = -S(t);$$

$$\int_0^t \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(u, 0) du = \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(t, 0).$$

Тогда из (1.33) следует, что

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{e_0(\Delta) - e_0}{\Delta} = - \int_0^{+\infty} \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta}(t, 0) e(t) S(t) dt. \quad (1.34)$$

Рассмотрим, как будет изменяться величина $\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta}$ при различных видах возмущения интенсивности смертности [18].

1. *Аддитивный рост*: $\lambda(t, \Delta) = \lambda(t) + \Delta$. В таком случае

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = - \int_0^{+\infty} e(t) S(t) dt = - \int_0^{+\infty} t S(t) dt = -\bar{t}e_0, \quad (1.35)$$

где

\bar{t} – средний возраст стационарной популяции (см. формулу (1.25)).

Выражение (1.35) получено методом интегрирования по частям, при использовании уравнения $(e(t)S(t))' = -S(t)$.

Таким образом, при аддитивном изменении интенсивности смертности, относительное изменение СОПЖ при рождении зависит от двух средних величин: среднего возраста живущих (в стационарной популяции), и невозмущенной СОПЖ, эквивалентной среднему возрасту при смерти.

2. *Пропорциональный рост*: $\lambda(t, \Delta) = (1 + \Delta)\lambda(t)$. Такой случай был рассмотрен выше при описании энтропии Кейфитца, то есть

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = -\int_0^{+\infty} \lambda(t)S(t)e(t)dt = -\int_0^{+\infty} f(t)e(t)dt = -e^\dagger. \quad (1.36)$$

Таким образом, если возмущенная интенсивность смертности в каждом возрасте увеличивается пропорционально невозмущенной интенсивности, то относительное изменение СОПЖ связано с неравенством в продолжительности жизни, которое измеряется средним количеством лет будущей жизни e^\dagger , потерянным из-за наблюдаемых смертей.

3. *Линейный рост*: $\lambda(t, \Delta) = \lambda(t) + \Delta t$. В таком случае

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = -\int_0^{+\infty} tS(t)e(t)dt = -e_0(Cov_s(t, e) + \bar{t}^2), \quad (1.37)$$

где

\bar{t} – средний возраст стационарной популяции;

$Cov_s(t, e)$ – ковариация:

$$Cov_w(u, v) = \frac{\int_0^{+\infty} u(t)v(t)w(t)dt}{\int_0^{+\infty} w(t)dt} - \frac{\int_0^{+\infty} u(t)w(t)dt}{\int_0^{+\infty} w(t)dt} \cdot \frac{\int_0^{+\infty} v(t)w(t)dt}{\int_0^{+\infty} w(t)dt}.$$

Поскольку линейный рост, в отличие от аддитивного, по разному влияет на смертность в каждом возрасте, то изменение СОПЖ зависит уже не только от величины \bar{t} (как при аддитивном росте), а также от ковариации, которая отражает возрастную неоднородность возмущенной интенсивности смертности.

4. *Экспоненциальный рост*: $\lambda(t, \Delta) = \lambda(t)e^{\Delta t}$, что соответствует рассмотренной выше нагрузочной модели. В таком случае

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = -\int_0^{+\infty} t d(t) e(t) dt = -(\text{Cov}_d(t, e) + e_0 e^\dagger). \quad (1.38)$$

Заметим, что этот случай эквивалентен возмущению вида $\lambda(t, \Delta) = (1 + \Delta t) \lambda(t)$, поскольку $e^{\Delta t} \approx 1 + \Delta t$. Таким образом, экспоненциальное изменение интенсивности смертности является в некотором смысле вариантом пропорционального роста, но воздействующего на каждый возраст по-разному, поэтому результирующее относительное изменение СОПЖ состоит из двух слагаемых, охватывающих разные аспекты изменения смертности.

Рассмотрим вышеизложенное на примере закона смертности Гомперца–Мэйкхема. Проанализируем влияние аддитивного изменения параметров закона M, α, β на СОПЖ при рождении.

1) *Изменение уровня начальной смертности:* $\beta(\Delta) = \beta + \Delta$. В таком случае

$$\lambda(t, \Delta) = M + \beta e^{\alpha x} + \Delta e^{\alpha x} = \lambda(t) + \Delta e^{\alpha t} = \lambda(t) + \Delta \left(\frac{\lambda(t) - M}{\beta} \right); \quad (1.39)$$

$$\frac{d\lambda}{d\Delta}(t, 0) = \frac{\lambda(t) - M}{\beta}.$$

При $\beta \neq 0$ будем иметь

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = -\frac{1}{\beta} \left[\int_0^{+\infty} \lambda(t) e(t) S(t) dt - M \int_0^{+\infty} e(t) S(t) dt \right] = \frac{1}{\beta} [M \bar{t} e_0 - e^\dagger]. \quad (1.40)$$

Изменение продолжительности жизни за счет аддитивного увеличения начальной смертности модели Гомперца–Мейкхема представляет собой линейную комбинацию пропорционального и аддитивного изменения интенсивности смертности в общем случае.

2) *Изменение скорости прироста смертности:* $\alpha(\Delta) = \alpha + \Delta$. В таком случае

$$\lambda(t, \Delta) = M + \beta e^{\alpha t} e^{\Delta t} = \lambda(x) + \Delta e^{\alpha t} = (\lambda(t) - M) e^{\Delta t} + M; \quad (1.41)$$

$$\frac{d\lambda}{d\Delta}(t, 0) = t(\lambda(t) - M).$$

С другой стороны

$$\lambda'(t) = \lambda(t, \Delta) = \alpha \beta e^{\alpha t} = \alpha (\lambda(t) - M) \Rightarrow \lambda(t) - M = \frac{\lambda'(t)}{\alpha}.$$

При $\alpha \neq 0$ будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{d\Delta}(t, 0) &= t \frac{\lambda'(t)}{\alpha}; \\ \frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} &= -\frac{1}{\alpha} \int_0^{+\infty} t \lambda'(t) e(t) S(t) dt = -\frac{1}{\alpha} \left[\int_0^{+\infty} t d(t) dt - \int_0^{+\infty} e(t) d(t) dt \right] = \\ &= \frac{1}{\alpha} (e^\dagger - e_0). \end{aligned} \quad (1.42)$$

Это выражение было получено методом интегрирования по частям, при использовании уравнения $(te(t)S(t))' = (e(t) - t)S(t)$.

Это соотношение является частным случаем результата, полученного при изменении интенсивности смертности вида $\lambda(t, \Delta) = \lambda((1 + \Delta)t)$, которое в случае закона Гомперца–Мейкхема соответствует аддитивному изменению параметра α .

3. *Изменение независимого от возраста параметра M , характеризующего смерть от случайных причин:* $M(\Delta) = M + \Delta$. Поскольку M является просто аддитивным членом, не зависящим от возраста, то это является случаем аддитивного роста интенсивности смертности

$$\frac{de_0(\Delta)}{d\Delta} = -\bar{t}e_0. \quad (1.43)$$

1.5 Анализ изменения СОПЖ на примере Свердловской области

Для расчета популяционной энтропии, необходимо иметь закон смертности, позволяющий определить вид интенсивности смертности. Предположим, что смертность в Свердловской области изменяется по закону Гомперца–Мейкхема. На основе проанализированной таблицы смертности за 2020 г. городского населения Свердловской области были оценены параметры этого закона, которые приняли следующие значения:

$$M = 4.78 \cdot 10^{-4}, \quad \alpha = 2.65 \cdot 10^{-4}, \quad \beta = 7.06 \cdot 10^{-2}.$$

Согласно (1.24), энтропия Кейфитца при законе смертности Гомперца–Мейкхема, для нашего примера будет равна

$$H_K = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\alpha} + M\bar{t} \approx -0.21,$$

где

$\bar{\lambda}$ – средний уровень смертности стационарной популяции,

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{e_0} = \frac{1}{69.95} = 0.014;$$

λ_0 – начальный уровень смертности, $\lambda_0 = M + \beta = 7.44 \cdot 10^{-4}$;

\bar{t} – средний возраст стационарной популяции, $\bar{t} = \frac{1}{e_0} \int_0^{+\infty} tS(t) dt \approx 37.48$.

Таким образом, получили, что когда уровень смертности во всех возрастных группах увеличивается на 1 %, СОПЖ уменьшается на 0.21 %. Или, например, когда уровень смертности во всех возрастных группах увеличивается на 10 %, СОПЖ уменьшается на 2.1 %.

Рассмотрим, как будет изменяться интенсивность смертности при изменении (уменьшении и увеличении) СОПЖ при рождении. Для этого построим график функции

$$\Delta = \frac{1 - \frac{e_0(\Delta)}{e_0}}{H_K} = \frac{1 - \frac{e_0(\Delta)}{69.95}}{0.21}.$$

На рисунке 1.1 представлено процентное увеличение

(уменьшение) Δ в зависимости от процентного уменьшения (увеличения) СОПЖ при рождении.

СОПЖ при рождении составляет $69.95 \approx 70$ лет. Таким образом, если СОПЖ при рождении увеличится на 10 %, то есть на 7 лет, то интенсивность смертности снизится почти на половину (на 47,65 %). То же самое будет и при уменьшении СОПЖ – интенсивность смертности увеличится почти на половину (на 47,65 %). При увеличении (уменьшении) СОПЖ на 50 % (то есть популяция будет в среднем доживать до 105 (35) лет), интенсивность смертности уменьшится (увеличится) на 238.27 %.

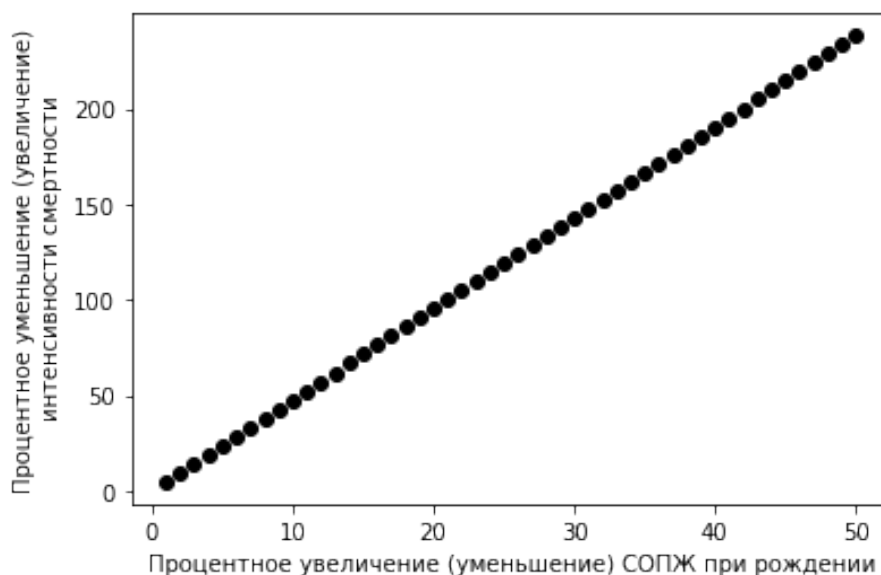


Рисунок 1.1 – Процентное увеличение (уменьшение) Δ в зависимости от процентного уменьшения (увеличения) СОПЖ при рождении

Рассмотрим как будет влиять процентное увеличение параметров закона Гомперца–Мейкхема на СОПЖ при рождении.

1) *Изменение уровня начальной смертности: $\beta(\Delta) = \beta + \Delta$.*

В таком случае

$$g'(0) = \frac{de_0(\Delta)}{e_0 d\Delta} = \frac{1}{\beta} \left[M\bar{t} - \frac{e^\dagger}{e_0} \right] = \frac{1}{\beta} [M\bar{t} - H_K].$$

Тогда

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} = 1 + \frac{1}{\beta} [M\bar{t} - H_K] \Delta.$$

В нашем случае $\Delta = k\beta$, где k изменяется от 0.01 (1 %) до 1 (100 %). В таком случае

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} = 1 + [M\bar{t} - H_K] k.$$

График функции процентного уменьшения СОПЖ при рождении в зависимости от процентного увеличения уровня возрастной смертности представлен на рисунке 1.2.

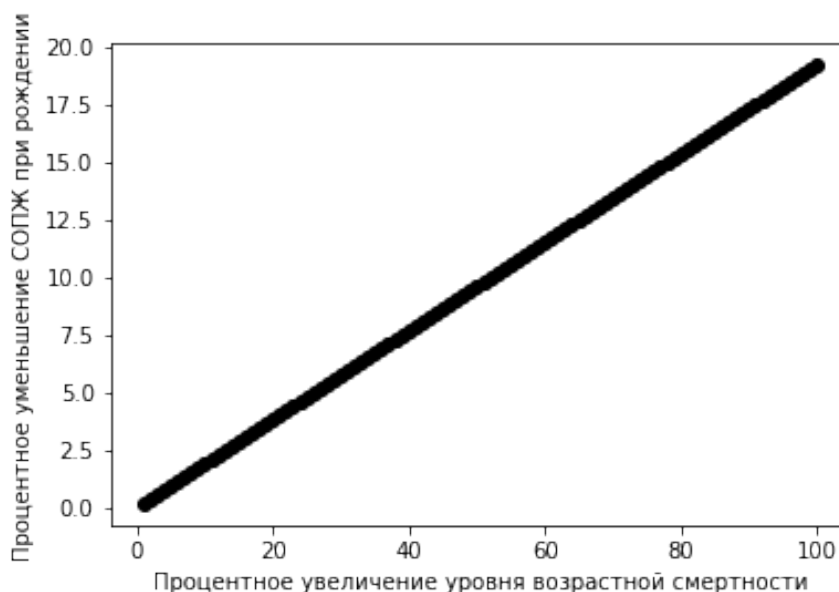


Рисунок 1.2 – Процентное уменьшение СОПЖ при рождении в зависимости от процентного увеличения уровня возрастной смертности

Таким образом, при увеличении уровня возрастной смертности β на 1 % СОПЖ при рождении уменьшится на 0.19 % (0.13 лет), при увеличении β в два раза (на 100 %) СОПЖ уменьшится на 19.19 % (13.5 лет).

2. Изменение скорости прироста смертности: $\alpha(\Delta) = \alpha + \Delta$.

В таком случае

$$g'(0) = \frac{de_0(\Delta)}{e_0 d\Delta} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{e^\dagger}{e_0} - 1 \right) = \frac{1}{\alpha} (H_K - 1).$$

Тогда

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} = 1 + \frac{1}{\alpha} (H_K - 1) \Delta.$$

В нашем случае $\Delta = k\alpha$, где k изменяется от 0.01 (1 %) до 1 (100 %). В таком случае

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} = 1 + (H_k - 1)k.$$

График функции процентного уменьшения СОПЖ при рождении в зависимости от процентного увеличения скорости прироста смертности представлен на рисунке 1.3.

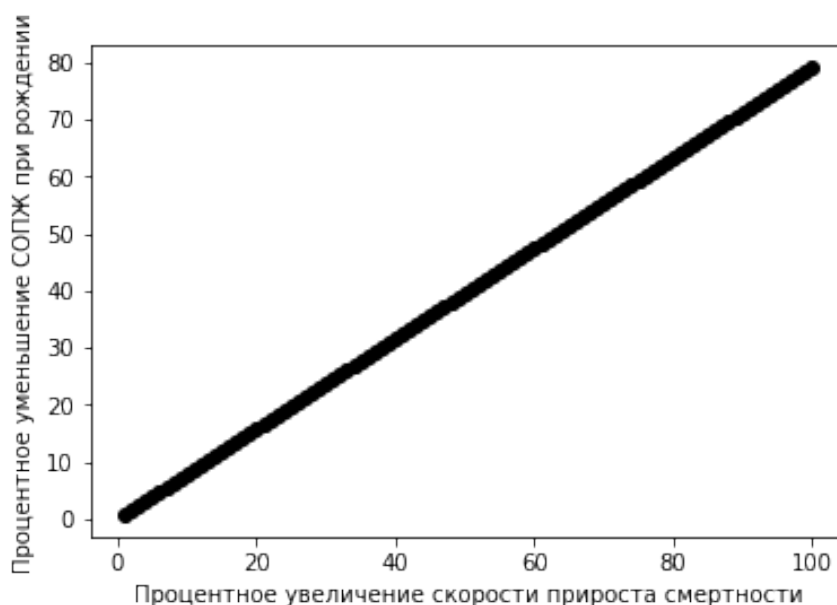


Рисунок 1.3 – Процентное уменьшение СОПЖ при рождении в зависимости от процентного увеличения скорости прироста смертности

Таким образом, при увеличении скорости прироста смертности α на 1 % СОПЖ при рождении уменьшится на 0.79 % (0.55 лет), при увеличении α в два раза (на 100 %) СОПЖ уменьшится на 79.01 % (55.27 лет).

3) *Изменение независимого от возраста параметра M , характеризующего смерть от случайных причин: $M(\Delta) = M + \Delta$.*

В таком случае

$$g'(0) = \frac{de_0(\Delta)}{e_0 d\Delta} = -\bar{t}.$$

Тогда

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} = 1 - \bar{t}\Delta.$$

В нашем случае $\Delta = kM$, где k изменяется от 0.01 (1 %) до 1 (100 %). Тогда

$$\frac{e_0(\Delta)}{e_0} = 1 - \bar{t}kM.$$

График функции процентного уменьшения СОПЖ при рождении в зависимости от процентного увеличения параметра M представлен на рисунке 1.4.

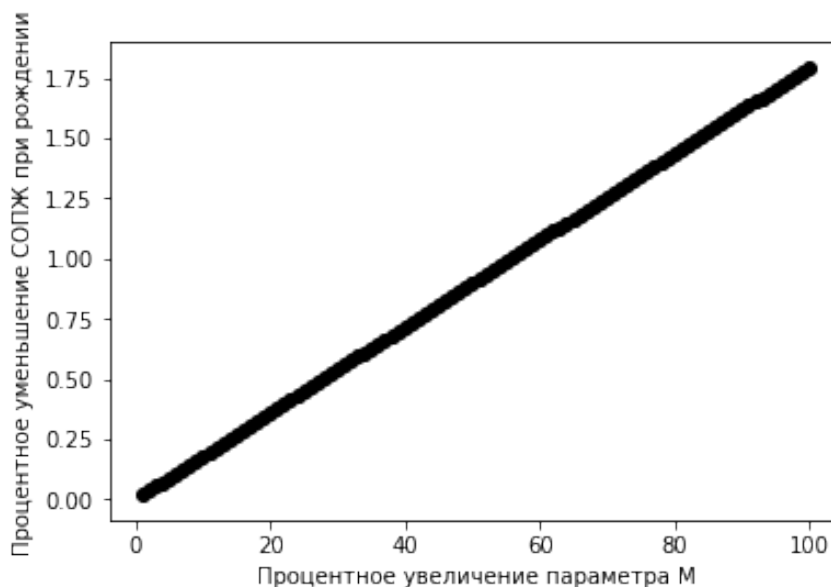


Рисунок 1.4 – Процентное уменьшение СОПЖ при рождении в зависимости от процентного увеличения параметра M

Таким образом, при увеличении параметра M на 1 % СОПЖ при рождении уменьшится на 0.01 % (0.01 лет), при увеличении M в два раза (на 100 %) СОПЖ уменьшится на 1.79 % (1.25 лет).

Согласно проведенному анализу, наибольшее уменьшение СОПЖ при рождении происходит при увеличении скорости прироста смертности (параметр α), далее идет параметр β (уровень начальной смертности), увеличение которого вызывает уже меньшее уменьшение СОПЖ и, наконец, наименьшее влияние оказывает увеличение параметра M , который характеризует смерть от случайных причин.

1.6 Заключение к разделу 1

В отчете представлен энтропийный подход к оценке сокращения продолжительности жизни от воздействия негативных экологических факторов, которое выражается в увеличении интенсивности смертности ИС, которая является исходной величиной, через которую определяют экологический риск и сокращение продолжительности жизни.

С помощью представленного подхода проведен анализ увеличения интенсивности смертности при различных математических формах ее изменения, а также оценено влияние такого изменения на среднюю ожидаемую продолжительность жизни при рождении.

2 Применение к-статистики Каниадакиса к распределениям экстремальных ветровых нагрузок (на примере Арктического региона)

2.1 Введение

При эксплуатации сложной технической системы, как бы тщательно ни проводились расчеты при ее проектировании, всегда будут, в силу ее сложности, непредусмотренные заранее воздействия, обусловленные запроектными (экстремальными) нагрузками, что в конечном итоге будет приводить к ее локальным повреждениям. При этом очень важно знать, вызовут ли указанные повреждения катастрофическое разрушение системы в целом или ее непригодность к дальнейшей эксплуатации. Такие запроектные или экстремальные нагрузки и воздействия приходится на хвосты распределений, которые описываются толстохвостыми распределениями. Пример такого распределения приведен на рисунке 2.1.

Распределение, представленное на рисунке 2.1 разделено на две части: центральную (сплошная жирная линия) и хвостовую (пунктирная жирная линия). Граница разделения K представляет собой пороговое значение, определяемое спецификой задачи. Центральная часть представляет собой значения при проектном нагружении (нормальная эксплуатация), хвостовая – запроектные значения. Центральная часть обычно описывается стандартными классами распределений (экспоненциальное, Вейбулла, Релея, логнормальное и т.д.), хвостовая часть – степенными распределениями или распределениями, имеющими тяжелые хвосты.

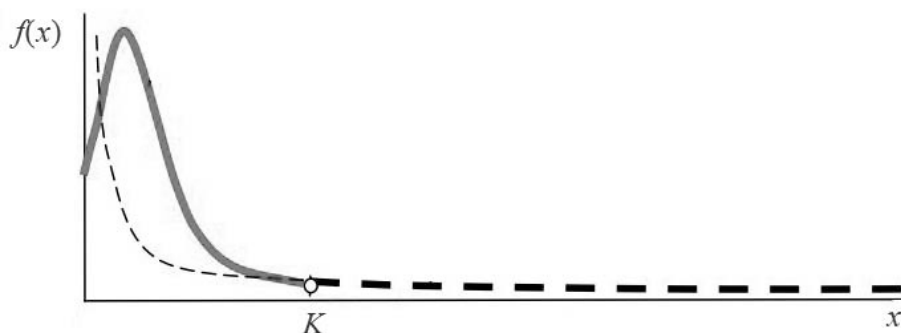


Рисунок 2.1 – Пример распределения воздействия, нагрузки или ущерба

Ниже рассмотрено применение к-статистики Каниадакиса [1–4] к известным распределениям нагрузок и воздействий, что позволяет моделировать сверхнормативные

стрессоры в хвостах этих распределений и анализировать последствия внепроектных ситуаций (в том числе, катастроф по типу *черный лебедь*). Использование k -статистики позволяет получить простые аналитические выражения в замкнутой форме для всех основных статистических функций, таких как функция плотности вероятности, функция распределения, функция выживания, функция квантилей, функция риска и кумулятивная функция риска.

Анализ произведен на примере экстремальных скоростей ветра в Арктической зоне РФ, полученных на различных метеостанциях. Информация об экстремально больших скоростях ветра очень важна, поскольку знание истинного распределения ветровых нагрузок необходимо при проектировании новых и эксплуатации существующих антенн и мачт, мостов, ветроэнергетических установок, высотных домов и других объектов. Это особенно актуально в современных условиях, поскольку обнаружено, что частота экстремальных явлений возрастает [5].

В основе статистической теории экстремумов лежит представление о том, что экстремальные одинаково распределенные независимые случайные величины подчиняются одному из трех распределений вероятностей (Гумбеля, Фреше и Вейбулла) [6–8], причем для аппроксимации распределения экстремумов скорости ветра успешно применяется закон Вейбулла. Другим подходом к исследованию экстремальных величин является методика аппроксимации не всего распределения, а только его хвоста. Для этого применяется так называемое распределение Парето, которому подчиняются вероятности событий, интенсивность (амплитуда) которых превосходит некоторое пороговое значение [6–8]. Вопрос о том как назначать/определять точку K в статье не раскрывается. Это отдельная проблема, определяемая спецификой решаемой задачи.

Исходные данные для анализа взяты из работ [6–8], посвященных изучению аномальных особенностей ветрового режима. Регион исследования включает прибрежную зону Арктики (от Кольского до Чукотского полуостровов), а также некоторые внутриматериковые районы (всего в анализе участвовало более 30 метеостанций). Использовались стандартные срочные станционные измерения скорости ветра на высоте 10 м, осредненные за 10 мин. Проанализированы данные за период 1966–2013 гг.

В [6–8] показано, что в случае экстремальных скоростей ветра нарушен один из базовых принципов, лежащих в основе теории экстремальных случайных процессов – требование, чтобы все выборочные данные принадлежали к одному семейству. Показано, что в выборку замешаны представители двух различных распределений, каждое из которых аппроксимировано своей функцией Вейбулла. Это ситуация, когда среди одинаковых (по номенклатуре) величин встречаются представители принципиально

разных распределений. Основной массив «промежуточных» экстремумов назван *белыми лебедями* (БЛ), а появление в этой выборке самых больших и редких явлений названо *черными лебедями* (ЧЛ) [9]. Следует отметить, что объекты, принадлежащие одному распределению, имеют сходный генезис, т.е. крупные аномалии отличаются от своих «меньших родственников» только амплитудой или степенью воздействия. События, которые относятся к другому распределению, имеют иной генезис и характеризуют принципиально другие объекты, названные *драконами* (ДР) или *драконами–королями* [10].

2.2 Математическое описание к-статистики

Рассмотрим СВ X с ФПВ $f(x)$. В статистической механике общее уравнение скорости изменения $f(t)$ – это линейное обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) первого порядка

$$\frac{df(x)}{dx} = -r(x)f(x), \quad (2.1)$$

где

$r(x)$ – функция скорости затухания.

Решение этого ОДУ является экспоненциальным

$$f(x) = c \exp\left(-\int_{x_0}^x r(t) dt\right), \quad (2.2)$$

со стандартным условием нормировки, определяющим константу c :

$$\int_{x_0}^x f(t) dt = 1. \quad (2.3)$$

В качестве экспоненциального решения рассмотрим три простых случая.

1. *Экспоненциальная модель* для постоянной скорости затухания, т.е.

$$r(x) = \lambda, \quad (2.4)$$

что из уравнения (2.1) приводит к экспоненциальной ФПВ

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}. \quad (2.5)$$

2. *Распределение Парето I типа.* ФПВ распределения Парето получается из уравнения (2.1) при функции скорости затухания, равной

$$r(x) = \frac{p}{x}, \quad p > 1, \quad (2.6)$$

т.е. ФПВ в таком случае

$$f(x) = \frac{p-1}{x_0} \left(\frac{x_0}{x} \right)^p, \quad p > 1, \quad x \in (x_0, +\infty), \quad x_0 > 0. \quad (2.7)$$

3. *κ -экспоненциальная модель* оказалась полезной во многих приложениях. Согласно [1–4], экспериментальные данные свидетельствуют о том, что функции плотности вероятности должны напоминать экспоненциальную функцию для $x \rightarrow 0$. Однако при $x \rightarrow 0$ ФПВ Парето расходится. С другой стороны, для высоких значений x многие экспериментальные результаты показывают Парето подобную ФПВ со степенными хвостами вместо хвостов с экспоненциальным затуханием. Следовательно, при $x \rightarrow 0$ следует, что $r(x) \sim \beta$, а при $x \rightarrow +\infty$ следует, что $r(x) \sim p/x$. Таким образом, фактическая функция скорости затухания $r(x)$ должна плавно интерполироваться между этими двумя режимами. Хорошее предложение для $r(x)$ было введено в контексте специальной теории относительности, где функция $r(t)$ задается через фактор Лоренца

$$\gamma_\kappa(q) = \sqrt{1 + \kappa^2 q^2}. \quad (2.8)$$

Это выражение включает безразмерный импульс q , где параметр κ является обратной величиной безразмерной скорости света c , т.е. $\kappa \propto 1/c$. В таком случае, принимая

$$r(x) = \frac{\beta}{\sqrt{1 + \kappa^2 \beta^2 x^2}}, \quad (2.9)$$

получим, при $x \rightarrow 0$ скорость затухания $r(x)$ соответствует экспоненциальному распределению, т.е. $r(x) \sim \beta$, а при $x \rightarrow +\infty$ соответствует распределению Парето, т.е. $r(x) \sim 1/\kappa x$.

Решение ОДУ (2.1) приводит к следующей ФПВ:

$$f(x) = \beta(1 - \kappa^2) \exp_{\kappa}(-\beta x), \quad (2.10)$$

где

κ -деформированная экспоненциальная функция задается выражением

$$\exp_{\kappa}(x) = \left(\sqrt{1 + \kappa^2 x^2} + \kappa x \right)^{1/\kappa} \quad (2.11)$$

при $0 < \kappa < 1$.

Важно отметить, что при $\kappa \rightarrow 0$ и при $x \rightarrow 0$ функция $\exp_{\kappa}(x)$ стремится к обычной экспоненте, т.е.

$$\begin{aligned} \exp_{\kappa}(x) &\underset{\kappa \rightarrow 0}{\sim} \exp(x); \\ \exp_{\kappa}(x) &\underset{x \rightarrow 0}{\sim} \exp(x). \end{aligned} \quad (2.12)$$

С другой стороны, функция $\exp_{\kappa}(-x)$ при $x \rightarrow +\infty$ представляет собой степенной хвост, т.е.

$$\exp_{\kappa}(-x) \underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} (2\kappa x)^{-1/\kappa}. \quad (2.13)$$

Кроме того, κ -экспонента удовлетворяет следующему тождеству:

$$\exp_{\kappa}(x) \exp_{\kappa}(-x) = 1, \quad (2.14)$$

по аналогии со стандартной, недеформированной, экспонентой.

κ -экспонента представляет собой очень мощный инструмент, который можно использовать для формулирования обобщенной статистической теории, способной рассматривать системы, описываемые функциями распределения, имеющими степенные хвосты.

Рассмотрим применение κ -статистики Каниадакиса к распределению Вейбулла. Согласно [4], κ -деформированная функция распределения Вейбулла

$$F(x) = 1 - \exp_{\kappa} \left(- (x / \tau)^{\alpha} \right), x \geq 0, \alpha, \tau, \kappa > 0, \quad (2.15)$$

где

α – параметр формы;

τ – параметр масштаба.

Часто используют другую параметризацию распределения Вейбулла. Параметр формы α остается прежним, а для параметра масштаба делают замену $\beta = \tau^{-\alpha}$. В таком случае

$$F_{\kappa}(x) = 1 - \exp_{\kappa}(-\beta x^{\alpha}); \quad x \geq 0; \quad \alpha, \beta > 0; \quad 0 \leq \kappa < 1. \quad (2.16)$$

Несложно получить κ -деформированную ФПВ Вейбулла

$$\begin{aligned} f_{\kappa}(x) &= \frac{dF_{\kappa}(x)}{dx} = \frac{e_{\kappa}(-\beta x^{\alpha}) \left(\alpha \beta \kappa x^{\alpha-1} - \frac{\alpha \beta^2 \kappa^2 x^{2\alpha-1}}{\sqrt{1 + \kappa^2 \beta^2 x^{2\alpha}}} \right)}{\kappa \left(\sqrt{1 + \kappa^2 \beta^2 x^{2\alpha}} - \beta \kappa x^{\alpha} \right)} = \\ &= \frac{e_{\kappa}(-\beta x^{\alpha}) \alpha \beta \kappa x^{\alpha-1} \left(1 - \frac{\beta \kappa x^{\alpha}}{\sqrt{1 + \kappa^2 \beta^2 x^{2\alpha}}} \right)}{\kappa \beta \kappa x^{\alpha} \left(\frac{\sqrt{1 + \kappa^2 \beta^2 x^{2\alpha}}}{\beta \kappa x^{\alpha}} - 1 \right)}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Сделаем замену $y = \frac{\alpha \beta^2 \kappa^2 x^{2\alpha-1}}{\sqrt{1 + \kappa^2 \beta^2 x^{2\alpha}}}$, получим

$$\begin{aligned}
f_{\kappa}(x) &= \frac{e_{\kappa}(-\beta x^{\alpha}) \alpha \beta \kappa x^{\alpha-1} (1-y)}{\kappa \beta \kappa x^{\alpha} \left(\frac{1-y}{y}\right)} = \frac{e_{\kappa}(-\beta x^{\alpha}) \alpha \beta \kappa x^{\alpha-1} y}{\kappa \beta \kappa x^{\alpha}} = \\
&= \frac{e_{\kappa}(-\beta x^{\alpha}) \alpha \beta x^{\alpha-1}}{\sqrt{1+\kappa^2 \beta^2 x^{2\alpha}}} = \frac{\alpha (x/\tau)^{\alpha-1} e_{\kappa}(-(x/\tau)^{\alpha})}{\tau \sqrt{1+\kappa^2 (x/\tau)^{2\alpha}}}.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Параметр формы (показатель степени) α количественно характеризует кривизну (форму) распределения, которая менее (более) выражена при меньших (больших) значениях параметра. Параметр τ является параметром масштаба: если τ мало, то распределение будет *более сконцентрированным* вокруг моды; если τ большое, то распределение будет менее сконцентрированным более рассеянным. Наконец, параметр κ характеризует измеряет тяжесть правого хвоста: чем больше (меньше) его величина, тем толще (тоньше) хвост. При $\kappa \rightarrow 0$ распределение стремится к обычному распределению Вейбулла. Можно легко убедиться, что

$$\begin{aligned}
\lim_{\kappa \rightarrow 0} f_{\kappa}(x, \alpha, \tau, \kappa) &= \frac{\alpha}{\tau} \left(\frac{x}{\tau}\right)^{\alpha-1} \exp(-(x/\tau)^{\alpha}); \\
\lim_{\kappa \rightarrow 0} F_{\kappa}(x, \alpha, \tau, \kappa) &= 1 - \exp(-(x/\tau)^{\alpha}).
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Поскольку экспоненциальное распределение является частным случаем Вейбулла с параметром формы, равным 1, то при $\kappa \rightarrow 0$ и $\alpha = 1$ κ -деформированные функции стремятся к экспоненциальному закону. При $x \rightarrow 0+$ распределение ведет себя аналогично модели Вейбулла (2.7), тогда как для больших значений x приближается к распределению Парето с параметром масштаба $\tau(2\kappa)^{\frac{1}{\alpha}}$ и параметром формы $\frac{\alpha}{\kappa}$, т.е.

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow +\infty} f_{\kappa}(x, \alpha, \tau, \kappa) &= \frac{\frac{\alpha}{\kappa} \left(\tau(2\kappa)^{\frac{1}{\alpha}}\right)^{\frac{\alpha}{\kappa}}}{x^{\frac{\alpha}{\kappa}+1}}; \\
\lim_{x \rightarrow +\infty} F_{\kappa}(x, \alpha, \tau, \kappa) &= 1 - \left(\frac{\tau(2\kappa)^{\frac{1}{\alpha}}}{x}\right)^{\frac{\alpha}{\kappa}}.
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Из выражения (2.15) можно найти функцию квантилей (обратную функцию распределения) и функцию выживания (надежности)

$$F_{\kappa}^{-1}(p, \alpha, \tau, \kappa) = \tau \left(\ln_{\kappa} \frac{1}{1-p} \right)^{1/\alpha} = \beta^{-\frac{1}{\alpha}} \left(\ln_{\kappa} \frac{1}{1-p} \right)^{1/\alpha}, \quad 0 < p < 1, \quad (2.21)$$

$$S_{\kappa}(x, \alpha, \tau, \kappa) = \exp_{\kappa} \left(-(x/\tau)^{\alpha} \right) = \exp_{\kappa} \left(-\beta x^{\alpha} \right),$$

где

$\ln_{\kappa}(u)$ – обратная функция $\exp_{\kappa}(u)$, т.е.

$$\ln_{\kappa}(\exp_{\kappa}(u)) = \exp_{\kappa}(\ln_{\kappa}(u)) = u$$

и определяется формулой

$$\ln_{\kappa}(x) = \frac{x^{\kappa} - x^{-\kappa}}{2\kappa}.$$

Медиана κ -деформированного распределения Вейбулла

$$x_{med, \kappa} = \tau \left[\ln_{\kappa}(2) \right]^{\frac{1}{\alpha}} = \beta^{-\frac{1}{\alpha}} \left[\ln_{\kappa}(2) \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (2.22)$$

Мода $x_{mode, \kappa}$ плотности вероятности может быть получена аналитически как функция параметров α , β и κ . Так как $x_{mode, \kappa}$ – точка максимума ФПВ, то приравнявая производную ФПВ к нулю, можно найти моду [4]:

$$x_{mode, \kappa} = \tau \left[\frac{\alpha^2 + 2\kappa^2(\alpha - 1)}{2\kappa^2(\alpha^2 - \kappa^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{4\kappa^2(\alpha^2 - \kappa^2)(\alpha - 1)^2}{[\alpha^2 + 2\kappa^2(\alpha - 1)]^2}} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2\alpha}}. \quad (2.23)$$

Согласно [4], моменты κ -деформированного распределения Вейбулла можно рассчитать по формуле

$$a_{r,\kappa} = \frac{\tau^r}{(2\kappa)^{\frac{r}{\alpha}}} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{r}{\alpha}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} - \frac{r}{2\alpha}\right)}{1 + r \frac{\kappa}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} + \frac{r}{2\alpha}\right)}. \quad (2.24)$$

В выражении (2.24) среднее значение, дисперсия и коэффициент вариации равны

$$M_\kappa[X] = \frac{\tau}{(2\kappa)^{\frac{1}{\alpha}}} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} - \frac{1}{2\alpha}\right)}{1 + \frac{\kappa}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} + \frac{1}{2\alpha}\right)};$$

$$D_\kappa[X] = \frac{\tau^2}{(2\kappa)^{\frac{2}{\alpha}}} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} - \frac{1}{\alpha}\right)}{1 + 2 \frac{\kappa}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} + \frac{1}{\alpha}\right)} - M_\kappa^2[X];$$

$$V_\kappa[X] = \sqrt{\frac{a_{2,\kappa}}{a_{1,\kappa}^2} - 1} = \sqrt{\frac{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} - \frac{1}{\alpha}\right)}{1 + 2 \frac{\kappa}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} - \frac{1}{2\alpha}\right)}{1 + \frac{\kappa}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} + \frac{1}{2\alpha}\right)}\right)^2} - 1}. \quad (2.25)$$

Обозначим

$$C_r = \frac{(2\kappa)^{\frac{r}{\alpha}} \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} - \frac{r}{2\alpha}\right)}{1 + r \frac{\kappa}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{2\kappa} + \frac{r}{2\alpha}\right)}. \quad (2.26)$$

Тогда связь между начальными моментами κ -деформированного $a_{r,\kappa}$ и стандартного $a_r = \tau^r \Gamma\left(1 + \frac{r}{\alpha}\right)$ распределения Вейбулла определяется выражением

$$a_{r,\kappa} = a_r C_r. \quad (2.27)$$

Теперь не сложно получить выражения, связывающие основные числовые характеристики обычного и K -деформированного распределения Вейбулла

$$M_{\kappa}[X] = M[X]C_1;$$

$$D_{\kappa}[X] = a_2C_2 - M^2[X]C_1^2 = D[X]C_2 + M^2[X](C_2 + C_1^2); \quad (2.28)$$

$$V_{\kappa}^2[X] + 1 = \frac{a_{2,\kappa}}{a_{1,\kappa}^2} = \frac{a_2C_2}{a_1^2C_1^2} = (V^2[X] + 1) \frac{C_2}{C_1^2}.$$

2.3 Применение к-статистики к анализу экстремальных скоростей ветра

Анализ экстремальных значений скоростей ветра проведен отдельно для холодного и теплого сезонов, которые в Арктике характеризуются не только резко контрастирующими температурами, но и особенностями циркуляции атмосферы. Летними месяцами здесь являются, фактически, июль и август, а зимний сезон покрывает не только декабрь, январь и февраль, но обычно включает также ноябрь, март и апрель.

Для аппроксимации функции распределения повторяемостей скоростей ветра использован закон Вейбулла, имеющий функцию распределения [6, 7]

$$\frac{n}{N} \approx F_{\kappa}(u) = 1 - \exp(-\beta u^{\alpha}); \quad u \geq 0; \quad \alpha, \beta > 0,$$

где

u – модуль скорости ветра;

n/N характеризует накопленную повторяемость.

Это выражение можно преобразовать

$$\ln[-\ln(N - n) / N] = \ln u.$$

Отсюда следует, что в специальных координатах $\ln[-\ln(N - n) / N]$ и $\ln u$ распределение вероятностей Вейбулла представляется прямой линией. Степень отклонения от нее эмпирических точек характеризует, вместе с известными статистическими критериями, применимость теоретического закона распределения.

Рассмотрим примеры эмпирического распределения повторяемости экстремумов скорости ветра (рисунок 2.2) [6]. Из рисунка 2.2 видно, что у набора эмпирических точек имеется прямолинейный участок, однако при переходе к особенно большим значениям линия загибается вниз. Эта особенность оказалась типична для данных всех рассмотренных метеостанций [6]. В этом случае подбор общей линейной зависимости методом наименьших квадратов возможен в силу того, что большинство точек заполняет «линейный» участок. Однако такая аппроксимация не будет удовлетворительно описывать самые большие значения скорости ветра (находящиеся в хвосте распределения) и вследствие этого их вероятность будет значительно занижена. Считалось, что в выборку замешаны представители двух различных распределений, и каждое из них (поскольку это случай экстремальных значений) может быть аппроксимировано функции Вейбулла.

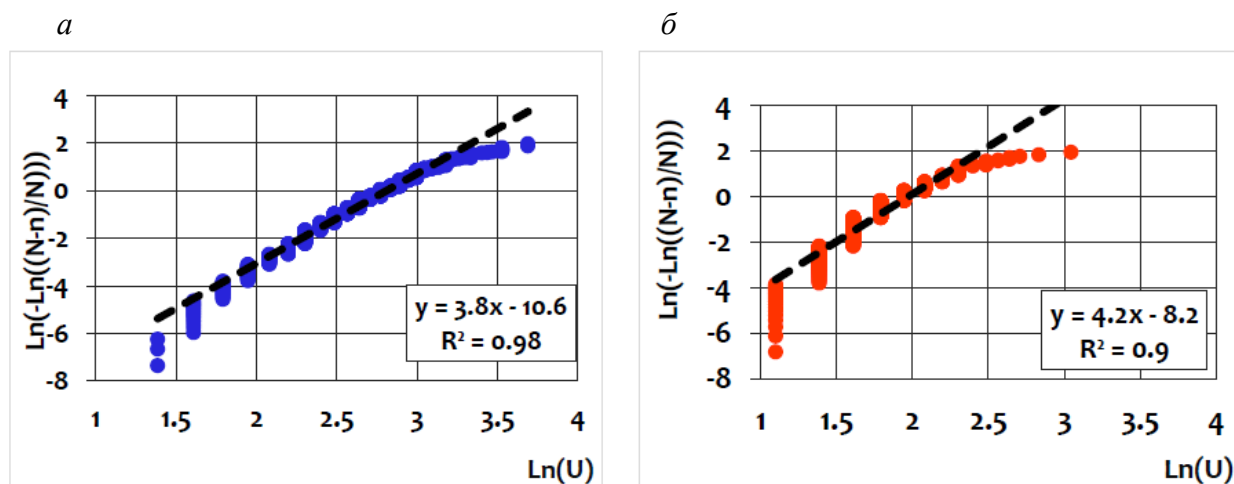


Рисунок 2.2 – Эмпирические распределения экстремумов скорости ветра (1966–2013 гг.) построенные в координатах вейбулловского распределения вероятностей, по данным измерений:

а – на станции Териберка в холодные периоды; *б* – на станции Окунев нос в теплые периоды года

Таким образом, осуществлен подбор двух независимых друг от друга спрямляющих линий (распределений Вейбулла). Эта ситуация также показана в качестве примера на рисунке 2.3 [6] для двух станций и разных сезонов.

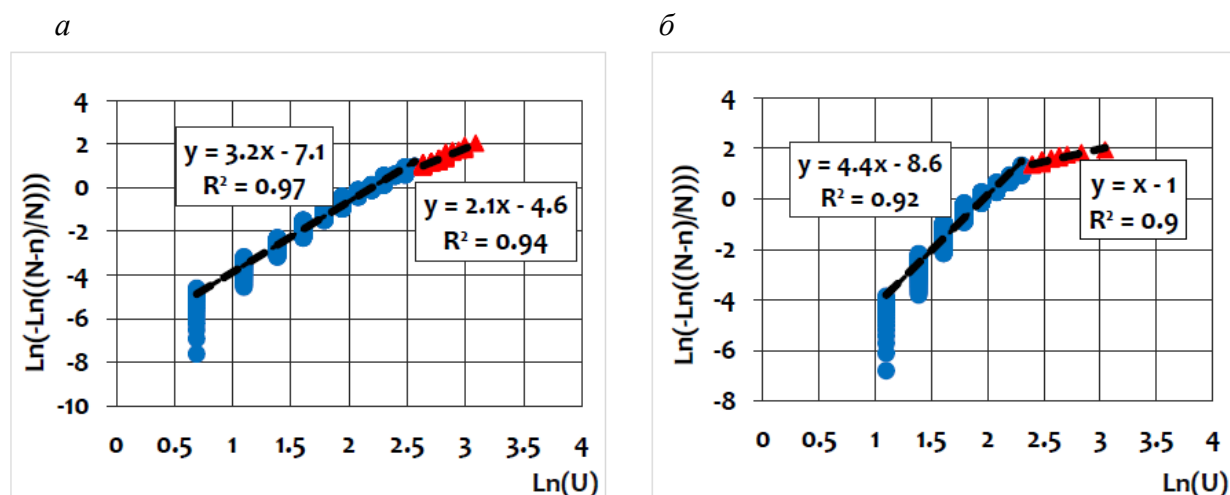


Рисунок 2.3 – Эмпирические распределения экстремумов скорости ветра года (1966–2013 гг.), построенные в координатах вейбулловского распределения вероятностей, где отрезки прямых соответствуют двум различным законам распределения, по данным измерений:
а – на станции Ловозеро в холодные периоды; *б* – на станции Окунев нос в теплые периоды

Видно, что каждая группа точек, со значениями больше ($u > U_{th}$) и меньше ($u < U_{th}$) хорошо аппроксимируется своей прямой в специальной системе координат, показывая, что набор экстремумов сформирован из величин, относящихся к *различным* генеральным совокупностям.

Полученные параметры распределения Вейбулла для данных трех рассмотренных выше станций представлены в таблице 2.1 [7]. Для данных каждой станции для летнего и зимнего периода были определены параметры двух распределений Вейбулла, описывающих: основное распределение скоростей («белые и черные лебеди» – «БЛ и ЧЛ») и распределение больших (хвостовых) значений («драконы» – «ДР»).

Таблица 2.1 – Параметры распределения Вейбулла, рассчитанные за период 1966–2013 гг., отдельно для двух групп экстремумов, отвечающих двум семействам распределений «БЛ и ЧЛ» и «ДР» (для разных периодов и значений скоростей в м/с)

Станция	Принадлежность к семейству	Зимний период		Летний период	
		Параметр α	Параметр β	Параметр α	Параметр β
Териберка	БЛ и ЧЛ	3.97	$1.6 \cdot 10^{-5}$	4.39	$3.1 \cdot 10^{-5}$
	ДР	1.77	0.0120	2.12	0.0081
Окунев нос	БЛ и ЧЛ	3.40	0.0017	4.40	0.0002
	ДР	0.52	1.1722	0.98	0.3816
Ловозеро	БЛ и ЧЛ	3.19	0.0013	4.45	0.0003
	ДР	1.69	0.0429	2.30	0.0202

ФПВ полученных распределений представлены на рисунках 2.4–2.6. Таким образом, чтобы адекватно описать экстремумы скорости ветра одним распределением, необходимо объединить ФПВ следующим образом: до точки пересечения ФПВ используется основное семейство распределения («БЛ и ЧЛ» – сплошная линия), после точки пересечения – распределение больших (хвостовых) значений («ДР» – пунктирная линия).

Модифицируем основное распределение («БЛ и ЧЛ») так, чтобы его хвостовая часть адекватно описывала большие значения экстремумов скорости ветра. Для этого построим k -деформированную ФПВ Вейбулла, у которой параметр k подберем так, чтобы правый хвост соответствовал хвосту распределения «драконов». Полученные результаты представлены на рисунках 2.7–2.9.

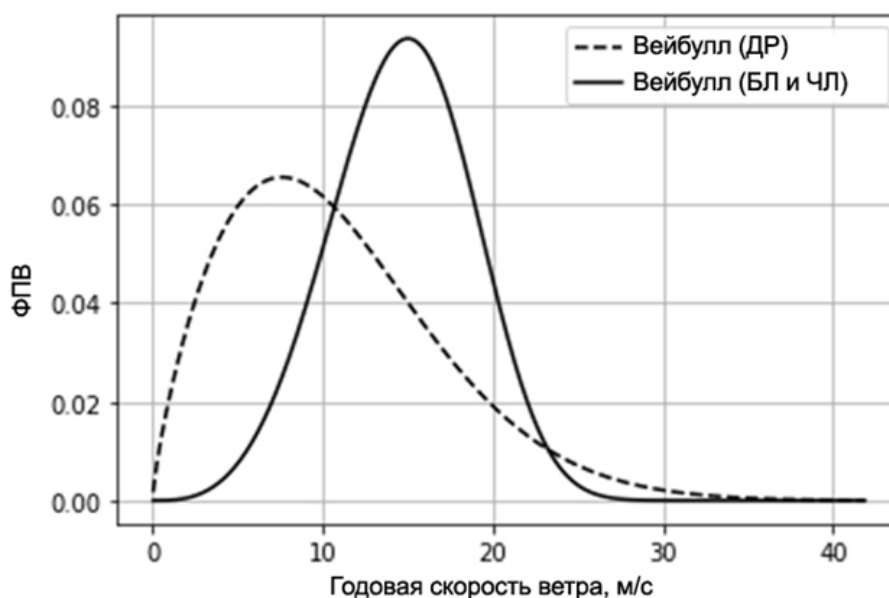


Рисунок 2.4 – ФПВ экстремумов скорости ветра (1966–2013 гг.) по данным измерений на станции Териберка в зимний период, отвечающих двум семействам распределений «БЛ и ЧЛ» и «ДР»

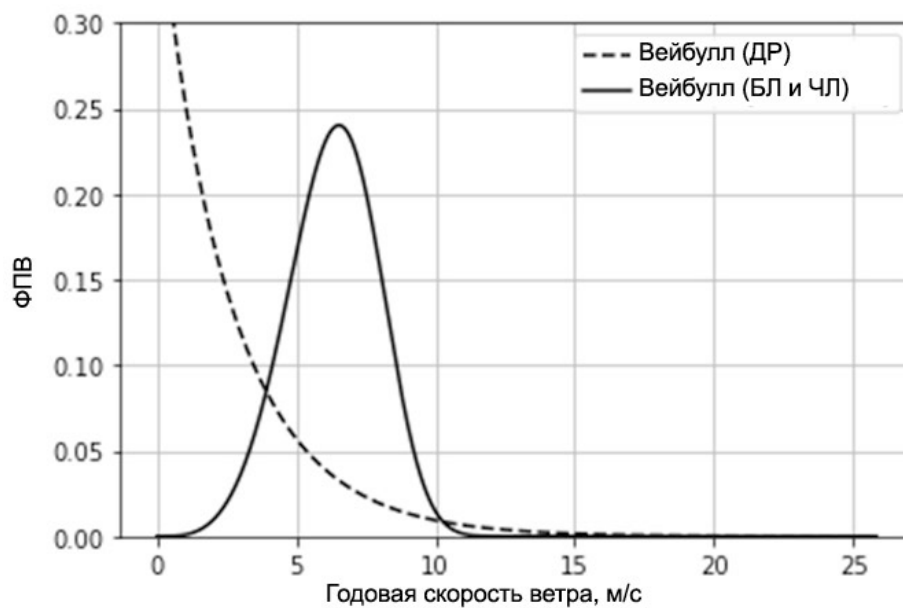


Рисунок 2.5 – ФПВ экстремумов скорости ветра (1966–2013 гг.) по данным измерений на станции Окунев нос в летний период, отвечающих двум семействам распределений «БЛ и ЧЛ» и «ДР»

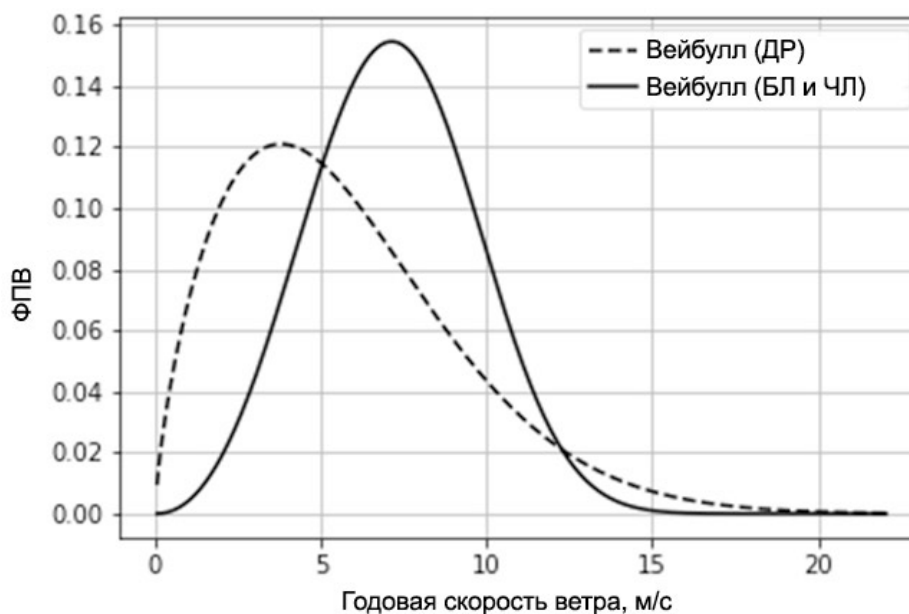


Рисунок 2.6 – ФПВ экстремумов скорости ветра (1966–2013 гг.) по данным измерений на станции Ловозеро в зимний период, отвечающих двум семействам распределений «БЛ и ЧЛ» и «ДР»

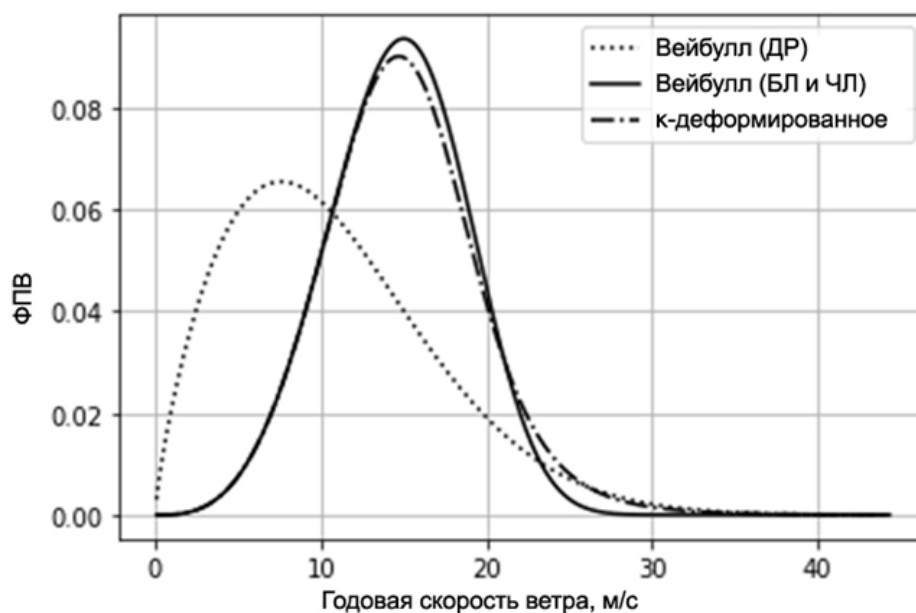


Рисунок 2.7 – ФПВ экстремумов скорости ветра по данным измерений на станции Териберка (зимний период), отвечающих трем семействам распределений Вейбулла: «БЛ и ЧЛ», «ДР» и к-деформированному

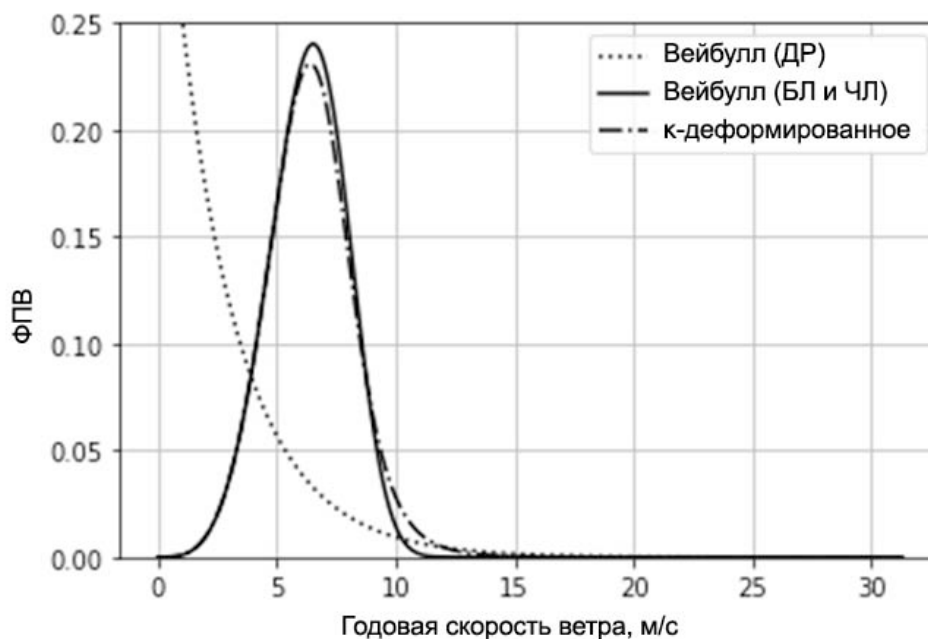


Рисунок 2.8 – ФПВ экстремумов скорости ветра по данным измерений на станции Окунев нос (летний период), отвечающих трем семействам распределений Вейбулла: «БЛ и ЧЛ», «ДР» и к-деформированному

На рисунках 2.7–2.9 видно, что к-деформированное распределение (линия «точка–тире») адекватно описывает не только основное распределение («БЛ и ЧЛ» – сплошная линия), но и почти полностью совпадает с распределением «драконов» – больших

(хвостовых) значений экстремумов (пунктирная линия). Таким образом, k -статистика позволяет описывать данные, в которых смешаны представители двух различных распределений, *единственным k -деформированным распределением*.

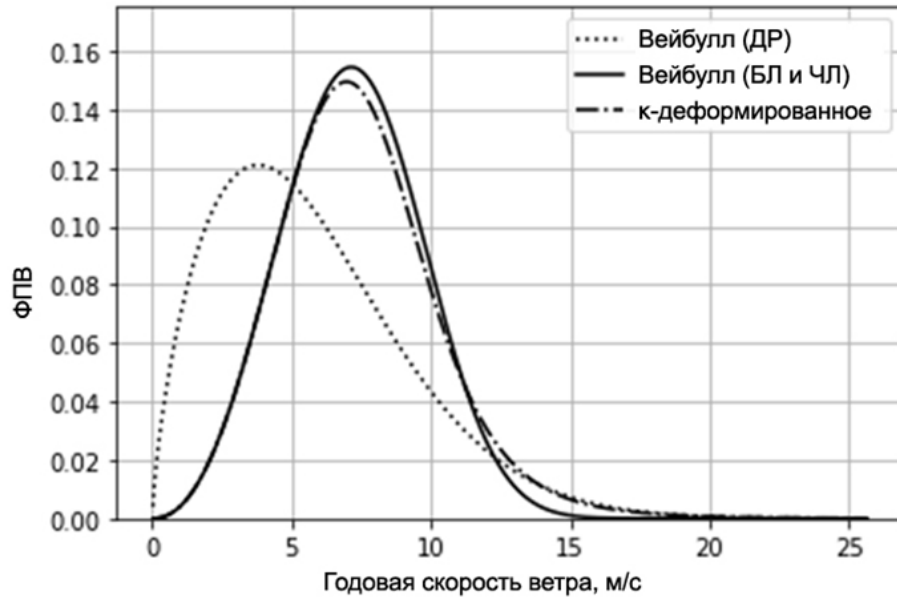


Рисунок 2.9 – ФПВ экстремумов скорости ветра по данным измерений на станции Ловозеро (зимний период), отвечающих трем семействам распределений Вейбулла: «БЛ и ЧЛ», «ДР» и k -деформированному

Обработка данных всех метеостанций показала аналогичные результаты, что убедительно демонстрируют успешность применения *k -статистики* к анализу экстремумов скорости ветра, которые состоят из смеси значений, относящихся к разным генеральным совокупностям.

В работе [7] для характеристики географии экстремумов и сопоставления летних и зимних условий были построены квантильные значения скорости по формуле

$$U(p) = \ln \left[\frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{1-p} \right]^{\frac{1}{\alpha}},$$

где

p – значение вероятности;

$U(p)$ – соответствующее квантильное значение скорости ветра.

Значение p выражено через «время возврата», характеризующее интервал времени, через который вновь появляются такие же (или большие) аномалии скорости: $T=1/(1-p)$.

Для анализа экстремумов было принято значение $p = 0.99$. Для летнего периода (62 дня – июль и август) общий объем выборки за 48 лет (1966–2013 гг.), при условии просеивания через 3 сут составляет ~974 сут. Доля событий ($1 - 0.99 = 0.01$) равна приблизительно 10 суткам. За 48 лет это соответствует ситуации появления экстремума $U(0.99)$ один раз за 5 теплых сезонов. Для холодного сезона $p = 0.99$ отвечает среднему времени появления экстремума $U(0.99)$ один раз за два холодных периода года. Вычисленные по данным станций значения (раздельно для «ЧЛ» и «ДР» и для зимнего периода) представлены в таблице 2.2. Там же представлены значения, вычисленные по к-деформированному распределению (см. формулу (2.21)).

Таблица 2.2 – Квантильные значения экстремумов скорости ветра (зимний период), м/с, $U(0.99)$, рассчитанные отдельно для трех групп экстремумов, отвечающих «БЛ и ЧЛ», «ДР» и к-деформированному распределению

Станция	Семейство распределений		
	«БЛ и ЧЛ»	«ДР»	к-деформированное
Териберка	24	29	28.98
Ловозеро	13	16	15.81

Как видно из таблицы 2.2, одни и те же квантильные значения существенно больше (на 10–30 %) в распределении «драконов», чем у «лебедей». Более того, значения к-деформированного распределения *почти совпадают* со значениями «драконов».

2.4 Заключение к разделу 2

Изучение экстремумов скорости ветра по данным стандартных наблюдений в прибрежных регионах Арктики показало, что они представляют собой два набора данных, имеющих различные статистические свойства, и каждый из них подчиняется своему закону Вейбулла. Представленный в работе подход с применением к-статистики позволил построить к-деформированное распределение Вейбулла, которое адекватно описывает оба набора данных экстремальных скоростей ветра, имеющих различные статистические характеристики.

3 Управленческая стратегия системного подхода прогнозирования аварий на критически важных объектах с использованием сетевого байесовского моделирования

Аннотация. Основная опасность на потенциально опасных объектах (ПОО) нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности, авто- и железнодорожного транспортирования опасных веществ связана с потерей герметичности оборудования (резервуаров, трубопроводов, цистерн), приводящей к пожарам, взрывам облаков топливно-воздушных смесей, токсичным воздействиям, возможности каскадного развития аварий. Методология исследования основана на системном подходе и сетевом байесовском моделировании. Разработан комплексный метод анализа безопасности, оценки риска, прогнозирования и экспертной оценки произошедших аварий на ПОО с учетом неопределенности исходных данных, факторов, влияющих на риск, анализа важности критичности, причинно-следственных связей событий, роли человеческого фактора. Выполнен анализ чувствительности, позволяющей дать оценку взаимосвязи элементов модели, изучить влияние целевых узлов на состояние остальных. Проведена диагностика для ранжирования узлов сети в зависимости от предварительно назначенной диагностической роли и сформированы ранжированные списки «неисправностей» и «наблюдений» после выбора узла, необходимого для анализа.

Рассмотрено сетевое байесовское прогнозирование риска железнодорожного транспортирования опасных грузов по территориям муниципальных образований и проектирование резервуарного парка ПОО ТЭК.

Метод может быть полезен проектировщикам ПОО, для принятия решений руководству ПОО, органам местного самоуправления, ответственным за обеспечение комплексной территориальной безопасности.

3.1 Введение

Традиционный анализ опасностей и оценки риска в отечественном подходе представлен в Руководстве по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности», 2014 [1]. Подходы отечественный и зарубежный практически одинаковы.

В 2020 г. в России введен в действие Национальный стандарт ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» [2], в котором разбиты по тематическим группам технологии процесса управления рисками (рисунок 3.2), содержатся рекомендации по выбору и применению описанных технологий. Для каждой из 44 технологий приведены описание метода, требуемые исходные данные, получаемые выходные данные, анализ сильных сторон и ограничений использования.

Рассмотрим блок 5 на рисунке 3.1 «Технологии понимания последствий, вероятности и риска» [2]. До настоящего времени не существует окончательной, нормативно утвержденной методики/руководства по безопасности, касающейся сетевого байесовского моделирования прогнозирования аварий. Ни за рубежом, ни у нас нет единого подхода к использованию сетевого моделирования для управления риском на ПОО. Сравнение исследований по этому направлению в зарубежных и отечественных журналах показывает, что этому вопросу нам надо уделять большое внимание.

Поэтому целью настоящего исследования является разработка комплексного метода анализа безопасности, оценки риска, прогнозирования гипотетических аварий и экспертной оценки произошедших аварий на ПОО с учетом неопределенности исходных данных, факторов, влияющих на риск, анализа важности критичности, причинно-следственных связей событий, возможной эскалации аварий, роли человеческого фактора. Метод реализован в практической методике для принятия решений руководством ПОО, органами местного самоуправления, ответственными за обеспечение комплексной территориальной безопасности.

3.2 Сетевое прогнозирование риска железнодорожного транспортирования опасных грузов по территории муниципального образования

3.2.1 Введение

Исследование посвящено прогнозированию и предупреждению развития аварий и экспертной оценке случившихся аварий на примере железнодорожного транспортирования опасных грузов. Используются Байесовские сети доверия, дающие возможность оценивать неопределенность исходных данных, причинно-следственные связи событий. Причинно-следственные связи моделируются с помощью условных вероятностей, оценивающих степень доверия в истинности новой поступающей (обуславливающей) информации, базирующейся на ранее полученной информации.

Метод сетей Байеса позволяет проводить процедуры, недоступные для традиционной количественной оценки риска. Сети можно корректировать, дополняя построенную модель данными по частотам отказов реального объекта. Компьютерное моделирование аварии с использованием вероятностной графической модели выполнено в программном комплексе ПК «GeNIe Version 3.0.6128.0» (ПК «GeNIe») [3] с анализом ее главных факторов. В основе работы программы лежат принципы теории вероятности, математической статистики, байесовских сетей и теории графов.

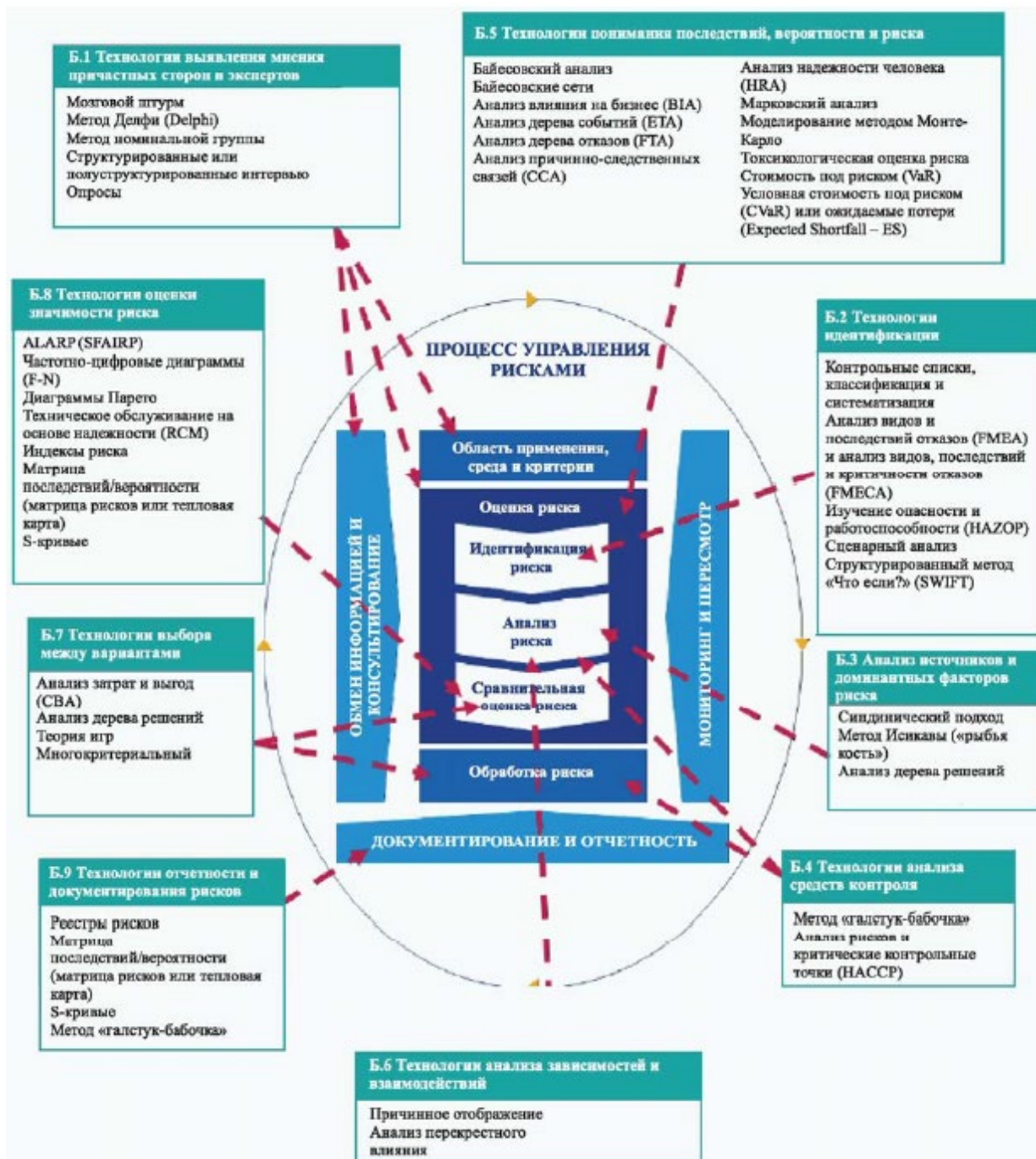


Рисунок 3.1 – Применение технологий в процессе управления рисками

Моделирование аварии сопровождается цветовой тематической визуализацией зависимостей между случайными факторами с построением направленного пути в ациклическом графе, вершинами которого являются факторы, а ребра определяют зависимости между ними. На примере реальной катастрофы на железнодорожной станции подтверждена эффективность построенной модели. Выполнен анализ полученных результатов в режимах оценки чувствительности и диагностики, позволивший определить главные факторы аварии.

Целью данного исследования стало прогнозирование развития и экспертная оценка железнодорожной аварии при транспортировании опасных грузов с помощью сетей Байеса.

3.2.2 Методология проведения исследования

Основные причины железнодорожных аварий подробно рассмотрены в работах Репиной И.Б., Замышляева А.М., Протопопова В.А., Слюсарь Н.Н., Мартынюк И.В. и др. [4–8]. В большинстве из них применен детерминированный метод количественной оценки риска (QRA – Quantitative Risk Assessment). Он имеет множество ограничений, связанных с расчетом риска и дальнейшей обработкой результатов. Существующие вероятностные подходы (например, байесовские сети) имеют большие преимущества перед QRA. Однако их применение ограничивается несовершенством нормативной базы РФ в области безопасности, практически полностью ориентированной на традиционный метод. Это обусловило использовать в данном исследовании сети Байеса в качестве разумной замены методу QRA для проведения оценки риска аварий по железной дороге с участием опасных грузов.

Для изучения факторов железнодорожной аварии составлена классификация потенциальных причин на основе методологии работы Ноја А. [9]. Все факторы подразделены на 4 категории: «Технические», «Человеческие», «Организационные», «Внешние». Каждая группа факторов была дополнена более детальными причинами. Главное положение среди всех причин занимает человеческий фактор, запускающий развитие аварии. Остальные являются производными ошибок человека. На рисунке 3.2 представлена разработанная схема возможных причин железнодорожной аварии. Согласно ей комплекс технических, организационных, человеческих и внешних факторов становится ключевым в создании аварийной ситуации на железной дороге.

Категория факторов «Человек» объединяет причины, связанные с проявлением человеческих ошибок в виде принятия неверных решений или выполнения неправильных

действий. В качестве подпричин аварии рассматриваются факторы, связанные с образом действий человека, состоянием его здоровья. Они объединены в группы «Поведенческие» и «Медицинские» причины.

В категорию факторов «Технические» входят факторы, характеризующие состояние рабочей среды, наличие неисправностей и дефектов оборудования: рельсов и дорожного полотна, систем коммуникации, механического оборудования и транспортных средств.

Категория «Организационные» факторы связаны с уровнем организации труда при выполнении основных технологических операций: перевозке грузов, управлении подвижным составом и обмене информацией. Подгруппа «Качество работы сотрудников» также включена в данную категорию.

Категория «Внешних» факторов отражает влияние «третьей стороны» на развитие аварии: нелегальное пересечение железнодорожных путей, террористические акты на объектах железной дороги и негативные события природного характера.

Классификация причин железнодорожной аварии содержит в себе множество взаимосвязанных компонентов. Рассматривать их в качестве независимых событий – грубое упрощение действительности. Необходимо учитывать зависимость между различными факторами, возможность одновременного проявления и разную степень их влияния на реализацию железнодорожной аварии с ее возможным каскадным развитием.

Поэтому в состав сети Байеса при транспортировании опасных грузов по железной дороге войдет множество элементов, различные сочетания которых могут вызвать в процессе эксплуатации объекта отказ, реализованный в виде некоторого сценария.

Главное положение среди всех факторов занимает категория «Человек», т.к. она влияет на проявление всех остальных факторов. Отдельные подпричины категорий «Технические», «Организационные» и «Внешние» также связаны между собой. На рисунке 50 штрихпунктирные линии – это дополнительные связи между причинами разных категорий факторов. Детальные причины событий устанавливаются экспертами исследуемой области. Детальные причины аварии становятся родительскими узлами сети Байеса. Связь между ними выражается в виде логических элементов конъюнкции и дизъюнкции, нескольких видов распределений, канонического и гибридного моделирования и др. В данной работе авария на железной дороге – это основная опасность и главный дочерний узел сети Байеса.

Сведения о родительских узлах представлены в таблице 3.1.

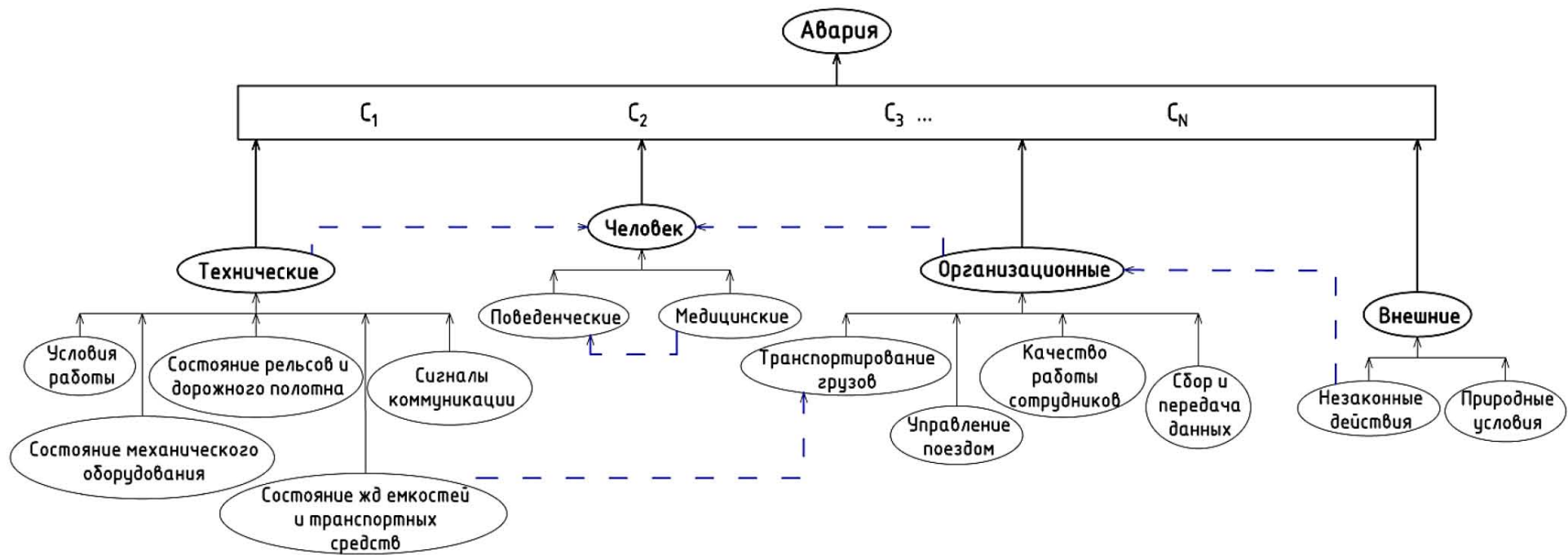


Рисунок 3.2 – Система факторов железнодорожной аварии

Таблица 3.1 – Сведения о родительских узлах сети Байеса

Подпричина отказа (имя узла)	Второстепенные неисправности // дефекты // ошибки
Поведенческий фактор или Поведение	
Память	
Спешка	
Невнимательность	
Паника	
Нарушение дисциплины	
Способность оценки нестандартной аварийной ситуации	
Вредные привычки	Злоупотребление алкоголем или наркотиками
	Курение
Медицинский фактор или Состояние здоровья	
Стресс	Конфликты с другими лицами
	Личные проблемы
	Напряженные отношения в коллективе
Утомляемость в течение смены	
Физические показатели	Рост
	Вес
	Возраст
Склонность ко сну	
Острота зрения и слуха	Ношение очков или линз
	Использование слухового аппарата

Продолжение таблицы 3.1

Недосып	
Чувство голода	
Вредные привычки	Злоупотребление алкоголем или наркотиками
	Курение
Быстрота реакции	
Наличие острых заболеваний	
Прием лекарств и препаратов без наблюдения врача	
Прохождение медосмотра перед сменой	
Технический фактор или Состояние оборудования	
Человеческий фактор	
Условия работы	Наличие элементов отвлечения
	Время суток (время смены)
	Продолжительность смены
	Эргономичность рабочего места
	Температурно-влажностный режим
	Удобство расположения оборудования
	Загрязненность воздуха
	Наличие шумов или вибрации
	Объем рабочей нагрузки
	Ограничение угла зрения
	Уровень освещенности

Продолжение таблицы 3.1

Состояние рельсов и дорожного полотна	Состояние железнодорожной колеи	Искажение колеи	
		Проваливание или провисание колеи	
	Состояние стрелочных переводов		
	Состояние колес осей	Дефекты колеса	
	Уклон пути		
	Угол поворота пути		
	Состояние шпал	Износ шпал	
		Дефекты шпал (ЖБ или Д)	Дефекты деревянных шпал
			Дефекты железобетонных шпал
	Состояние балласта и земляного полотна	Критические участки	
		Стихийные бедствия (землетрясения, оползни, сели и т.д.)	
		Геологические особенности грунта	
		Достаточное количество балластного материала	
		Качество строительных работ	
Качество техобслуживания			
Износ балласта и земляного полотна			

Продолжение таблицы 3.1

	Состояние рельсов	Механические деформации рельсов	
		Снижение технических скоростей грузовых поездов на кривых малого радиуса	
		Состояние других узлов и деталей	
		Климатические особенности	
		Состояние стыков рельсов	
		Наличие дефектов соединительных стержней	
		Наличие дефектов в болтовом соединении	
		Коррозия металла	
		Состояние сварного шва	
		Состояние букс	
		Качество техобслуживания (смазка боковой поверхности рельсов)	
		Критический участок пути	
		Износ рельс	
Сигналы коммуникации	Состояние автоматики		
	Состояние электропроводов		
	Состояние устройств электроснабжения		
	Состояние приемо-передающих устройств		
	Состояние систем автоматического управления		
	Состояние дорожной сигнализации	Видимость дорожной сигнализации	
		Работоспособность дорожной сигнализации	

Продолжение таблицы 3.1

Состояние механического оборудования	Состояние воздухопроводов		
	Состояние гидравлических систем		
	Состояние систем пожаротушения		
	Состояние осей колес локомотива		
	Состояние тормозного оборудования	Состояние воздухораспределителя	Утечка в резьбовом соединении
			Обрыв подводящей трубки
		Износ тормозной системы	
		Правильность крепления деталей	
		Плотность крепления деталей	
		Состояние тормозного подвешивания	
		Чрезмерные нагрузки (непредусмотренные скорости)	
		Состояние рычажной передачи	
	Состояние стояночного тормоза		
		Состояние рычажной передачи	
		Состояние тормозного цилиндра	
	Состояние авторежима		
	Состояние тормозной магистрали		
	Качество техобслуживания		
	Состояние тормозного башмака	Дефекты устройства	
		Достаточность (в количестве)	

Продолжение таблицы 3.1

Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств	Повреждения вагона		
	Дефекты запорной арматуры, сварных швов, фланцевых соединений		
	Попадание посторонних предметов внутрь емкости		
	Фактор транспортирования грузов (обычных и опасных)		
	Износ железнодорожных емкостей и транспортных средств		
Организационный фактор или Организация производственных процессов			
Человеческий фактор			
Транспортирование грузов (обычных и опасных)	Внезапное смещение груза	Правильность комплектации состава (не смешиваются пустые и груженные вагоны)	
		Разработка правил и условий транспортировки	
		Незакрепленный груз	
	Неправильная загрузка	Качество сливо-наливочных работ	
		Превышение тоннажа состава	
		Правильность упаковки грузов	Использование регламентируемой тары или емкости
			Наличие маркировки
	Дальность маршрута		
	Наличие сопровождения (спецперсонал)		
	Наличие жилых застроек, мест скопления людей вдоль маршрута		
	Наличие встречных поездов с опасным грузом в маршруте следования		
	Возникновения пробок или простоев		
	Пересечение маршрута с инженерными коммуникациями (трубопровод, газопровод, теплосеть и т.п.)		
Наличие ОПО рядом с маршрутом			
Интенсивность движения транспорта на маршруте			

Продолжение таблицы 3.1

	Расстояние от жилых застроек до железнодорожных путей
	Географические условия маршрута (вид местности)
	Критический участок пути маршрута
	Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств
Управление поездом	Превышение скорости (на повороте, критических участках и др.)
	Наличие препятствий на трассе
	Нарушение правил ПДД
	Нарушение рабочих инструкций
	Резкое торможение или ускорение
	Несоблюдение отображения сигналов
	Раскачивание вагонов
	Неправильное расположение вагонов (порожний – груженный – порожний)
	Правильность проведения маневровых работ (сортировка вагонов)
	Транспортирование грузов (обычных и опасных)
Сбор и передача данных	Своевременность сообщений
	Проверка готовности маршрута
	Точность сообщений
	Шумовые помехи или вибрации
	Правильность интерпретации устных сообщений
	Достаточная координация работы персонала
	Наличие звуков сигнализации оборудования

Продолжение таблицы 3.1

Качество работы сотрудников (руководства и штатного персонала)	Взаимодействие персонала и руководства
	Наличие защитного оборудования
	Мониторинг состояния системы
	Качество отбора персонала
	Нарушения трудовой дисциплины
	Контроль качества работ (техобслуживание + управление составом + диспетчеризация)
	Разработка мероприятий по снижению риска
	Качество совместной работы
	Соблюдение железнодорожных стандартов и правил
	Опыт работы сотрудников
	Недостаточный уровень профессиональных знаний сотрудников
	Профессиональная подготовка персонала
	Сбор статистических данных о железнодорожных ЧС
	Планирование мероприятий в случае ЧС
	Недостаточное инвестирование отрасли
	Наличие системы штрафов (за ошибки во время выполнения работы)
	Прохождение медосмотра перед сменой
Человеческий фактор	
Поведенческий фактор	
Медицинский фактор	

Продолжение таблицы 3.1

Фактор внешних воздействий		
Природные условия	Наличие тумана	
	Облачность	
	Скорость ветра	
	Температура окружающего воздуха	
	Стихийные бедствия	
	Влажность окружающего воздуха	
	Осадки	
	Длительный контакт с водой	
	Повторное замораживание и оттаивание	
	Падение предметов (деревья, камнепад и т.д.)	
Незаконные действия	ДТП (с другим транспортным средством)	
	Террор	
	Нелегальное пересечение железнодорожных путей	Отсутствие пешеходной инфраструктуры
		Отсутствие защитных ограждений
		Это самый кратчайший путь
Близость к административным зданиям (школа, больница и т.д.)		



3.2.3 Моделирование аварии на железной дороге при транспортировании опасных грузов

Следующим этапом стала разработка сети Байеса, моделирующей развитие аварии при транспортировании опасных грузов по железной дороге. Для определения детальных причин аварии изучены научные публикации, посвященные изучению вопросов безопасности инженерных систем [4–17]. Согласно им составлен перечень возможных причин железнодорожной аварии.



Основной опасностью является главный узел «Авария на железной дороге». На его проявление влияют основные причины (человеческие, организационные, технические и внешние факторы) и детальные причины (одна из них это поведенческий фактор). На частоту его проявления влияют множество еще более мелких факторов: нарушение дисциплины, паника, спешка и др. Выделим некоторые важные особенности создания сети:

Виды узлов в сети Байеса. ПК «GeNIe» допускает создание узлов нескольких типов. Таблица 3.2 содержит примеры узлов сети по типам.

Таблица 3.2 – Типы узлов сети Байеса

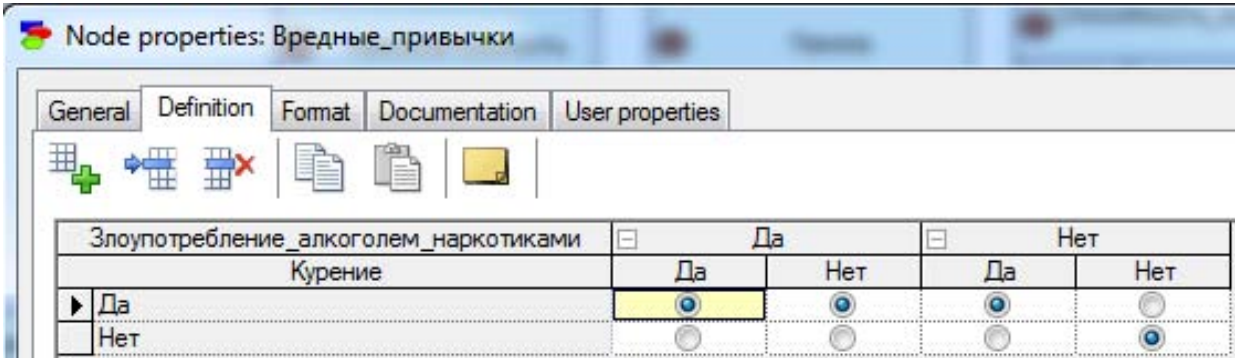
Название узла и графическое изображение	Подтип узла	Название узла сети Байеса
1	2	3
Chance nodes Овал любого цвета 	- General	- «Злоупотребление алкоголем или наркотиками»; - «Курение»; - «Спешка».
	- Noisy Max	- «Условия работы»; - «Состояние рельсов и дорожного полотна»; - «Организационный фактор».
	- NoisyAdder	- ??
Deterministic nodes (Детерминированные узлы) Двойной овал 		- «Невнимательность»; - «Паника»; - «Нарушение дисциплины»; - «Способность оценки нестандартной ситуации».

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3
Equation nodes (Узлы уравнений) Овал + волна  		- «Износ рельсового оборудования»; - «Износ шпал»; - «Износ балласта и земляного полотна».

Логические операции И и ИЛИ. Для узлов, имеющих тип «Deterministic», построена связь на основе булевой алгебры с помощью логических операций И и ИЛИ. Например, узел «Злоупотребление алкоголем или наркотиками» и «Курение» (категория факторов «Поведенческие») связаны логической операций ИЛИ. В таблице 3.3 представлен процесс заполнения таблицы условных вероятностей (СРТ – Conditional Probability Table) для дочернего узла «Вредные привычки».

Таблица 3.3 – Условная вероятностная таблица для узла «Вредные привычки»



The screenshot shows the 'Node properties: Вредные_привычки' dialog box with the 'Definition' tab selected. It displays a Conditional Probability Table (CPT) for the node. The table has two parent nodes: 'Злоупотребление_алкоголем_наркотиками' and 'Курение'. The parent nodes are each set to 'Да' (Yes). The CPT table is as follows:

		Да		Нет	
		Да	Нет	Да	Нет
Курение	Да	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Нет	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

СРТ выражает логическую операцию ИЛИ между родительскими узлами (т.е. сотруднику достаточно курить или принимать алкоголь (или наркотики), чтобы был подтвержден факт наличия вредных привычек). На самом деле связь между событиями неопределенна и носит случайный характер. Однако моделирование детерминированных отношений встречается намного чаще других. С одной стороны, это может привести к искажению результатов расчета, с другой – дает возможность более строгой оценки параметров модели. Таблица 3.4 выражает логическую операцию И между узлами «Искажение колеи» и «Проваливание или провисание колеи» (т.е. состояние колеи будет нормативным только тогда, когда отсутствует и провисание колеи, и ее искажение).

Таблица 3.4 – Условная вероятностная таблица для узла «Состояние железнодорожной колеи»

Искажение_колеи	Раширение		Изогнутость		нет	
	Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Проваливание_провисание_колеи	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Нормативное	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Ненормативное	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Построение канонических узлов «Chance-NoisyOr». Увеличение числа родительских узлов сети неизбежно ведет к резкому увеличению числа дочерних и подчиняется экспоненциальному закону. Т.е. для любого дочернего узла, имеющего n родительских узлов, необходимо указать 2^{n+1} условных вероятностей.

Использование специальных **канонических узлов** требует задание всего $n+1$ условных вероятностей. Это сокращает сложность вычислений без потери точности результата расчета. Канонический узел моделирует не только отдельно взятые причины, но и неявные. Неявные причины в равной мере оказывают влияние на реализацию события с вероятностью утечки (Leak). Связь родительских и канонического (дочернего) узлов задается формулой:

$$\begin{aligned}
 & (\text{Эффект} | \text{Причина 1, Причина 2, ... Причина } n) = \\
 & = \text{NoisyOR} (\text{Эффект}, \text{leak}, \text{Причина 1}, p_1, \text{Причина 2}, p_2, \dots \text{Причина } n, p_n), \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Примером канонического узла является элемент сети «*Поведенческий фактор (Поведение)*». Поведение сотрудника железной дороги зависит от действия 8-ми факторов:

- причина 1 = «Невнимательность»;
- причина 2 = «Паника»;
- причина 3 = «Способность оценки нестандартной ситуации»;
- причина 4 = «Нарушение дисциплины»;
- причина 5 = «Медицинский фактор (Состояние здоровья)»;
- причина 6 = «Память (Забывчивость)»;
- причина 7 = «Спешка»;
- причина 8 = «Вредные привычки».

- $leak = 0,001$ – вероятность проявления «Поведенческого фактора (Поведения)» в отсутствие указанных причин;

- $p_1 \dots p_8$ – вероятности воздействия каждой причины (родительских узлов) на дочерний узел.

Все 8 узлов–причин действуют на него независимо друг от друга (рисунок 3.5). Его проявление возможно даже, когда ни одна из представленных причин не активна (т.е. под действием неявных причин).

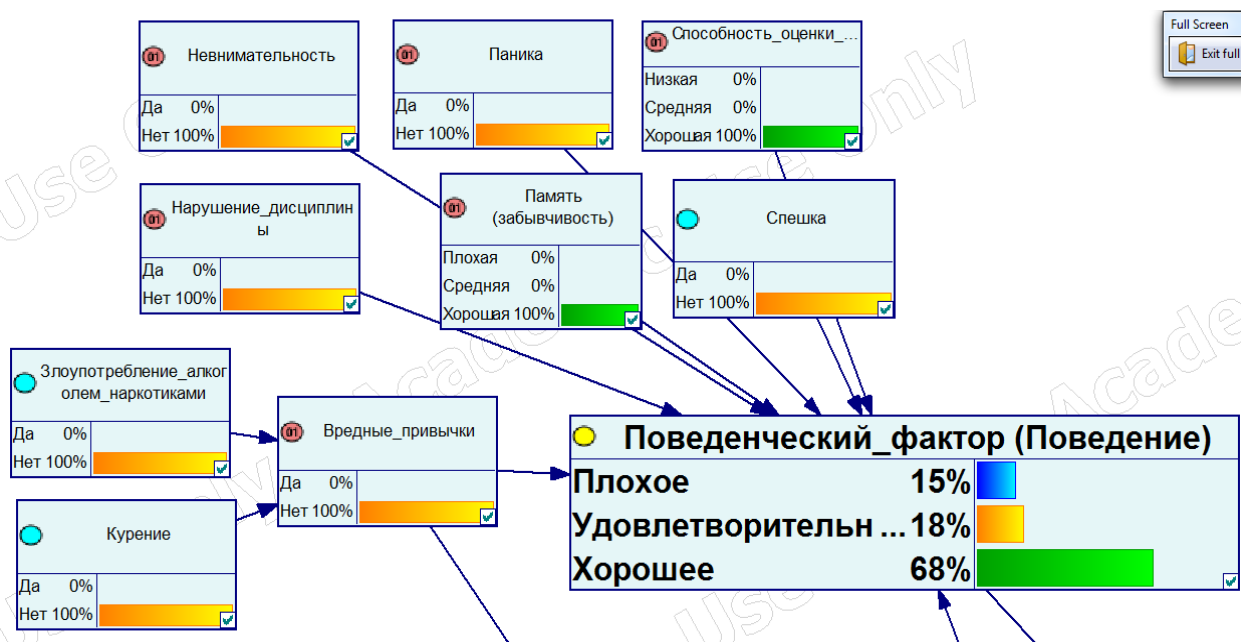


Рисунок 3.5 – Канонический узел «Поведенческий фактор (Поведение)»

3.2.4 Учет износа железнодорожного оборудования

При разработке модели было учтено важнейшее явление износа железнодорожного оборудования. Воздействие физико-химических процессов приводит накоплению дефектов в оборудовании. Постепенно оно начинает стареть быстрее, чем в начальный период. Тем самым, увеличивается и доля вероятности отказа всей системы.

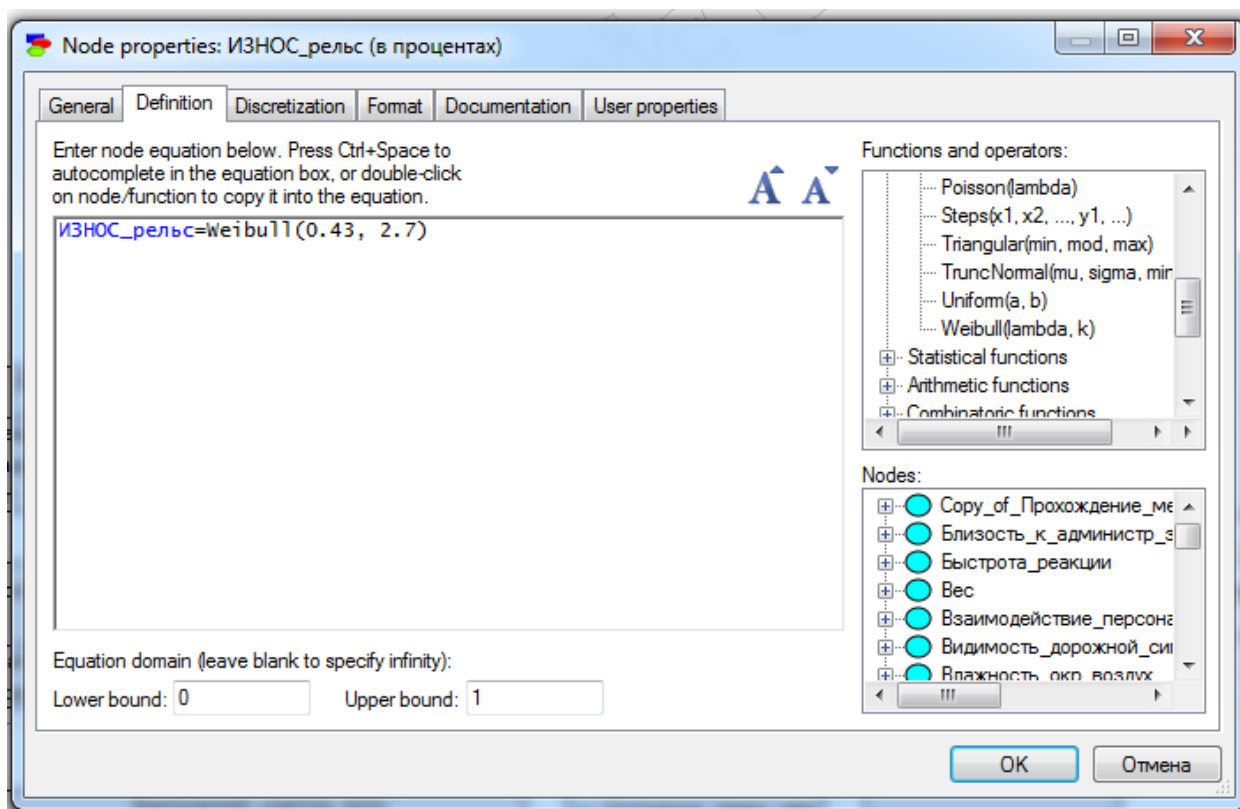
Для моделирования износа использован двухпараметрический закон распределения Вейбулла. Он более точен и «гибок», чем остальные однопараметрические законы, и достаточно точно описывает вероятность отказа машин уже на стадии износа. Разные виды установок имеют конкретные значения параметров распределения. В таблице 3.3 представлены значения параметров для железнодорожного оборудования [18].

Таблица 3.3 – Значения параметров распределения Вейбулла

№	Тип оборудования	η	β
1	Рельсовое оборудование	0,41	2,7
2	Шпалы	0,52	3,6
3	Балласт и земляное полотно	0,48	3,0
4	Тормозная система	0,4	2,51
5	Железнодорожные емкости и транспортные средства	0,63	4,85
6	Пассажирский вагон	0,6	4,31

Узлам, связанным с износом, был присвоен тип «*Equation nodes (Узлы уравнений)*» с заданием возможных состояний и их интервалов вероятностей («*Работоспособное*», «*Ограниченно работоспособное*», «*Аварийное*»).

На рисунках 3.6 и 3.7 представлен процесс создания узла «*Износ рельсов*».



	Label	From	To
	Работоспо...	0	0.1
▶	Ограничен...	0.1	0.55
	Аварийное	0.55	1

Рисунок 3.6 – Создание узла «*Износ рельсов*»

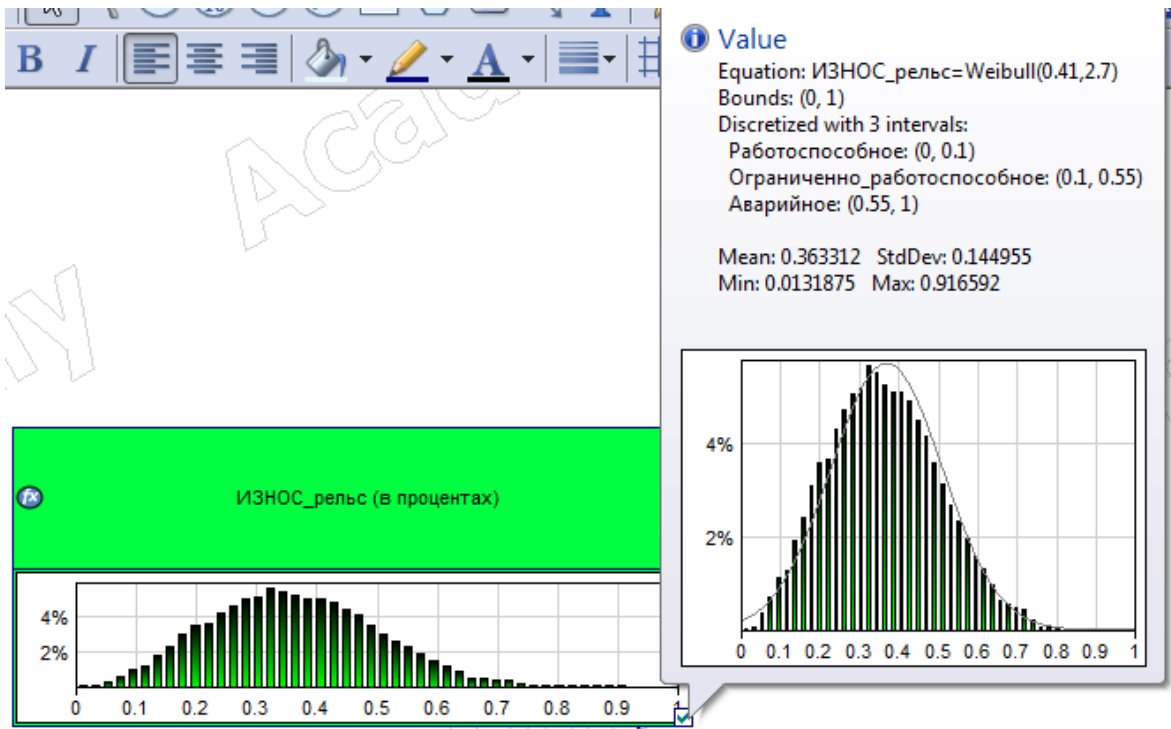


Рисунок 3.7 – Свойства узла «Износ рельсов»

В результате моделирования развития аварии на железной дороге с участием опасных была получена гибридная байесовская сетевая модель (196 узлов), включающая в себя как из дискретные, так и непрерывные переменные.

На рисунках 3.8–3.13 представлены фрагменты сети.

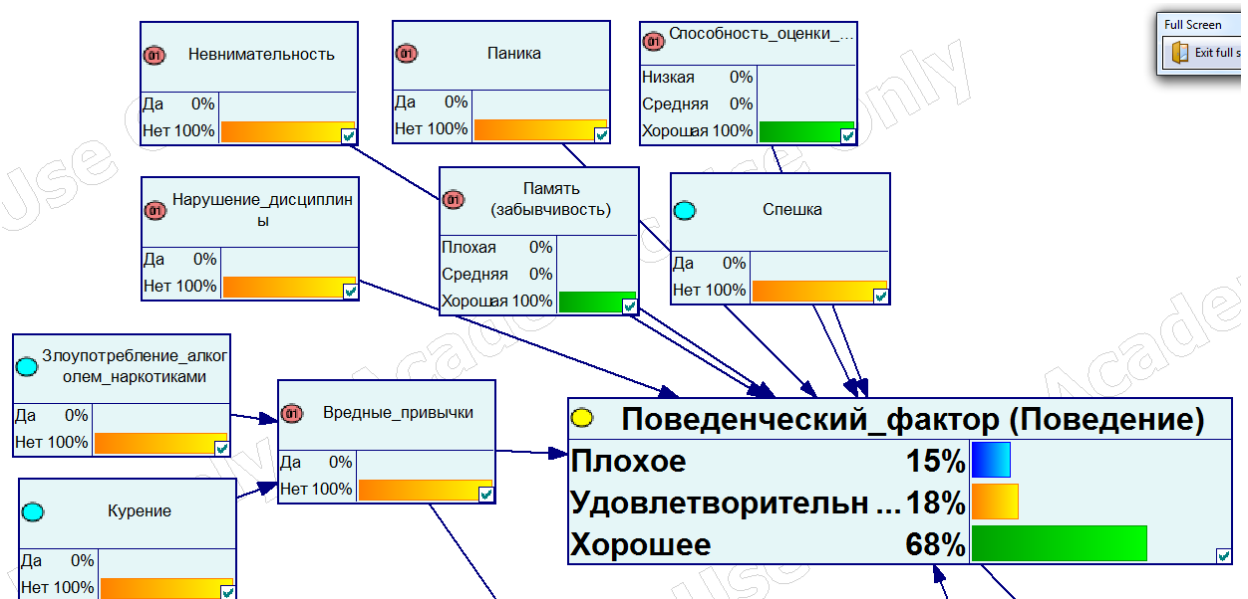


Рисунок 3.8 – Категория причин «Поведенческий фактор (Поведение)»

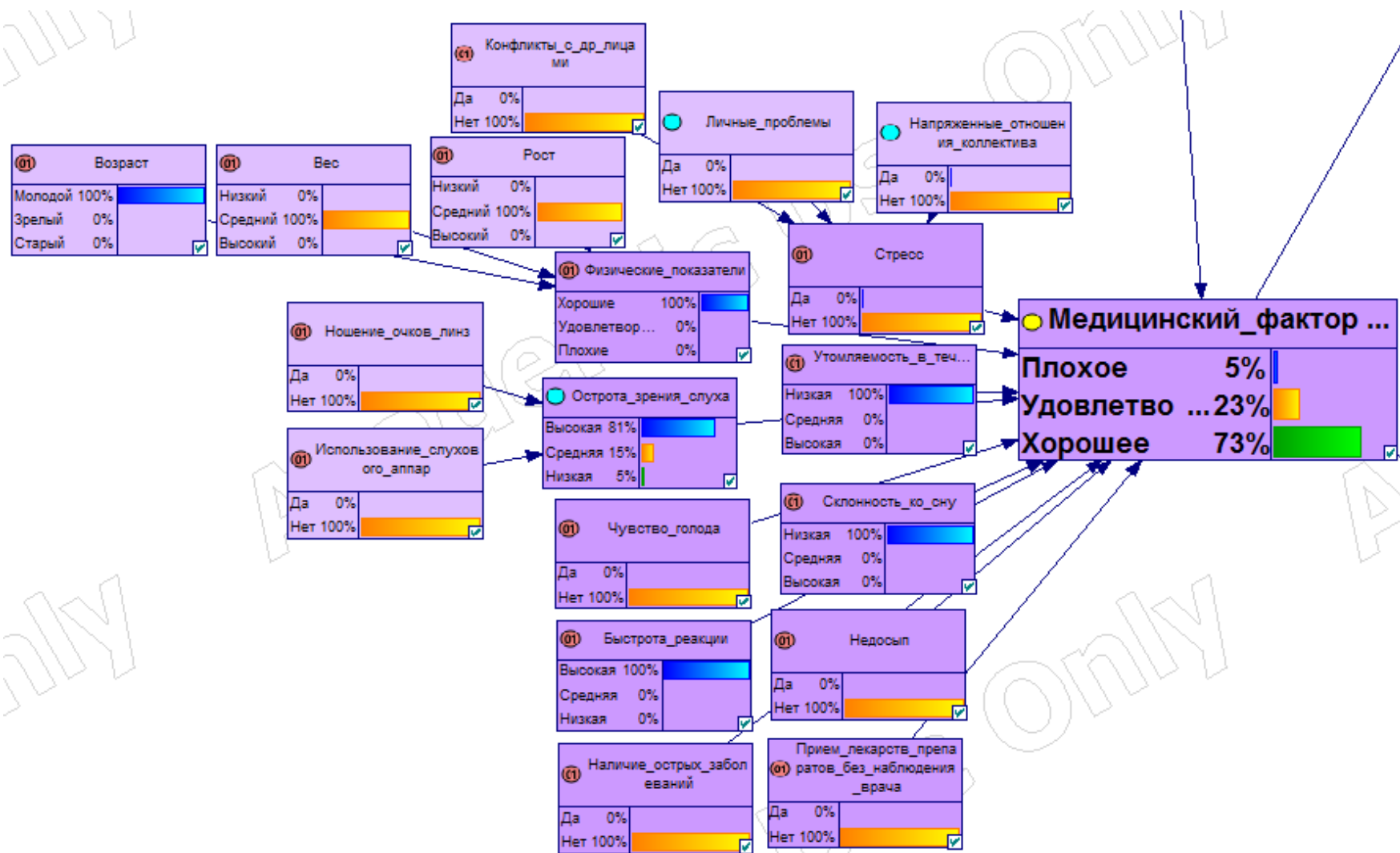


Рисунок 3.9 – Категория причин «Медицинский фактор (Состояние здоровья)»

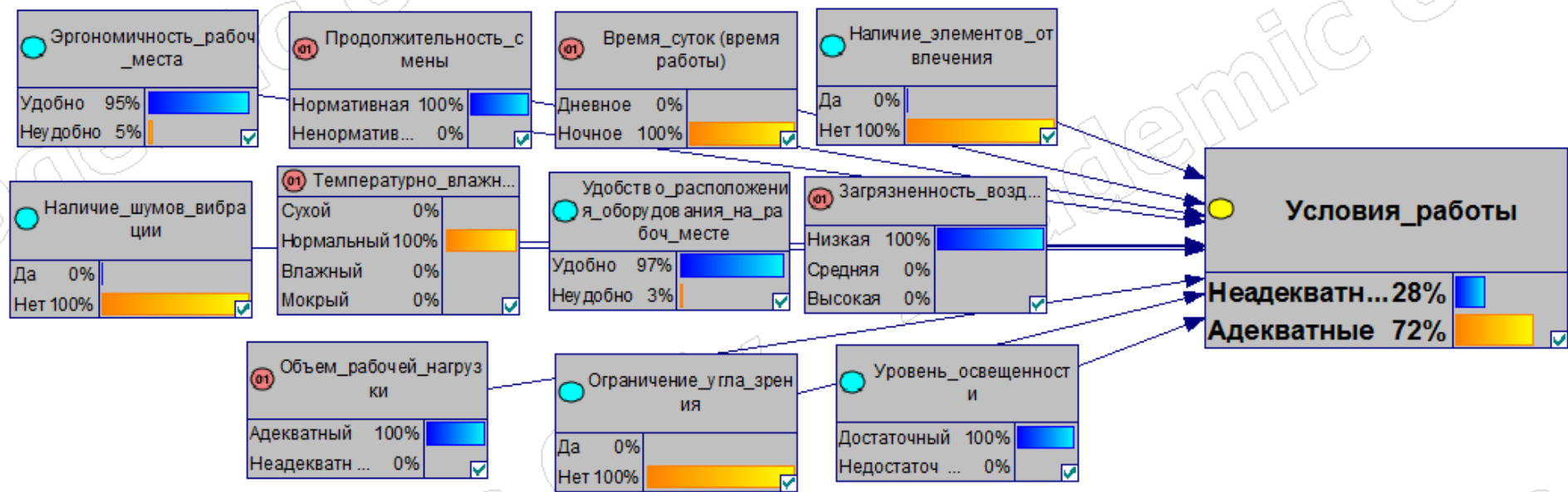


Рисунок 3.10 – Категория причин «Условия работы»

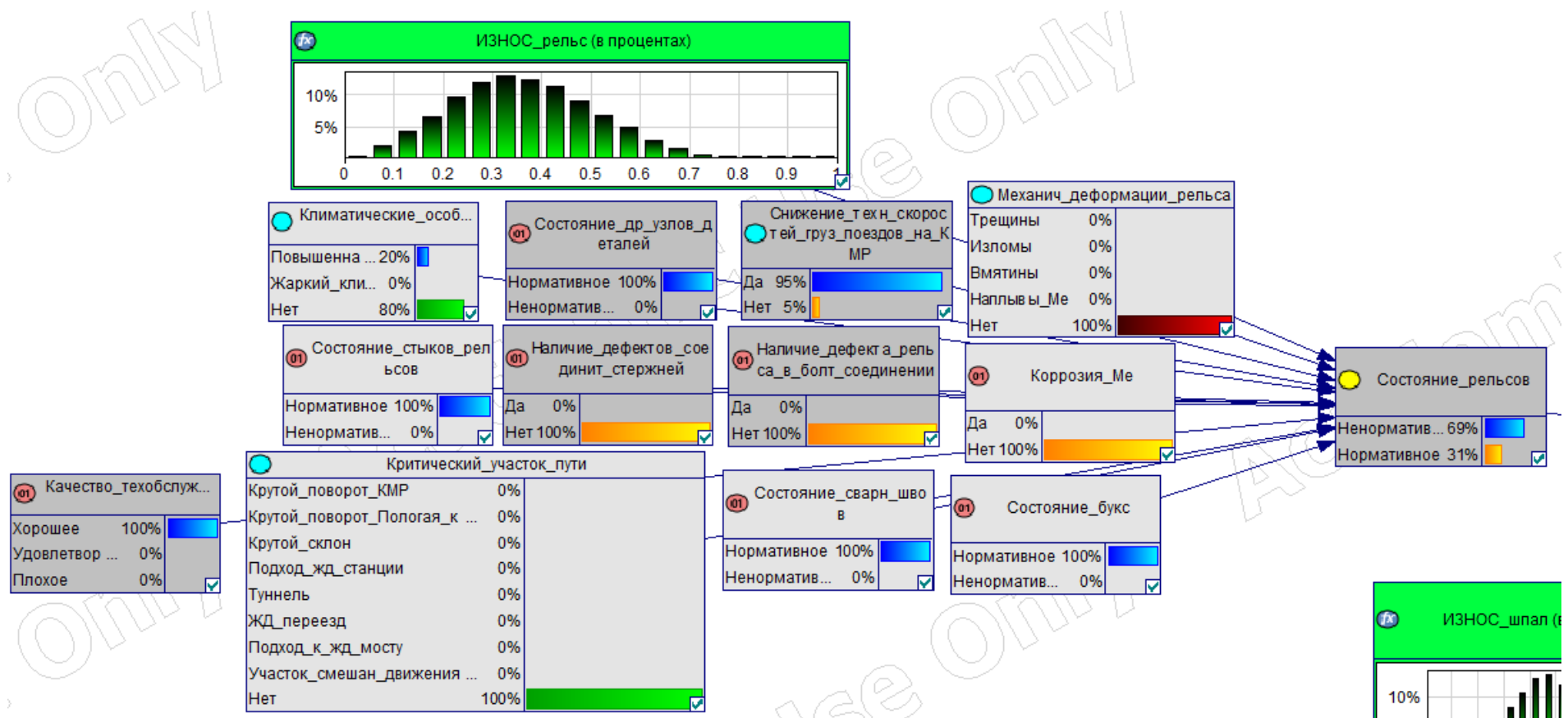


Рисунок 3.11 – Категория причин «Состояние рельсов»

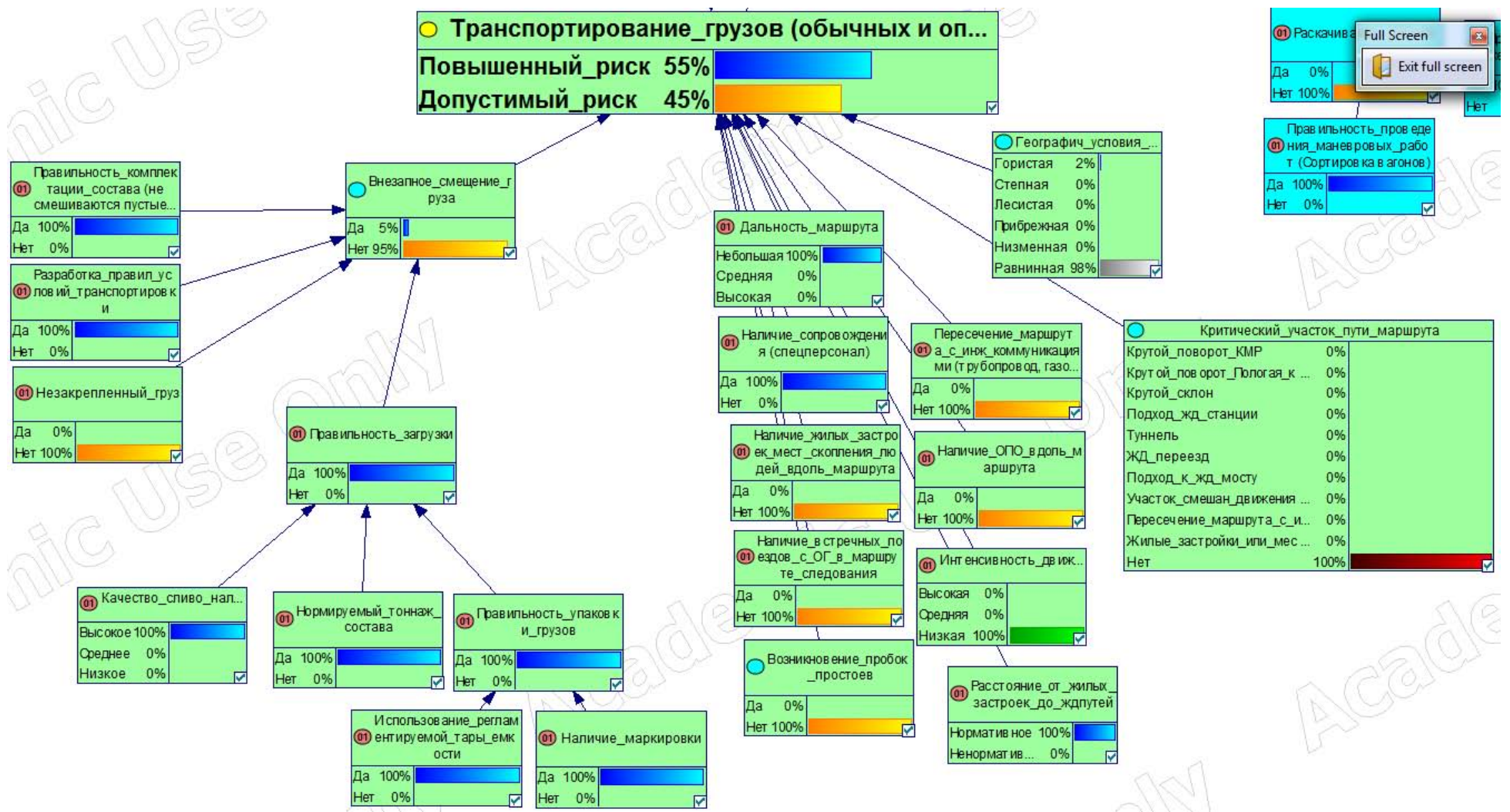


Рисунок 3.12 – Категория причин «Транспортирование грузов (обычных и опасных)»

В режиме диагностики была рассчитана вероятность главного узла «Авария на железной дороге». Предположим, что все мероприятия по предотвращению аварии проведены, т.е. персонал выполняет работу качественно, все отраслевые правила, профессиональные обязанности соблюдаются, а первопричины аварии своевременно устраняются. При данных условиях вероятность железнодорожной аварии с участием опасного груза составляет 85 % (рисунок 3.13). Наибольший вклад в развитие аварии вносят технические и организационные причины, тесно связанные с проявлением человеческого фактора. Следовательно, именно человеческий фактор принимается иницирующим и более важным в создании аварийной ситуации.

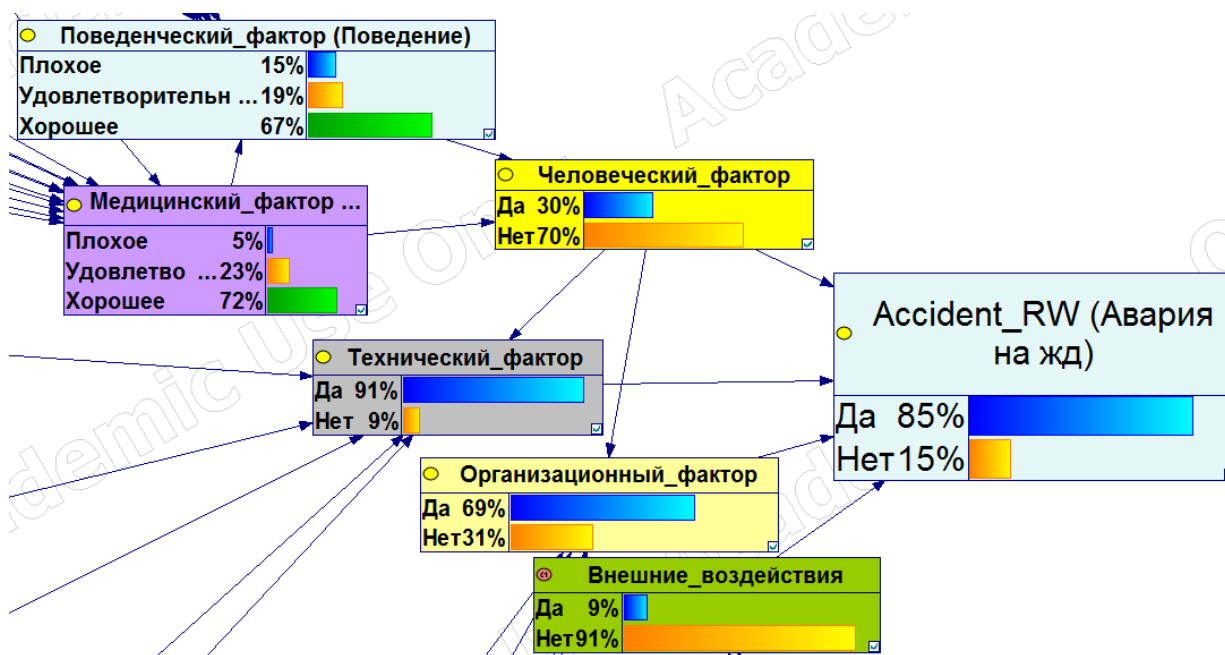


Рисунок 3.13 – Результат расчета модели

Высокий уровень износа оборудования также сказывается на результате расчета сети. Большая часть железнодорожного оборудования была введена в эксплуатацию еще в советский период. Требуется срочная замена такого оборудования. Особенно это касается железнодорожных емкостей и транспортного оборудования.

Предположим, что авария точно произошла. Установим вероятность 100 % для узла «Авария на железной дороге», сеть автоматически пересчитывается.

В случае 100 % вероятности аварии основными причинами становятся факторы: человеческий (вероятность сменилась с 30 до 34 %), технический (с 91 до 96 %) и организационный (с 69 до 76 %). Достаточно 34 %-го проявления человеческого фактора для реализации аварии (рисунок 3.14). Сравним рисунки 3.13 и 3.14. Значения

вероятностей значительно не отличаются. Приходим к выводу о наличии серьезного кризиса в железнодорожной отрасли, связанного преимущественно с износом оборудования и проявлением человеческого фактора.

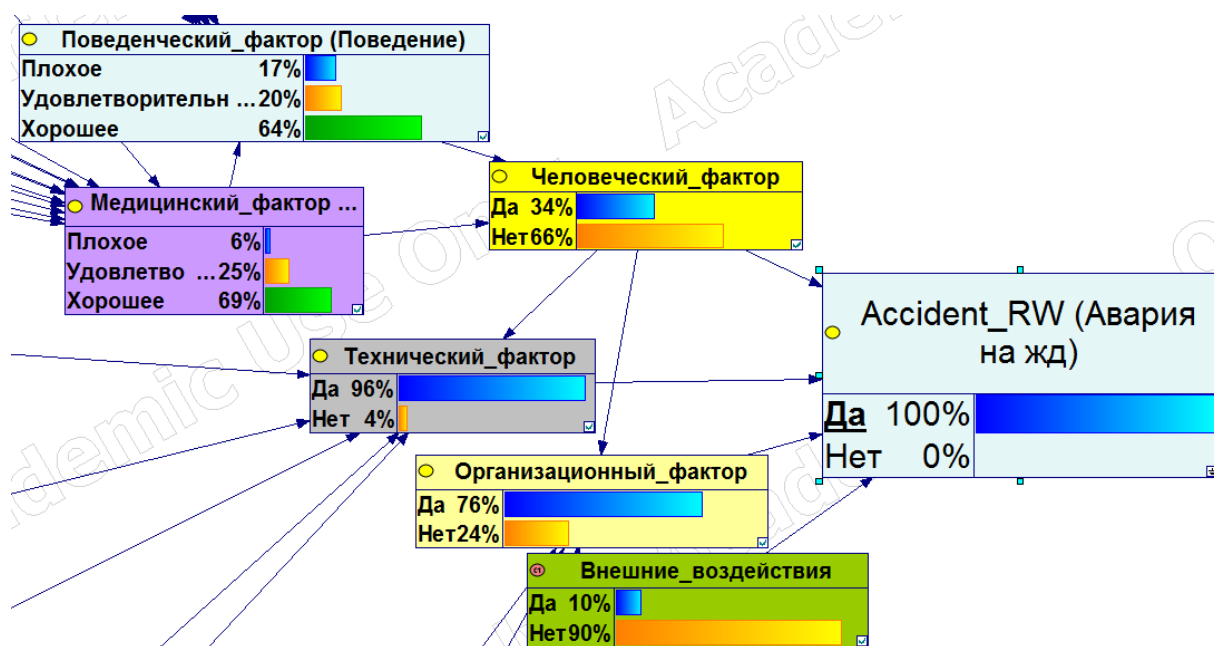


Рисунок 3.14 – Узел «Авария на железной дороге» в состоянии «Да» = 100 %

Для моделирования сети в качестве входных данных использованы случайные значения.

На рисунке 3.15 представлен фрагмент разработанной модели.

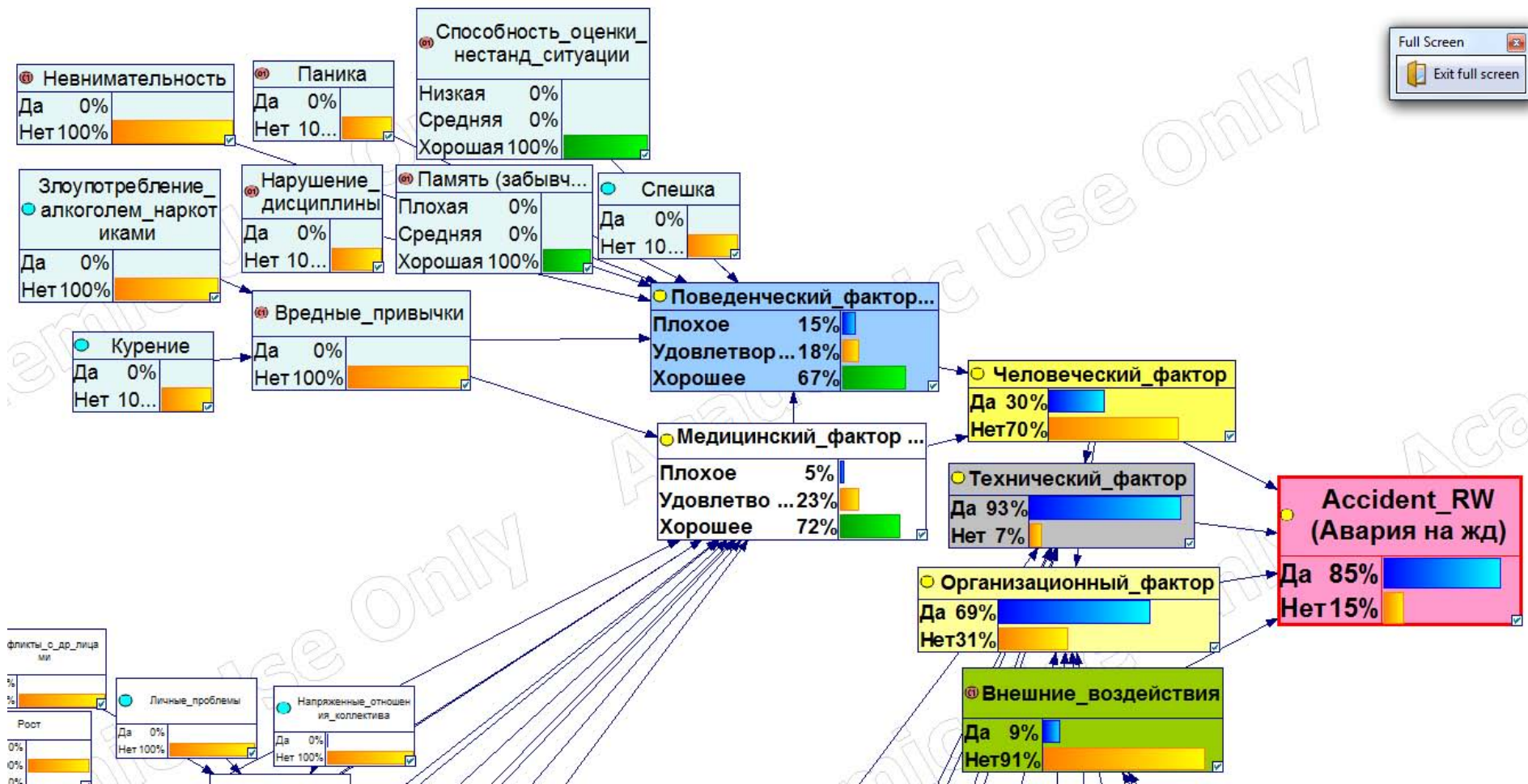


Рисунок 3.15 – Фрагмент байесовской сетевой модели

3.2.5 Алгоритм реализации разработанной методики на примере железнодорожной аварии с участием опасных грузов

Авария 1988 г. на станции «Свердловск–Сортировочный» г. Екатеринбург

Разработанная модель была протестирована на примере реальной аварии 1988 г. станции «Свердловск–Сортировочный» г. Екатеринбург. «Свердловск–Сортировочный» была крупнейшей железнодорожной станцией СССР. Рано утром 4 октября 1988 г. через нее секретно проходил поезд со взрывчаткой (груз Минобороны). Поезд по ряду причин скатился с сортировочной горки и столкнулся с транзитным составом, перевозившим уголь.

Произошел сильнейший взрыв силой 6–8 баллов. Ударная волна распространилась по всему городу на 10–15 км, начался пожар. Пострадало более 1000 чел., погибло – 6 чел. Ущерб от взрыва составил примерно 300 млн. руб. Расследование аварии длилось 4 года. Виновные не были установлены. Специалисты называли официальные причины ЧС: *«причиной крушения грузового поезда с последующим взрывом вагонов стало нарушение правил безопасности при производстве маневровой работы, которое было усугублено наличием в схеме железнодорожного путевого развития секущих маршрутов пропуска транзитных грузовых поездов и надвига составов на сортировочную горку, а также превышением допустимых продольных уклонов железнодорожного путей в нечетном парке приема...»*.

Для определения причин данной катастрофы разработанная модель была отредактирована в соответствии с архивными данными [19].

Анализ результатов расчета. ПК «GeNIe» может работать в режимах: *«Sensitivity Analysis (Анализ чувствительности)»* и *«Diagnosis (Диагностика)»*. Они служат для определения критических показателей модели, тем самым значительно повышая качество управления инженерной системой.

Далее с помощью указанных процедур представлен анализ наиболее важных причин аварии на станции «Свердловск-Сортировочный».

Оценка риска аварии. Для количественной оценки аварии 1988 г. необходимо отредактировать разработанную сеть: дискретизировать и выполнить расчет с входными данными исследуемого события.

По результатам расследования были выделены основные факторы аварии:

- нарушение правил безопасности при производстве маневровых работ,
- наличие пересекающихся маршрутов поездов,

- превышение допустимых уклонов железнодорожных путей,
- неадекватный уровень рабочей нагрузки диспетчерского персонала,
- высокоинтенсивный грузопоток через станцию,
- надвиг состава на сортировочную горку,
- ошибки при проектировании путепроводов над станцией (слишком низко относительно уровня земли),
- отсутствие планирования мероприятий в случае ЧС,
- грубое нарушение правил перевозки опасных грузов (ненадлежащая упаковка, отсутствие правильного крепления, маркировки, сопровождающего персонала),
- недостаточный уровень техобслуживания железнодорожного оборудования и др.

Приведенные факторы рассмотрены в качестве узлов первопричин. Характер рабочего процесса на станции, состояние технических систем, качество работы руководства в совокупности создали нежелательные условия для каскадного развития аварии.

Дискретизация сети необходима для перевода непрерывных переменных в дискретные (для узлов износа оборудования). Будем считать, что данный показатель в 1988 г. имел состояние «Работоспособное» в пределах 85–95 %, а серьезные дефекты оборудования отсутствовали.

Ниже представлен список первопричин (узлов сети и их состояний), значительно влияющих на расчет сети для рассматриваемого случая.

Поведенческий фактор:

- «Невнимательность» («Да» = 100 %),
- «Способность оценки нестандартной ситуации» («Средняя» = 100 %).

Медицинский фактор:

- «Утомляемость в течение смены» («Да» = 100 %).

Технический фактор:

1) *Условия работы:*

- «Время суток» («Ночное» = 100 %),
- «Объем рабочей нагрузки» («Неадекватный» = 100 %).

2) *Состояние рельсов и дорожного полотна:*

- «Уклон пути» («Ненормативный» = 100 %),
- «Износ шпал» («Работоспособное» = 91 %, «Ограниченно работоспособное» = 9 %),

– «Износ балласта и земляного полотна» («Работоспособное» = 89 %, «Ограниченно работоспособное» = 11 %),

– «Износ рельс» («Работоспособное» = 89,5 %, «Ограниченно работоспособное» = 10,5 %),

– «Критический участок пути» («Крутой склон» = 82 %, «Участок смешанного движения поездов (грузовые и пассажирские)» = 12 %, «Подход к железнодорожной станции» = 6 %).

3) *Состояние механического оборудования:*

– «Состояние систем пожаротушения» («Ненормативное» = 100 %),

– «Износ элементов тормозной системы» («Работоспособное» = 67 %, «Ограниченно работоспособное» = 33 %),

– «Чрезмерные нагрузки» («Наличие» = 100 %),

– «Качество техобслуживания тормозной системы» («Удовлетворительное» = 100 %),

– «Достаточность» (количество тормозных башмаков) («Нет» = 75 %).

4) *Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств:*

– «Износ железнодорожных емкостей транспортных средств» («Работоспособное» = 78 %, «Ограниченно работоспособное» = 22 %),

– «Износ вагонов перевозки угля» («Работоспособное» = 79 %, «Ограниченно работоспособное» = 21 %, это новый добавленный узел, т.к. в аварии участвовали вагоны с углем),

– «Разработка правил и условий транспортирования опасных грузов» («Нет» = 100 %),

– «Незакрепленный груз» («Да» = 100 %),

– «Использование регламентируемой тары или емкости» («Нет» = 100 %),

– «Наличие маркировки» («Нет» = 100 %),

– «Наличие сопровождения» («Нет» = 100 %),

– «Наличие встречных поездов с опасным грузом в маршруте следования» («Да» = 100 %),

– «Интенсивность движения транспорта на маршруте» («Да» = 100 %),

– «Критический участок пути» («Крутой склон» = 82 %, «Участок смешанного движения поездов (грузовые и пассажирские)» = 12 %, «Подход к железнодорожной станции» = 6 %).

Организационный фактор:

1) *Управление поездом:*

– «Правильность проведения маневровых работ» («Нет» = 65 %).

2) Сбор и передача данных:

- «Достаточная координация работы персонала» («Нет» = 100 %),
- «Проверка готовности маршрута» («Нет» = 100 %).

3) Качество работы сотрудников:

- «Мониторинг состояния системы» («Нет» = 100 %);
- «Контроль качества работ» («Нет» = 100 %);
- «Разработка мероприятий по снижению риска» («Нет» = 100 %);
- «Качество совместной работы смены» («Среднее» = 100 %);
- «Соблюдение железнодорожных стандартов и правил» («Нет» = 100 %);
- «Планирование мероприятий в случае ЧС» («Нет» = 100 %).

В обновленной сети непрерывные переменные (узлы износа) заменены на дискретные (рисунок 3.16).

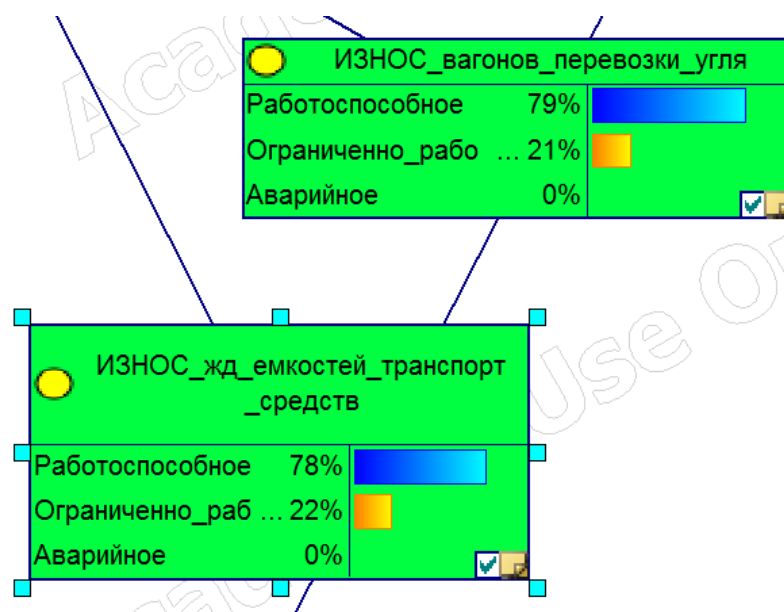


Рисунок 3.16 – Дискретизированные узлы износа

Ниже на рисунке 3.17 представлен результат расчета аварии. Заметен вклад человеческого и организационного факторов в развитие главного события. В день случившегося лица, ответственные за перевозку опасного груза, сотрудники станции (руководство в том числе) выполнили свои обязанности некачественно. Совокупность факторов привела к аварии с 97 % вероятностью. Не удивительно, что после столкновения поездов любые действия персонала уже не оказывали положительного эффекта для предотвращения каскадного развития событий.

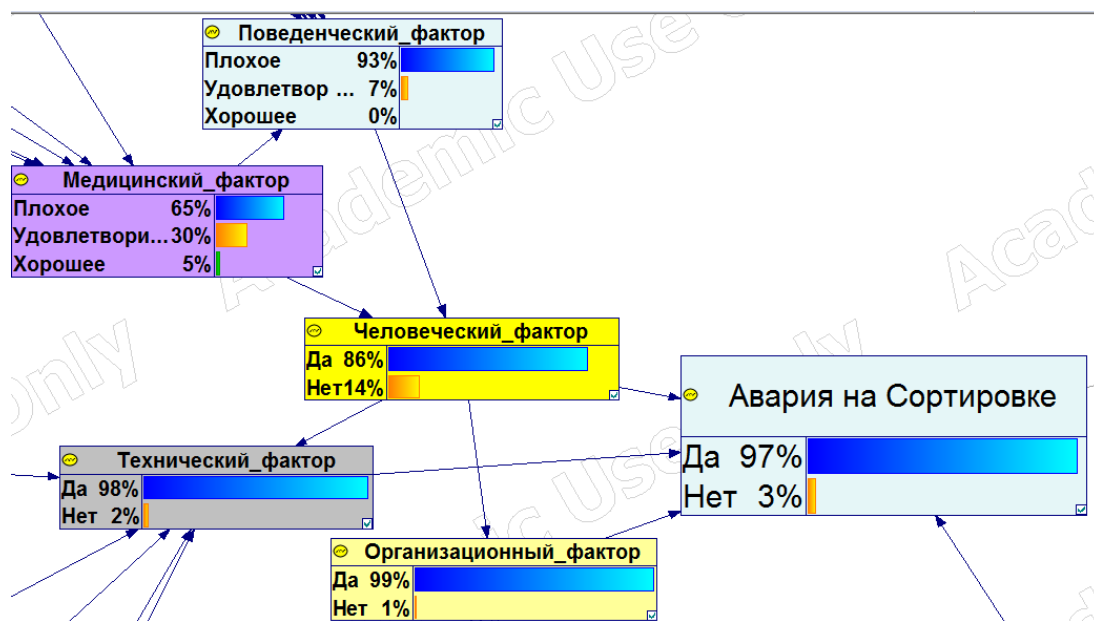


Рисунок 3.17 – Расчет вероятности аварии на станции «Свердловск–Сортировочный»

3.2.6 Диагностика и прогнозирование причин аварии

В случае анализа аварии с помощью традиционного метода оценки рисков невозможно предвидеть ее возникновение. Однако используя свойства сетей Байеса, можно получить представление о наиболее уязвимых элементах системы заранее.

Диагностическая и прогностическая возможности значительно повышают качество управления инженерной системой, позволяют руководству, рабочему персоналу принимать обоснованные решения по техническому обслуживанию, а в случае аварии определять приоритетные меры по смягчению отказов. Тем самым снижаются эксплуатационные затраты, обычно превышающие затраты на изготовление системы. Особенно это важно для критически важных объектов, аварийное состояние которых угрожает жизни населения, окружающей среде, ремонт или замена которых дорогостоящи. Такой вид анализа очень сложен и практически невозможен в традиционном QRA.

Разработанная сеть Байеса может помочь в диагностировании состояния железнодорожной системы, осуществить прогноз ее состояния с учетом текущего времени в условиях ограниченной информации. Далее сфокусируемся на применении модели в целях диагностирования причин аварии 1988 г.

3.2.7 Тестирование модели в режиме диагностики

Вероятность аварии на станции «Свердловск–Сортировочный» оказалась высокой по сравнению с нормальным состоянием объектов такого типа. После проведения расчета появляется возможность диагностирования критических параметров отказа. В процессе диагностики используется принцип ранжированности узлов с обязательным назначением диагностической роли. Окно диагностики имеет 4 специальных поля (рисунок 3.18):

- 1 – для ненаблюдаемых ранжированных неисправностей;
- 2 – для ранжированных наблюдений;
- 3 – для обязательных наблюдений;
- 4 – для ранжированных и обязательных наблюдений (исследуемых).

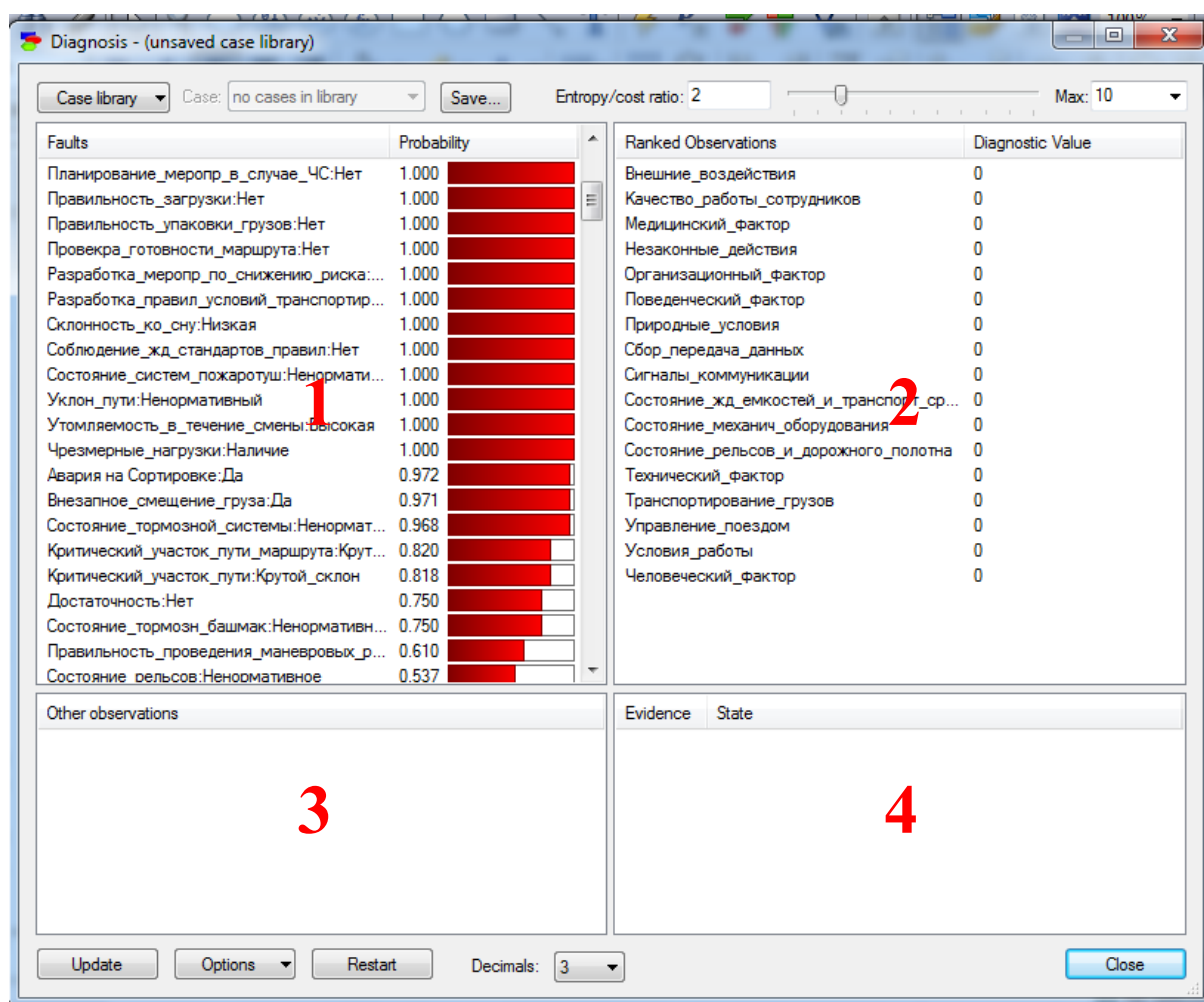


Рисунок 3.18 – Диалоговое окно «Testing Window (Окно диагностики)»

Обязательное наблюдение – это данные узлов, предоставляемые до начала устранения неполадок. Свойство обязательности узла указывает на то, что они должны соблюдаться в первую очередь и выделены красным цветом.

Для анализа **ранжируемой неисправности** требуется в поле 1 выделить правой кнопкой мыши требуемое событие (например, «Авария на Сортировке») с состоянием узла «Да» и использовать команду «Pursue this fault (Проследить этот отказ)». Выбранная неисправность загорится красным цветом в поле 1, а в поле 2 появится ранжированный список наблюдаемых событий в порядке уменьшения влияния на указанный узел. Данное действие изображено на рисунках 3.19, 3.20.

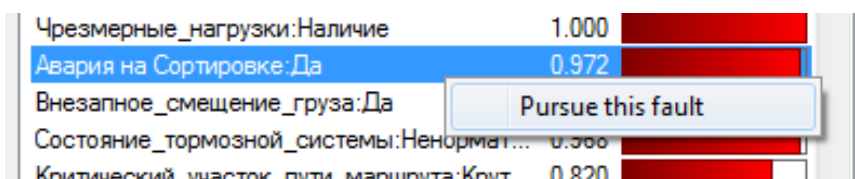


Рисунок 3.19 – Выбор узла неисправности «Авария на Сортировке» для диагностики

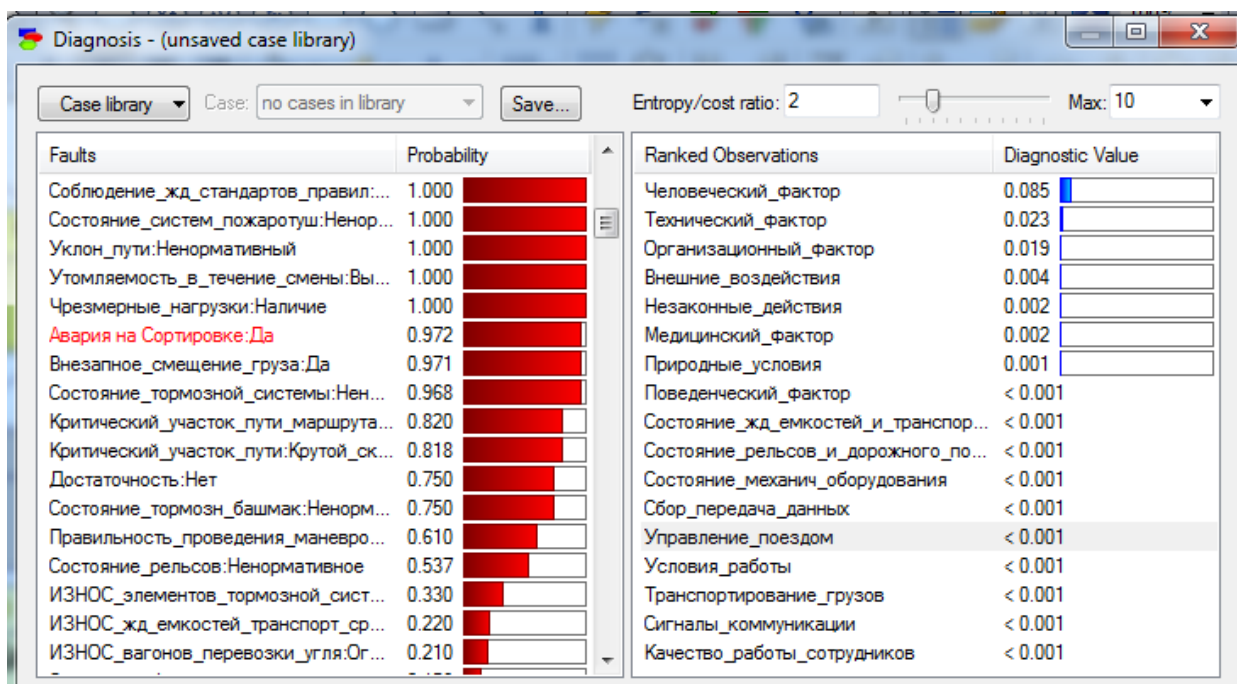


Рисунок 3.20 – Ранжирование наблюдений для узла неисправности «Авария на Сортировке»

По результатам диагностики видно, что основной вклад в развитие аварии 1988 г. внесли человеческий фактор, затем технический и организационный.

Далее установлен ранжированный список причин аварии. Диагностическая роль узла «Авария на Сортировке» заменяется на узел наблюдения, устанавливается исследуемое состояние «Да» в поле 2 (рисунок 3.21). В поле 1 формируется список неисправностей (рисунок 3.22 а, б), в поле 2 – список наблюдений, имеющих отношение к узлу «Авария на Сортировке».

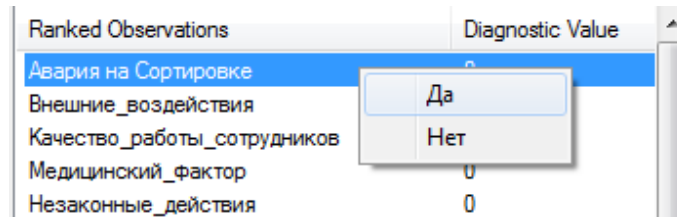


Рисунок 3.21 – Выбор узла неисправности «Авария на Сортировке» для диагностики

a

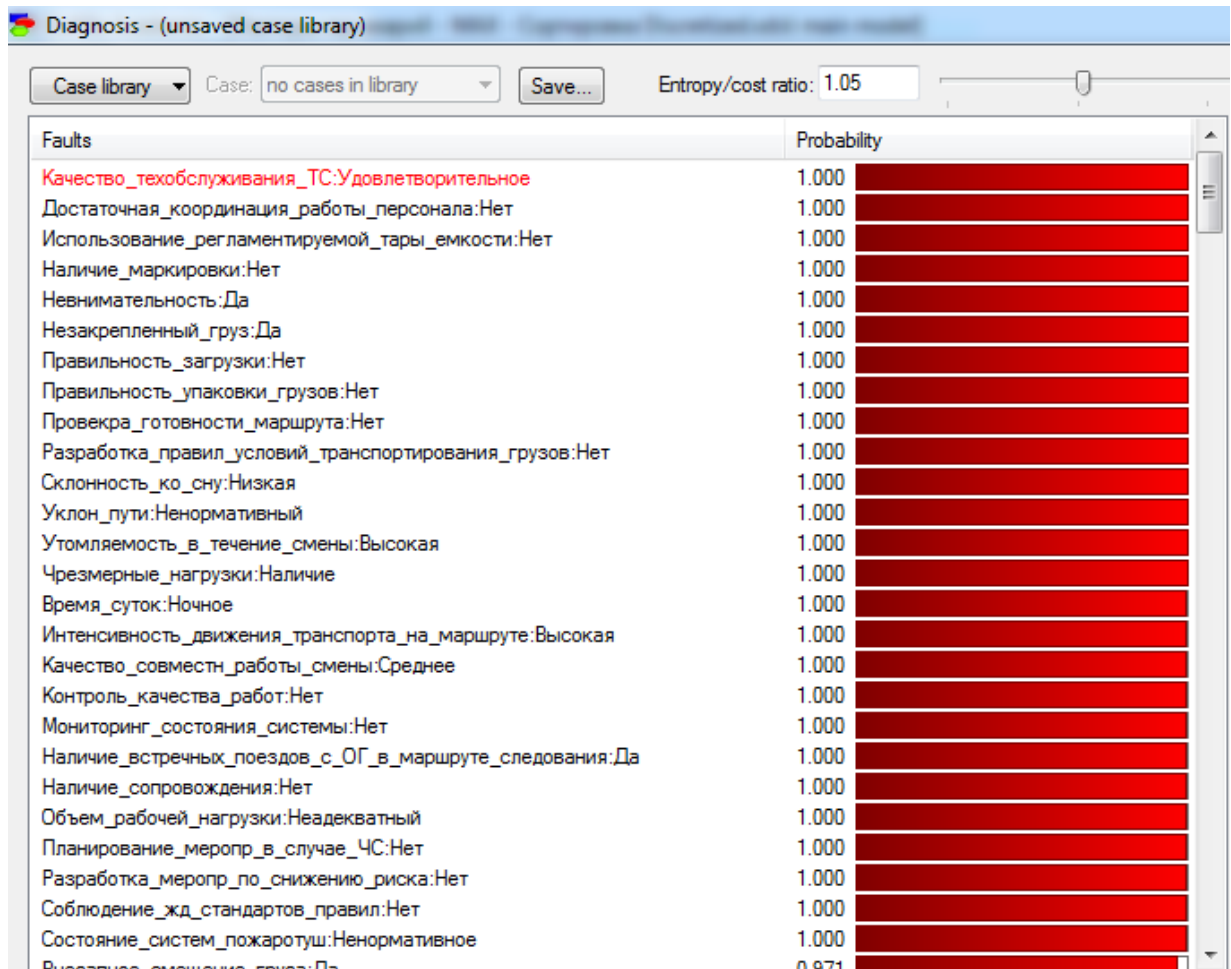




Рисунок 3.22 а, б – Ранжирование неисправностей узла «Авария на Сортировке» в поле 1

Список составлен по мере уменьшения вероятности неисправности (наблюдения) и показывает:

- вклад конкретной неисправности в развитие аварии,
- перечень неисправностей с наибольшим влиянием,
- возможные наблюдаемые состояния.

По рисунку 3.22 видно, что основными причинами (неисправностями) аварии на Сортировке стал целый перечень равновозможных факторов: удовлетворительное качество техобслуживания, неправильная упаковка опасного груза, неадекватный объем рабочей нагрузки и т.д., вероятность реализации которых равна 100 %. В процессе эксплуатации железной дороги руководству следовало бы обратить на выявленные неисправности особое внимание.

При разработке модели было принято решение использовать детерминированный тип для большинства узлов сети из-за:

- отсутствия достоверной статистики о состоянии железнодорожной системы,
- создания более жестких условий расчета вероятности аварии.

В результате все диагностированные причины оказались равнозначными. В списке неисправностей присутствуют узлы с вероятностью меньше 100 %. Это узлы типа «Chance-General». Их вероятность имеет конкретное числовое значение, поэтому они ранжированы таким образом. Подобным образом можно создать целую группу неисправностей и их наблюдения.

Если узлы сети имеют тип «Chance-General», результат диагностирования может быть точнее. На рисунке 3.23 представлен измененный фрагмент модели (все узлы сети типа «Chance-General»), на рисунке 3.24 – окно диагностики для узла «Транспортирование грузов». В 1-м поле окна представлен ранжированный список неисправностей для узла; во 2-м – ранжируемые наблюдения, в 4-м – исследуемое наблюдение «Транспортирование грузов» в состоянии «Повышенный риск».

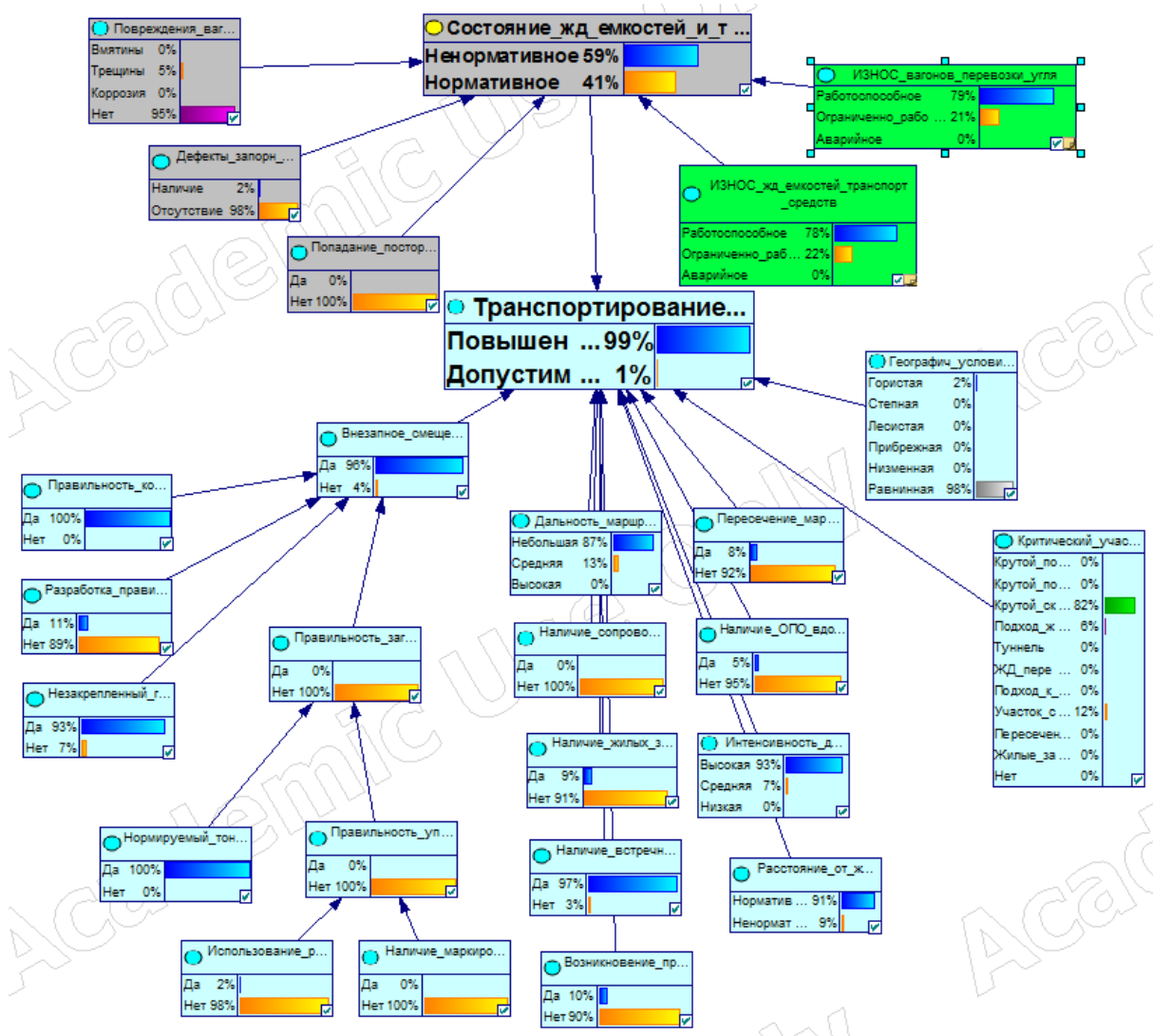


Рисунок 3.23 – Фрагмент сети «Авария на Сортировке»: узлы «Chance-General» категории причин «Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств»

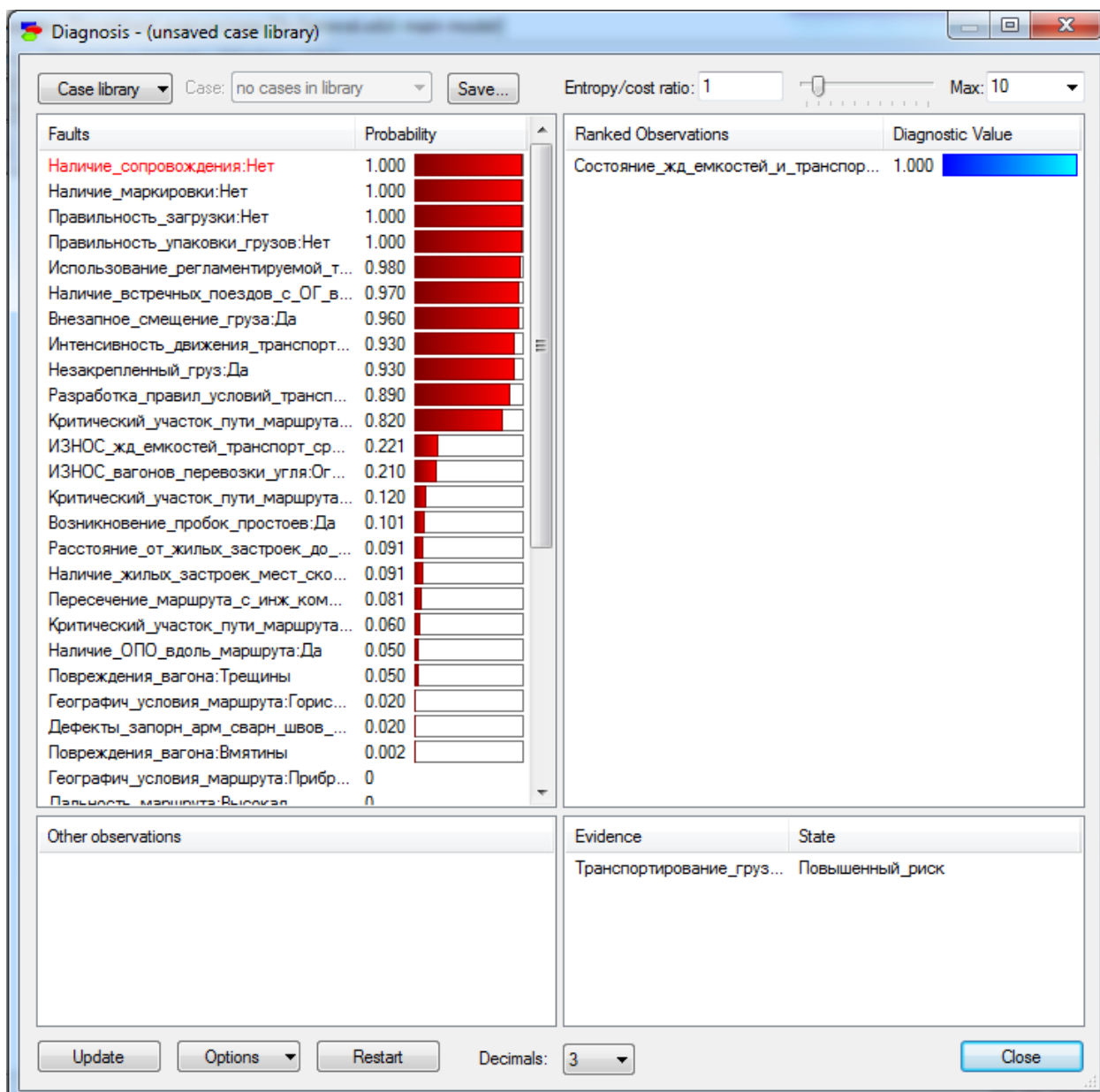


Рисунок 3.24 – Ранжирование неисправностей узла «Транспортирование грузов»

Самыми серьезными причинами развития аварии на станции «Свердловск–Сортировочный» в категории причин «Транспортирование грузов» стали:

- отсутствие маркировки опасного груза (для гексогена и тротила), сопровождающего персонала, неправильная упаковка («Да» = 100 %),
- наличие встречных поездов с опасным грузом в маршруте следования (вагоны с углем) («Да» = 97 %),
- высокая интенсивность движения на участке («Да» = 93 %),
- критический участок пути маршрута («Крутой склон» = 82 % на 3-м пути) и др.

Ранжируемое наблюдение (узел «Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств») имеет диагностическое значение, равное 1. Это означает, что в случае повышенного риска транспортирования грузов, состояние узла ранжируемого наблюдения «Ненормативное» будет полностью реализовано.

3.2.8 Тестирование модели в режиме «Sensitivity Analysis (Анализ чувствительности)»

ПК «GeNe» позволяет узнать, как небольшое изменение дочерних узлов влияет на состояние родительских узлов. Для этого есть 2 способа:

1) отслеживание состояния родительских узлов при изменении вероятности дочерних вручную (т.е. ввод конкретного значения вероятности дочернего узла и расчет остальных узлов),

2) использование режима «Sensitivity Analysis (Анализ чувствительности)» (особенно удобен для больших и сложных сетей Байеса).

Назначение режима:

– изучение влияния вероятности или неопределенности дочерних узлов на входные данные родительских узлов,

– определение родительских узлов, имеющих наибольшее влияние на дочерние узлы.

Данная процедура полезна в экспертной работе. Она позволяет проводить экспресс-оценку текущего состояния системы и определять приоритетные направления в ее управлении. Перед запуском анализа чувствительности указывается 1 узел либо группа целевых узлов.

При оценке чувствительности окрашивание сети происходит в зависимости от чувствительности остальных узлов по отношению к целевому (рисунок 3.25).

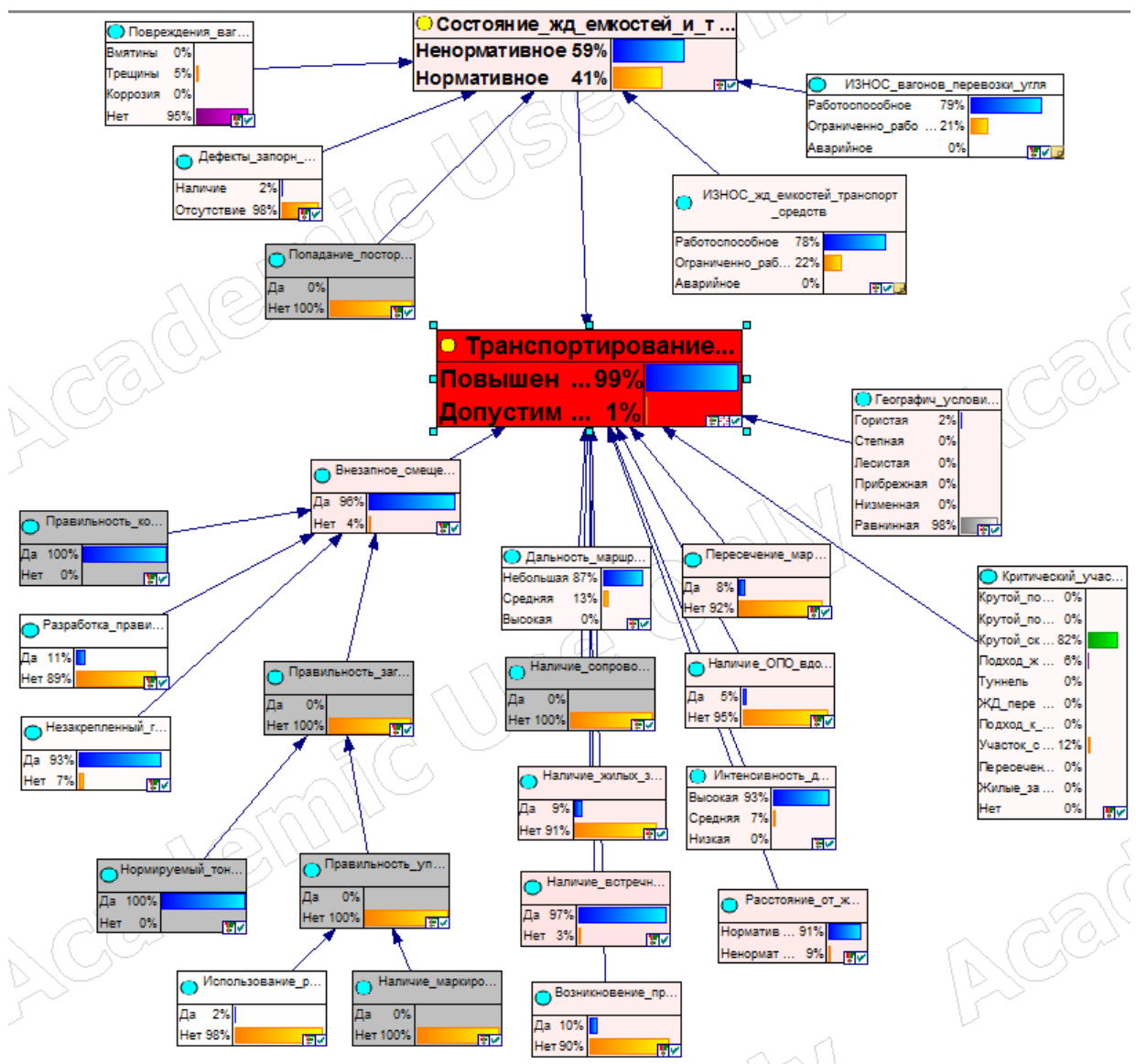


Рисунок 3.25 – Окраска сети в режиме работы «Sensitivity Analysis»

При расчете апостериорных вероятностей целевых узлов узлы красного цвета важны и необходимы, серого цвета – вообще не используются при вычислении. Чем ярче окрашен узел, тем выше его «чувствительность» к целевому узлу.

Окрашивание сети Байеса зависит от выбора конкретного целевого узла. Поэтому при смене или составлении набора целевых узлов цвет сети меняется (рисунок 3.26).

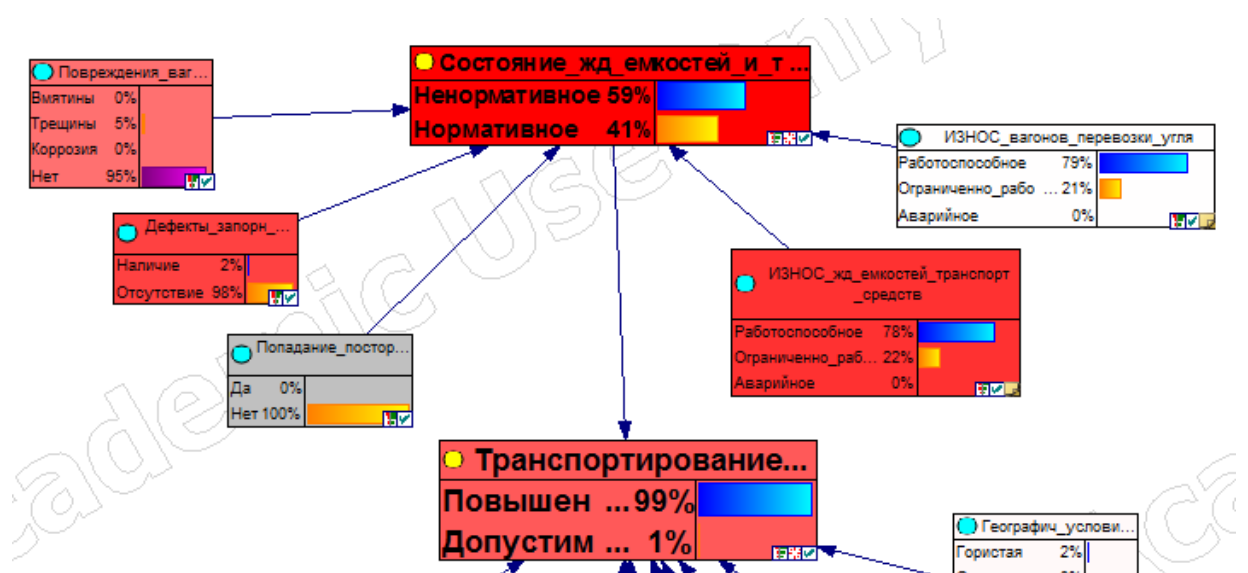


Рисунок 3.26 – Изменение окраски сети со сменой целевого узла

Ячейки условных вероятностных таблиц окрашиваются в соответствующий цвет и показывают, какие значения вероятностей «чувствительных» узлов имеют наибольшее влияние на целевой.

В основе анализа чувствительности лежит использование производной распределения вероятности для целевых узлов. Программа рассчитывает производные апостериорных распределений вероятностей целевых узлов. Далее определяются узлы с максимальными значениями производной, которые и являются величиной чувствительности.

На рисунке 3.27 представлено диалоговое окно «Tornado Diagram (Диаграмма Торнадо)». Диаграмма целевого узла «Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств» содержит список самых чувствительных узлов и их сочетаний по отношению к целевому состоянию «Ненормативное». Список составлен по мере уменьшения «чувствительности» узлов.

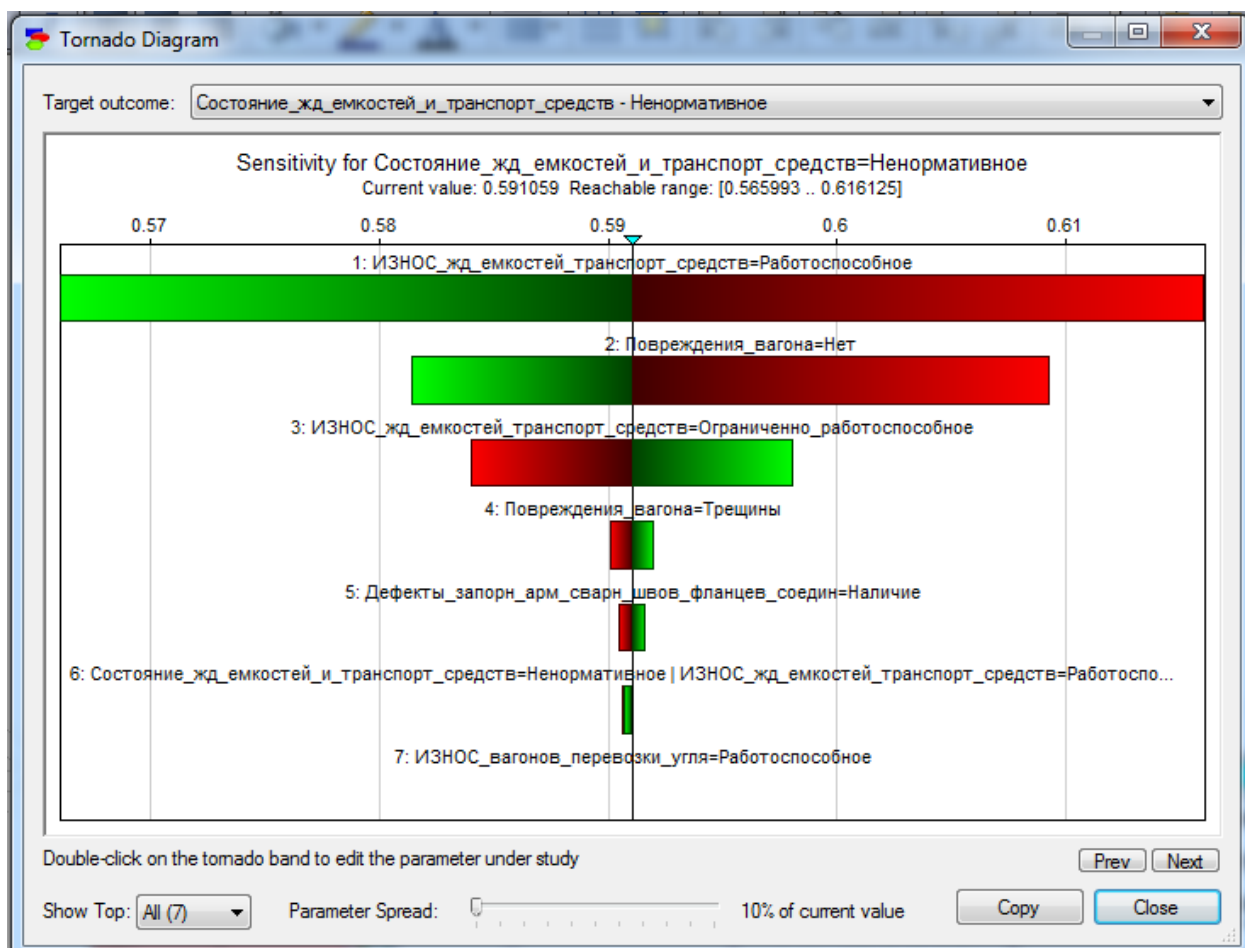


Рисунок 3.27 – Диалоговое окно «Tornado Diagram (Диаграмма Торнадо)»

Возможна настройка диаграммы, а именно:

- выбор количества чувствительных узлов на диаграмме с помощью кнопки «ShowTop (Показать Top)»; в данном случае «All (Все 7)»,
- выбор процента изменения вероятности чувствительных узлов с использованием кнопки «Parameter Spread (Разброс значений параметров)»; по умолчанию показатель разброса имеет значение 10 %.

Цвет элементов диаграммы указывает направление изменения целевого состояния узла «Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств»:

- красный – уменьшает вероятность состояния «Ненормативное» (т.е. узлы «Износ железнодорожных емкостей и транспортных средств» с состоянием «Работоспособное», «Повреждения вагона» – «Нет»),

– зеленый – увеличивает вероятность состояния «Ненормативное» (т.е. узлы «Повреждения вагона» – «Трещины», «Дефекты запорной арматуры, сварных швов и фланцевых соединений» – «Наличие»).

Анализ чувствительности и диагностика – полезные инструменты для определения относительной важности критических показателей модели. Они значительно повышают качество выбора приоритетов управленческой деятельности, предоставляют возможности, которые просто невозможно осуществить классическими методами оценки риска.

В процессе исследования аварии на станции «Свердловск–Сортировочный» диагностирование неисправностей и анализ чувствительности были использованы для выявления основных факторов случившегося. Диагностирование неисправностей модели позволило ранжировать все неисправности по силе влияния на реализацию события. Процедура показала, что критически важный объект (станция «Свердловск–Сортировочный») на момент аварии имел плохие показатели по следующим параметрам: качество обслуживания транспортных средств, недостаточная координация работы персонала, использование регламентируемой тары (емкости), регулирование работ с опасными грузами, проверка готовности маршрута и др. Это важнейшие показатели безопасности процесса транспортирования опасных грузов по железной дороге.

В результате установлено: в случае проявления узлов «Повреждения вагона», «Износ оборудования», «Дефекты соединений (сварные, фланцевые, запорная арматура)» техническое состояние емкостного и транспортного оборудования (целевой узел) ухудшается. Выявленные показатели являются критическими для данной категории факторов. Они с наибольшей вероятностью приводят целевой узел к состоянию «Ненормативное».

Таким образом, при редактировании разработанной байесовской сетевой модели согласно актуальным данным реального объекта решаются задачи, связанные с экспертной оценкой реализованных аварий при железнодорожном транспортировании опасных грузов. В этом случае результаты расчета сети могут использоваться в судебных разбирательствах по несчастным случаям при производстве основных технологических операций на ПОО железнодорожной отрасли.

Расчет вероятности аварии на ж/д станции «Свердловск–Сортировочный» г. Екатеринбург 04.10.1988 г. приведен на рисунке 3.28.

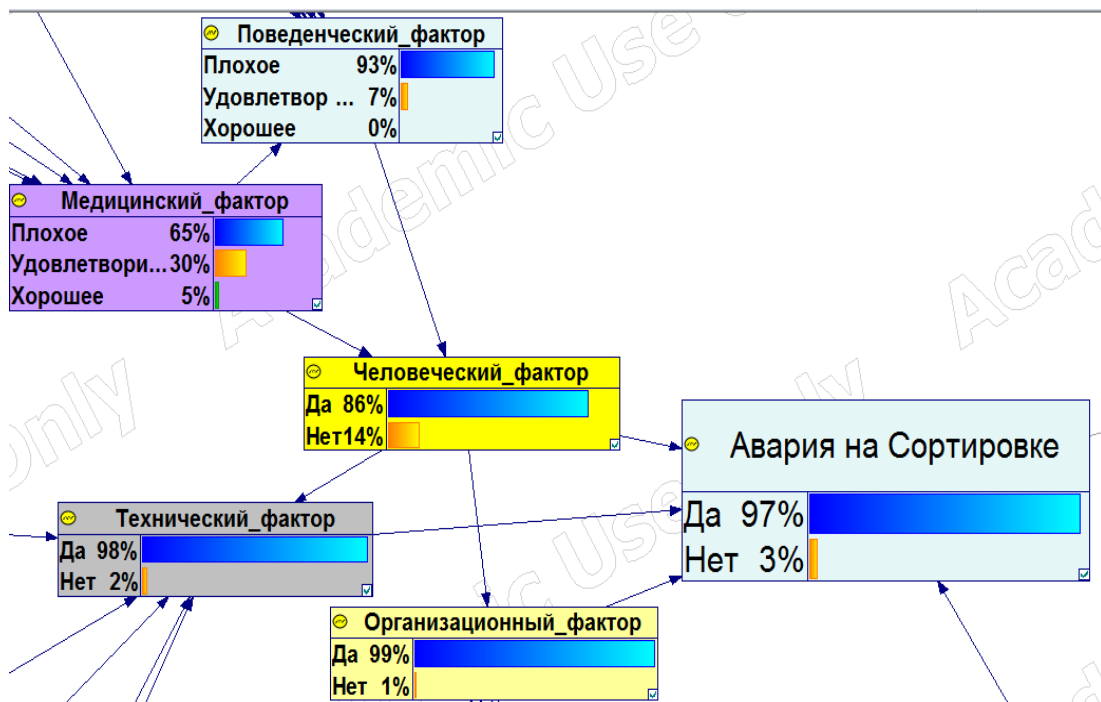


Рисунок 3.28 – Расчет вероятности аварии на ж/д станции «Свердловск–Сортировочный» г. Екатеринбург 04.10.1988 г.

3.2.9 Сравнительный анализ параметров чувствительности и диагностирования разработанной модели

Анализ чувствительности является экспресс-оценкой взаимосвязи элементов модели, позволяющей изучать влияние целевых узлов на состояние остальных. Результатом становится окраска всей сети в оттенки красного цвета. Чем ярче узел, тем сильнее его «чувствительность» относительно целевого узла. На рисунке 3.29 представлен результат процедуры для узла «Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств».

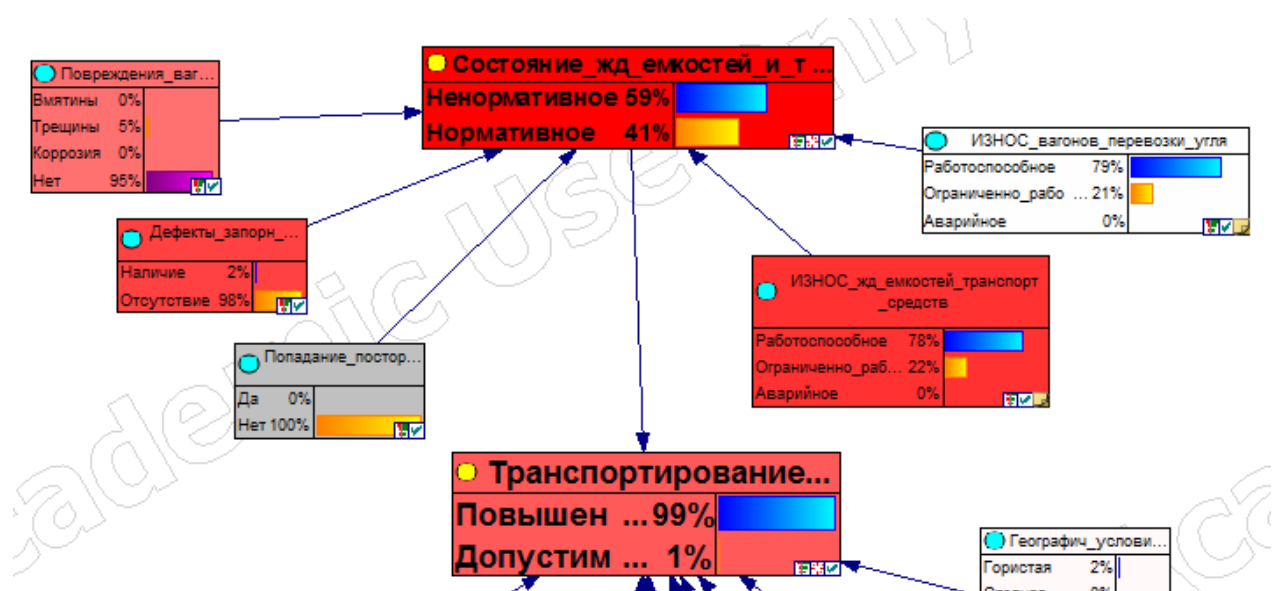


Рисунок 3.29 – Анализ чувствительности для узла «Состояние железнодорожных емкостей и транспортных средств»

Подробности анализа содержатся в диалоговом окне «TornadoDiagram (Диаграмма Торнадо)», содержащей перечень самых «чувствительных» узлов и их сочетаний по отношению к целевому (рисунок 3.30).

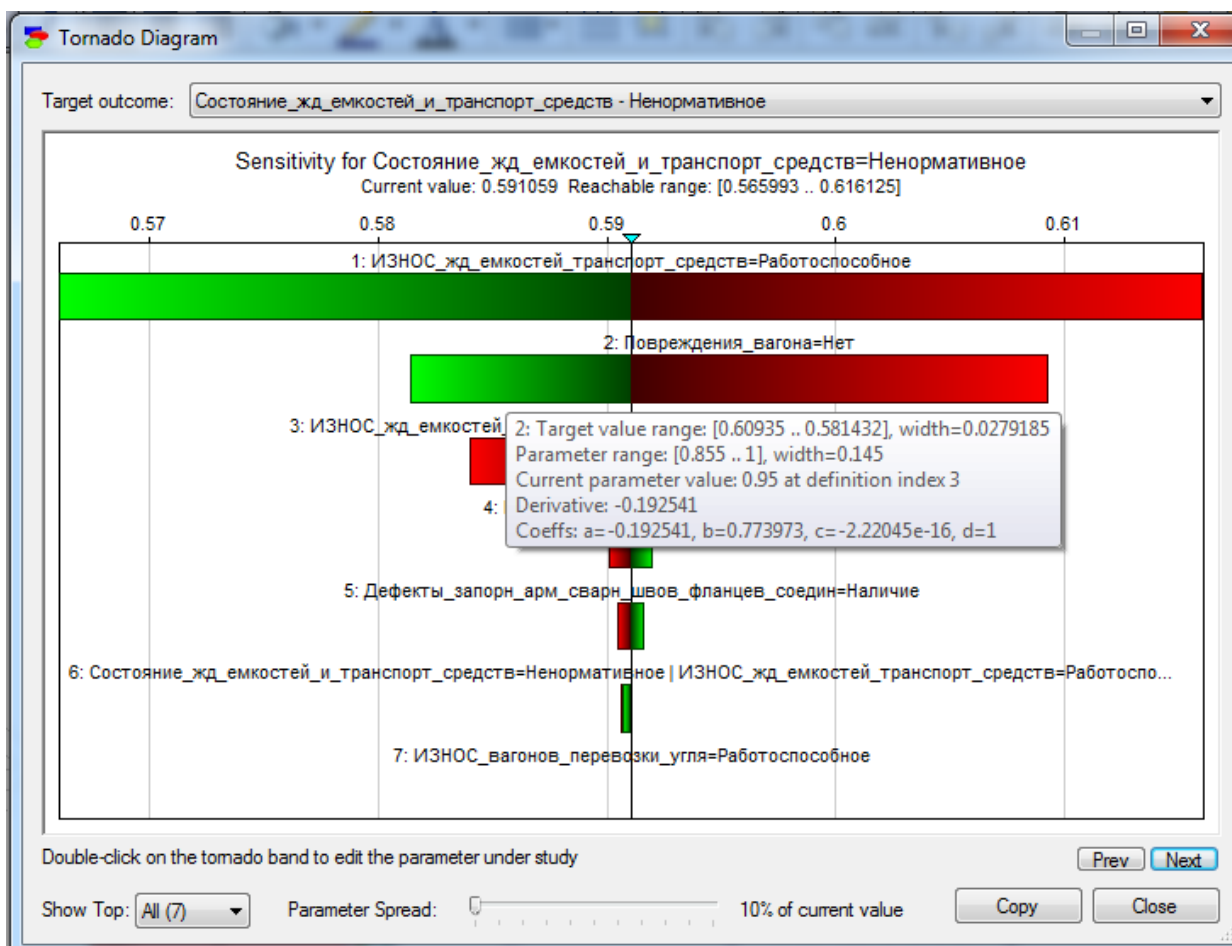


Рисунок 3.30 – Параметры чувствительности узла «Повреждения вагона» в состоянии «Нет»

Режим диагностики более детален, он необходим для ранжирования узлов сети в зависимости от предварительно назначенной диагностической роли: «*Fault (Неисправность)*», «*Observation (Наблюдение)*», «*Auxiliary (Вспомогательный)*». В результате формируются ранжированные списки «неисправностей» и «наблюдений» после выбора узла, необходимого для анализа.

В специальном диалоговом окне формируются ранжированные списки «неисправностей» и «наблюдений» после выбора узла, необходимого для анализа. На рисунке 3.31 представлен результат диагностирования узла «*Транспортирование грузов по железной дороге*».

Видно, что самыми серьезными неисправностями, повлекшими развитие аварии на станции в категории причин «*Транспортирование грузов*», стали:

- отсутствие маркировки опасного груза, сопровождающего персонала, неправильной упаковки («Да» = 100 %),

- наличие встречных поездов с опасным грузом в маршруте следования (состав с углем) («Да» = 97 %),
- высокая интенсивность движения на участке («Да» = 93 %),
- критический участок пути маршрута («Крутой склон» = 82 % на 3-м пути) и др.

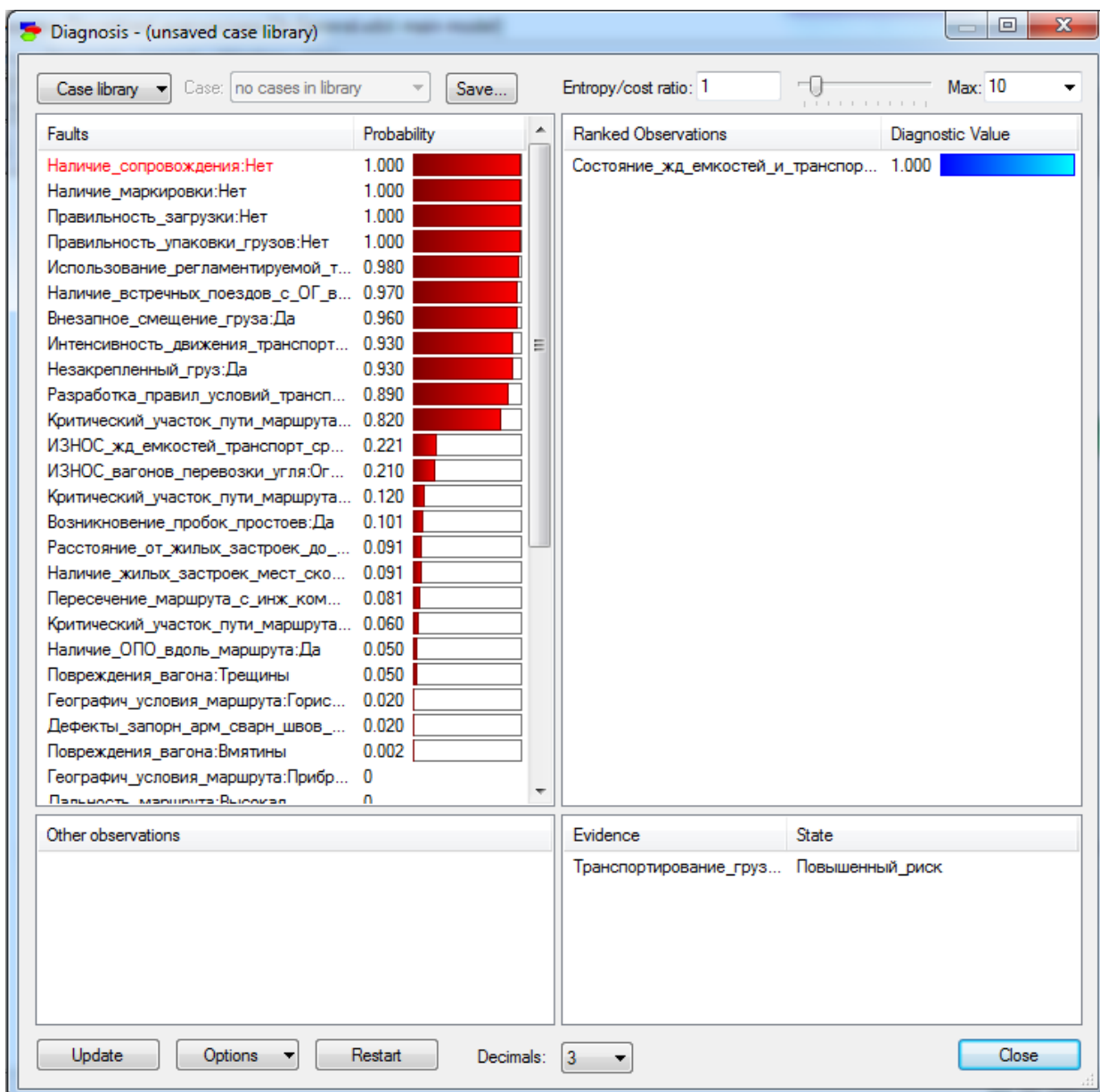


Рисунок 3.31 – Ранжирование неисправностей узла «Транспортирование грузов»

Таким образом, если бы руководство станции имело возможность использовать разработанную модель, аварию удалось бы спрогнозировать и не допустить ее развитие до уровня катастрофы.

3.2.10 Выводы

В данном исследовании подробно изучены причинно-следственные механизмы железнодорожной аварии при транспортировании опасных грузов. На основе материалов публикаций выявлены основные причины аварии и разработана сеть Байеса для расчета риска аварии при перевозке опасных грузов по железной дороге.

На примере реальной железнодорожной катастрофы проведены диагностирование и анализ чувствительности модели, демонстрирующие «гибкость» сетей Байеса при определении главных причин аварии.

Научная новизна работы состоит в исследовании причинно-следственных связей железнодорожной аварии при перевозке опасных грузов с применением сетей Байеса, т.к. сегодня изучение вопросов безопасности железнодорожной отрасли с помощью байесовского подхода практически отсутствует.

Практическая значимость. Результаты работы станут основой не только для оценки риска железнодорожного транспортирования опасных грузов, но и для прогнозирования аварий на железной дороге. Использование разработанной сети на стадии проектирования критически важных объектов железнодорожной отрасли позволит заранее предупредить аварии с участием опасных грузов и определить главные приоритеты управленческой деятельности по уменьшению их последствий.

Для иллюстрации «гибкости» байесовских сетей были проведены диагностирование причин железнодорожной аварии, анализ чувствительности для определения главных приоритетов по смягчению последствий аварии.

Разработанная модель легко настраивается для конкретных аварий на железной дороге, может дать ценную информацию о величине риска реального объекта, модель визуально проста, понятна, что очень важно для сложных инженерных систем. Она позволяет решать два класса задач, связанных с прогнозированием и предупреждением возможных аварий, а также экспертной оценкой уже реализованных аварий при транспортировании опасных грузов по железной дороге.

Сети Байеса создают полную, наглядную картину причин и следствий железнодорожной аварии. Сети можно корректировать, дополняя построенную модель данными отказов реального объекта железнодорожной отрасли.

Анализ результатов в режимах чувствительности и диагностики позволяет определить главные факторы аварии.

Байесовское сетевое моделирование дает возможность решения задач, связанных как с прогнозированием и предупреждением, так и экспертной оценкой реализованных аварий на объектах железнодорожной отрасли.

Сети Байеса создают полную, наглядную картину причин и следствий железнодорожной аварии. Сети можно корректировать, дополняя построенную модель данными отказов реального объекта железнодорожной отрасли.

Исследование планируется продолжить по следующим направлениям:

- 1) создание библиотеки сетевых моделей для разного вида железнодорожного оборудования, которые могут быть адаптированы согласно данным об отказах реальных ПОО железнодорожной отрасли,
- 2) разработка комплексной методологии учета человеческого, организационного, технических факторов, каскадного развития аварий при построении сетевых моделей,
- 3) создание динамических сетей Байеса для учета временного параметра при перевозке опасных грузов по железной дороге,
- 4) моделирование защитных барьеров.

3.3 Оценка риска потенциально опасных объектов топливно-энергетического комплекса с использованием Байесовских сетей

3.3.1 Введение

Топливо-энергетический комплекс – основа жизнеобеспечения любой страны. Необходимо обеспечить эффективную и бесперебойную работу его объектов. Наибольшее распространение на объектах ТЭК получили вертикальные резервуары типа РВС.

Аварии на таких объектах, как правило, сопровождаются эскалацией [26, 27, 28, 29], влиянием человеческого фактора [30, 31], воздействием на территории субъектов Российской Федерации [32, 33, 34].

Объектом настоящего исследования являются ПОО ТЭК, имеющие в своем составе резервуары типа РВС. Предметом исследования – оценка рисков возникновения аварий с использованием Байесовских сетей. Соответственно целью является разработка методики и алгоритма для анализа, оценки и прогнозирования рисков ПОО ТЭК с использованием сетевого моделирования, определения уровня риска ПОО ТЭК.

В исследовании приняла участие магистрант Колмакова Н.В.

3.3.2 Основные причины аварий

Основными причинами разрушения резервуаров являются нарушение:

- 1) качества проекта,
- 2) качества обслуживания и осмотра,
- 3) качества строительства,
- 4) качества подбора оборудования,
- 5) качества оценки рисков,
- 6) качества систем и процедур,
- 7) влияние человеческого фактора,
- 8) возникновение промежуточных (сопутствующих) причин,
- 9) иные первопричины,
- 10) природно-климатические условия регионов с низкими температурами.

Далее подробно рассмотрены каждая из основных причин, приведены характеристики их родительских узлов и значения вероятностей.

Названия узлов в программном комплексе в сети вводятся на английском языке, поэтому при моделировании дается русский текст на латинице.

1) Качество проекта

Это целостная совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные или предполагаемые потребности. При разработке проекта осуществляется отбор тех положений стандартов и нормативов, которые целесообразно и возможно применить к конкретному проекту, а также мероприятий и работ, необходимых для обеспечения требований этих стандартов.

В таблице 3.3.2.1 представлены факторы, влияющие на качество проекта, и значения вероятностей. Так, значение вероятности 100 % говорит о том, что требование выполнено полностью. В свою очередь, вероятность, близкая к 0 %, означает, требование полностью не выполнено.

Таблица 3.3.2.1 – Подробная информация о родительских узлах «Качество проекта»

Конкретная причина	Название узла в сети*	Вероятность	Описание
Соблюдение нормативных стандартов и правил	<i>Sobliudenie normativov</i>	0 %	В таблице 3.3.2.1 представлены родители данного узла.
		100 %	
Осмотр и исследование местности	<i>Osmotr i issledovanie mestnosti</i>	0 %	Топографическая информация, инженерно-геологические, инженерно-геодезические, инженерно-экологические и другие изыскания.
		100 %	
Безопасные расстояния	<i>Bezopasnye rasstoianii</i>	0 %	Соблюдение требований о минимальных расстояний между резервуарами.
		100 %	
Наличие обвалования	<i>Nalichie obvalovaniia</i>	0 %	Наличие обвалования, объем которого позволяет не допускать вытекания опасных веществ за пределы обвалования при аварийной ситуации, или его отсутствие.
		100 %	
Определение объема резервуара	<i>Opredelenie obieema rezervuara</i>	0 %	Наличие сведений о вместимости резервуаров в проектной документации.
		100 %	
Молниезащита	<i>Molniezashchita</i>	0 %	
		100 %	
Проектирование противопожарной защиты и систем противопожарной защиты	<i>Proektirovanie protivopozharnoi zashchity</i>	0 %	
		100 %	
Защита от статического электричества	<i>Zashchita ot staticheskogo elektrichestva</i>	0 %	Необходима для предупреждения возможности возникновения опасных искровых разрядов.
		100 %	
Выбор материала резервуара	<i>Vybor materiala rezervuara</i>	0 %	Материал резервуара зависит от вещества, которое будет в нем находиться.
		100 %	
Отказоустойчивость	<i>Otkazoustoichivost</i>	0 %	Система сохраняет свою работоспособность после отказа одной или нескольких ее составных частей.
		100 %	

* Названия узлов в программном комплексе в сети вводятся на английском языке, поэтому при моделировании дается русский текст на латинице.

Конкретная причина «Соблюдение нормативных стандартов и правил» имеет такие родительские узлы (таблица 3.3.2.2) На основе представленных таблиц 3.3.2.1 и 3.3.2.2 построена ветвь модели для основной причины «Качество проекта», представленная на рисунке 3.3.2.1.

Таблица 3.3.2.2 – Подробная информация о родительских узлах «Соблюдение нормативных стандартов и правил»

Конкретная причина	Название узла в сети	Вероятность	Описание
Требования международных стандартов	<i>Trebovaniia mezhdunarodnykh standartov</i>	0 %	Стандарты, разработанные международной организацией по стандартизации (ИСО) и Международной электротехнической комиссией (МЭК) и выполняющие функцию нормативных документов
		100 %	
Требования национальных стандартов	<i>Trebovaniia natsionalnykh standartov</i>	0 %	Стандарт, принятый национальным органом по стандартизации любого государства и доступный широкому кругу пользователей
		100 %	
Требования стандартов организации	<i>Trebovaniia standartov organizatsii</i>	0 %	Документ по стандартизации, утвержденный и применяемый конкретной организацией
		100 %	
Требования технических регламентов	<i>Trebovaniia tekhnicheskikh reglamentov</i>	0 %	Свод норм и правил в системе технического регулирования, определяющий основные критерии безопасности и методы контроля выпускаемой в обращение продукции или оборудования
		100 %	

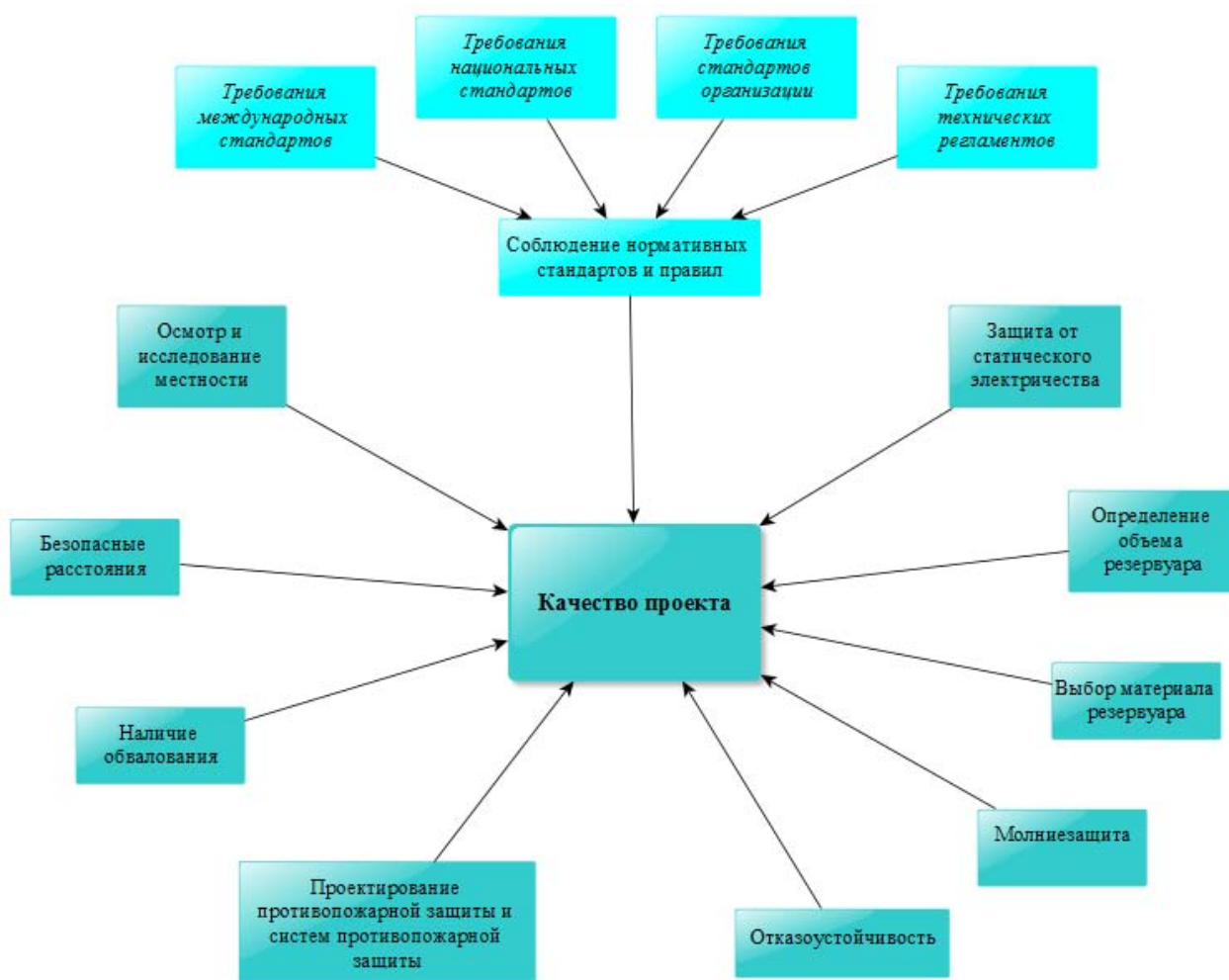


Рисунок 3.3.2.1 – Группа факторов «Качество проекта»

2) *Качество обслуживания и осмотра*

Целью качественного обслуживания является безусловное обеспечение надлежащего технического состояния всех элементов системы.

В таблице 3.3.2.3 представлены факторы, влияющие на качество обслуживания и осмотра, и значения вероятностей каждого фактора. Так, значение вероятности 100 % говорит о том, что требование выполнено полностью. В свою очередь, вероятность, близкая к 0 %, означает, требование полностью не выполнено.

Таблица 3.3.2.3 – Подробная информация о родительских узлах «Качество обслуживания и осмотра»

Конкретная причина	Название узла в сети	Вероятность	Описание
Регулярный осмотр	<i>Reguliarnyi osmotr</i>	0 %	Планируемый профилактический осмотр.
		100 %	
Проверочные испытания	<i>Proverochnye ispytaniia</i>	0 %	Регулярное тестирование компонентов и систем, включая систему защиты от переполнения.
		100 %	
Профилактическое обслуживание	<i>Profilakticheskoe obsluzhivanie</i>	0 %	Плановое профилактическое обслуживание.
		100 %	
Защитное оборудование	<i>Zashchitnoe oborudovanie</i>	0 %	Использование средств защиты при техническом обслуживании.
		100 %	
Взрывозащитное оборудование	<i>Vzryvozashchitnoe oborudovanie</i>	0 %	Использование взрывозащищенного оборудования.
		100 %	
Разрешение на огневые работы	<i>Razreshenie na ognevye raboty</i>	0 %	Наличие системы разрешений на проведение огневых работ на территории резервуарного парка в соответствии с действующими стандартами.
		100 %	
Обучение персонала	<i>Obuchenie personala</i>	0 %	Обеспечение подготовки персонала.
		100 %	
Проверка выполненных работ	<i>Proverka vypolnennykh robot</i>	0 %	Система проверки выполнения работ в соответствии с установленными процедурами на конкретном предприятии.
		100 %	

На основе таблицы 3.3.2.3 построена ветвь модели для основной причины «Качество обслуживания и осмотра», представленная на рисунке 3.3.2.2.



Рисунок 3.3.2.2 – Группа факторов «Качество обслуживания и осмотра»

3) *Качество строительства*

Под качеством строительства понимается соответствие качества построенных объектов проектным решениям и нормативам. Качество формируется на всех стадиях строительства: предпроизводственной (проектирование), производственной (строительно-монтажные процессы) и после производственной (эксплуатация). В таблице 3.3.2.4 представлены факторы, влияющие на качество строительства, и значения вероятностей каждого фактора. Так, значение вероятности 100 % говорит о том, что требование выполнено полностью. В свою очередь, вероятность, близкая к 0 %, означает, требование полностью не выполнено.

На основе таблицы 3.3.2.4 построена ветвь модели для основной причины «Качество строительства», представленная на рисунке 3.3.2.3.

Таблица 3.3.2.4 – Подробная информация о родительских узлах «Качество строительства»

Конкретная причина	Название узла в сети	Состояние	Описание
Качество подрядчиков	<i>Kachestvo podriadchikov</i>	0 %	Качество квалификации подрядчика для выполнения строительно-монтажных работ.
		100 %	
Авторский надзор	<i>Avtorskii nadzor</i>	0 %	Компетентность авторского надзора.
		100 %	
Процедуры сертификации	<i>Protsedury sertifikatsii</i>	0 %	Наличие сертификации проектной и промышленной продукции, а также сертификации работ, услуг и систем качества.
		100 %	
Разрешение на ввод в эксплуатацию	<i>Razreshenie na vvod v ekspluatatsiiu</i>	0 %	Документ, удостоверяющий выполнение строительства в полном объеме.
		100 %	
Дефекты материала, изготовление и монтажа	<i>Defekty materiala, izgotovlenie i montazha</i>	0,000032	

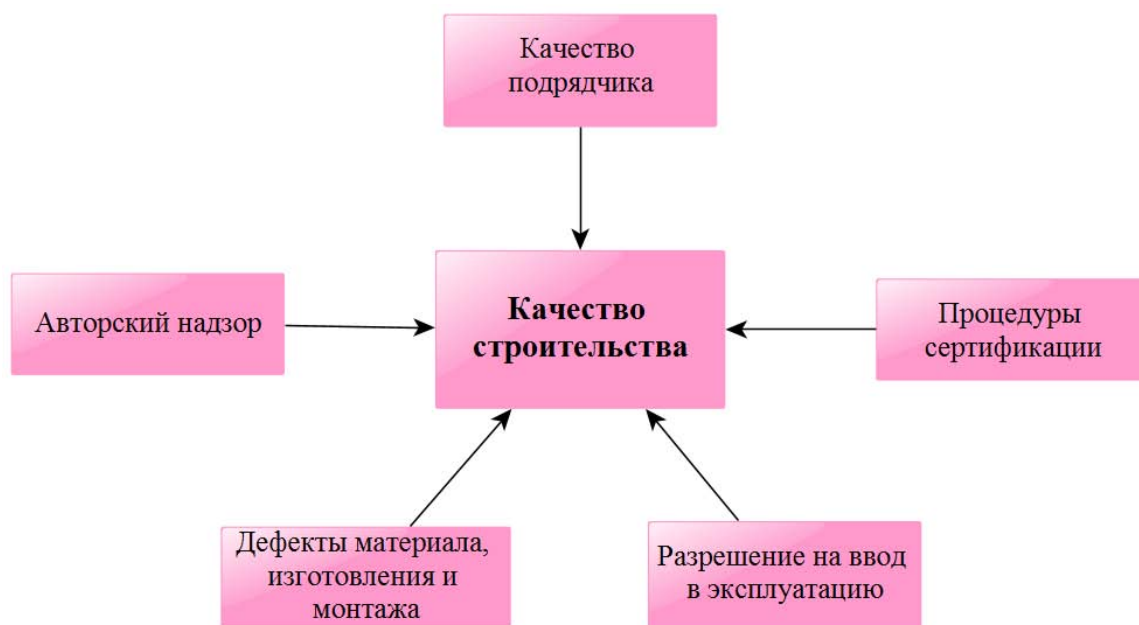


Рисунок 3.3.2.3 – Группа факторов «Качество строительства»

4) Качество подбора оборудования

Подбор оборудования, в том числе технологического – это важный этап процесса разработки объекта. Правильная комплектация нефтегазового объекта технологическим и другим оборудованием способствует эффективной и бесперебойной работе.

В таблице 3.3.2.5 представлены факторы, влияющие на качество подбора оборудования, и значения вероятностей каждого фактора. Так, значение вероятности 100 % говорит о том, что требование выполнено полностью. В свою очередь, вероятность, близкая к 0 %, означает, требование полностью не выполнено.

Таблица 3.3.2.5 – Подробная информация о родительских узлах «Качество подбора оборудования»

Конкретная причина	Название узла в сети	Состояние	Описание
1	2	3	4
Молниезащита	<i>Molniezashchita</i>	0 %	Устройства молниезащиты резервуаров проектируются в соответствии с нормативно-технической документацией.
		100 %	
Дыхательное оборудование	<i>Dykhatelnoe oborudovanie</i>	0 %	Для РВС необходимо предусматривать установку дыхательных клапанов и патрубков, обеспечивающих проектные значения избыточного давления и вакуума при наполнении и опорожнении резервуара, а также при изменении температуры газовой среды в резервуаре.
		100 %	
Аварийное вентилирование	<i>Avariinoe ventilirovanie</i>	0 %	Предусматривается д в виде аварийных клапанов для сброса внутреннего избыточного давления при взрыве или пожаре.
		100 %	

Продолжение таблицы 3.3.2.5

1	2	3	4
Система инертирования (азотная защита)	<i>Sistema inertirovaniia</i>	0 %	Предусматривается для защиты от образования и взрыва взрывопожароопасной паровоздушной смеси в газовом пространстве резервуара.
		100 %	
Электроустановки	<i>Elektroustanovki</i>	0 %	Проектируются для взрывоопасных и пожароопасных зон в соответствии с ГОСТ Р 52350.10.
		100 %	
Заземление резервуара	<i>Zazemlenie rezervuara</i>	0 %	Необходимо для предотвращения опасного накопления статического электричества.
		100 %	
Оборудование для тушения пожара в резервуаре	<i>Oborudovanie dlia tusheniia pozhara v rezervuare</i>	0 %	Системы пожаротушения должны предусматривать установку стационарных пеногенераторов и пенокамер, подачу пены средней и низкой кратности на или под слой продукта, комбинацию технологий тушения в зависимости от хранимого продукта, типа и объема резервуара, категории склада нефти и нефтепродуктов и других характеристик конкретного объекта.
		100 %	
Оборудование для водяного охлаждения при пожаре	<i>Oborudovanie dlia vodianogo okhlazhdeniia pri pozhare</i>	0 %	Необходимость использования передвижной пожарной техники или стационарного и полустационарного оборудования для охлаждения резервуара при пожаре должна быть обоснована оценкой пожаровзрывоопасности резервуара, включая предварительное планирование тушения возможного пожара.
		100 %	

Продолжение таблицы 3.3.2.5

1	2	3	4
Окраска резервуаров и резервуарного оборудования	<i>Okraska rezervuarov i rezervuarnogo oborudovaniia</i>	0 %	Резервуары, дыхательные и предохранительные клапаны, стационарные пеногенераторы и пенокамеры должны иметь солнцезащитную окраску, обеспечивающую замедление прогрева резервуара от лучистого теплового воздействия соседнего очага пожара.
		100 %	
Приборы контроля уровня	<i>Pribory kontroliia urovnia</i>	0 %	Обеспечивают оперативный контроль уровня продукта. Максимальный уровень продукта должен контролироваться сигнализаторами уровня (минимум два), передающими сигнал на отключение насосного оборудования.
		100 %	

На основе таблицы 3.3.2.5 построена ветвь модели для основной причины «Качество подбора оборудования», представленная на рисунке 3.3.2.4.



Рисунок 3.3.2.4 – Группа факторов «Качество подбора оборудования»

5) *Качество оценки рисков*

Оценка рисков – в общем случае это процесс определения вероятности возникновения факторов риска. Поэтому основное назначение анализа риска состоит в том, чтобы обеспечить участников проекта информацией, необходимой для принятия соответствующих решений, и предусмотреть меры по защите от возможных потерь.

В таблице 3.3.2.6 представлены факторы, влияющие на качество оценки рисков, и значения вероятностей каждого фактора. Так, значение вероятности 100 % говорит о том, что требование выполнено полностью. В свою очередь, вероятность, близкая к 0 %, означает, требование полностью не выполнено.

Таблица 3.3.2.6 – Подробная информация о родительских узлах «Качество оценки рисков»

Конкретная причина	Название узла в сети	Состояние	Описание
Идентификация опасности	<i>Identifikatsiia opasnosti</i>	0 %	Выявление и четкое описание всех источников опасностей и сценариев их реализации.
		100 %	
Оценка рисков	<i>Otsenka riskov</i>	0 %	Определение частот возникновения инициирующих и всех нежелательных событий, оценка последствий возникновения этих событий, а также обобщение оценок риска.
		100 %	
Разработка рекомендаций по уменьшению риска	<i>Razrabotka rekomendatsii po umensheniiu riska</i>	0 %	Обоснованные меры по уменьшению риска, основанные на результатах оценок риска.
		100 %	

На основе таблицы 3.3.2.6 построена ветвь модели для основной причины «Качество оценки рисков», представленная на рисунке 3.3.2.5.

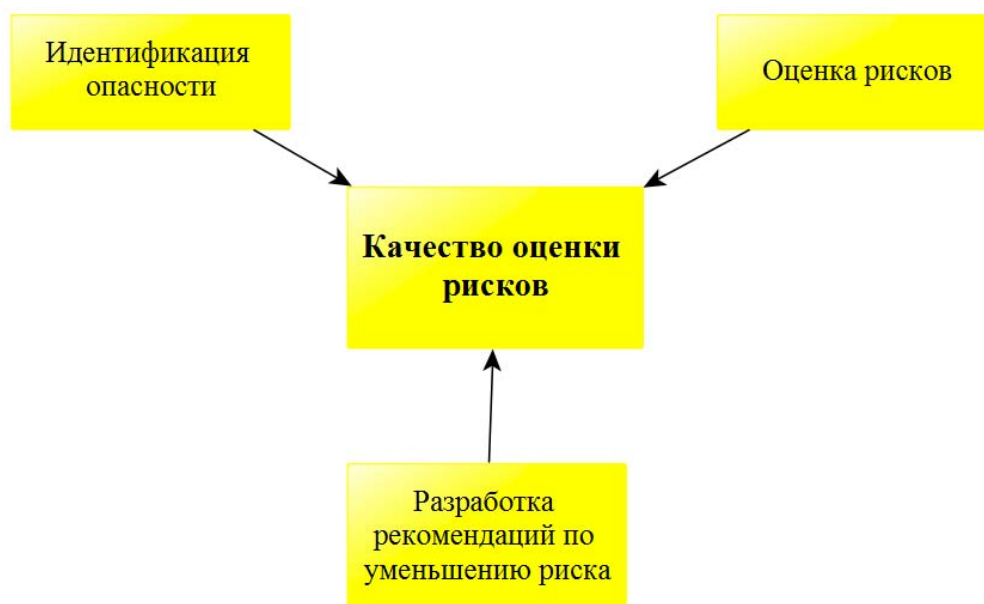


Рисунок 3.3.2.5 – Группа факторов «Качество оценки рисков»

6) *Качество систем и процедур*

Наличие качественных системы и качественное выполнение процедур обеспечивает безопасную эксплуатацию резервуарных парков и увеличивает их срок службы.

В таблице 3.3.2.7 представлены факторы, влияющие на качество систем и процедур, и значения вероятностей каждого фактора. Так, значение вероятности 100 % говорит о том, что требование выполнено полностью. В свою очередь, вероятность, близкая к 0 %, означает, требование полностью не выполнено.

Таблица 3.3.2.7 – Подробная информация о родительских узлах «Качество систем и процедур»

Конкретная причина	Название узла в сети	Состояние	Описание
1	2	3	4
Регулярные периодические осмотры корпусов, крыш и днищ резервуаров	<i>Reguliarnye periodicheskie osmotry</i>	0 %	Задачей постоянных осмотров является своевременное выявление всех неисправностей. При осмотрах особое внимание уделяется сварным вертикальным швам нижних поясов, швам, расположенным на сопряжении нижнего пояса с днищем.
		100 %	
Регулярные осмотры оборудования	<i>Reguliarnye osmotry oborudovaniia</i>	0 %	Для регистрации осмотров ведется специальный журнал по установленной форме
		100 %	
Алгоритм действий работников при основных производственных, ремонтных и аварийных ситуациях	<i>Algoritm deistvii rabotnikov</i>	0 %	Эти инструкции разработаны для того, чтобы на предприятии соблюдались все требования безопасности и охраны труда для каждой категории работников, которые будут заняты при эксплуатации или при ремонте резервуаров.
		100 %	
Технологические схемы трубопроводов	<i>Tekhnologicheskie skhemy truboprovodov</i>	0 %	На все трубопроводы обязательно составляются технологические схемы. При производстве каких-либо изменений, они обязательно должны заноситься в такую схему.
		100 %	
Периодическая зачистка резервуаров	<i>Periodicheskaia zachistka rezervuarov</i>	0 %	Периодичность установлена нормативными документами. Она зависит от типа жидкости.
		100 %	
Процедуры заполнения резервуара	<i>Protседury zapolneniia rezervuara</i>	0 %	Должно производиться под уровень жидкости снизу. Если же резервуар оказался порожним, операция заполнения осуществляется медленно. Скорость должна строго соответствовать способности дыхательного клапана.
		100 %	

Продолжение таблицы 3.3.2.7

1	2	3	4
Процедуры опорожнения резервуара	<i>Protsedury oporozhneniia rezervuara</i>	0 %	Скорость опорожнения должна строго соответствовать способности дыхательного клапана.
		100 %	
Учения по реагированию на чрезвычайные ситуации	<i>Ucheniia po reagirovaniu na ChS</i>	0 %	Периодические учения и проверки аварийного реагирования.
		100 %	
Очистка территории резервуарного парка	<i>Ochistka territorii rezervuarnogo parka</i>	0 %	Территория резервуарного парка и площадки внутри обвалования должны периодически очищаться от земли, пропитанной нефтепродуктами, мусора, посторонних предметов, они должны собираться в предназначенные для этих целей ящики с крышками. В летнее время трава должна быть скошена и вывезена в сыром виде.
		100 %	
Система автоматики и учета нефти и нефтепродуктов	<i>Sistema avtomatiki i ucheta</i>	0 %	Предназначена для обеспечения стабильного и безопасного функционирования оборудования резервуарных парков, а так же реализации функции товарного учета продукта.
		100 %	

На основе таблицы 3.3.2.7 построена ветвь модели для основной причины «Качество систем и процедур», представленная на рисунке 3.3.2.6.

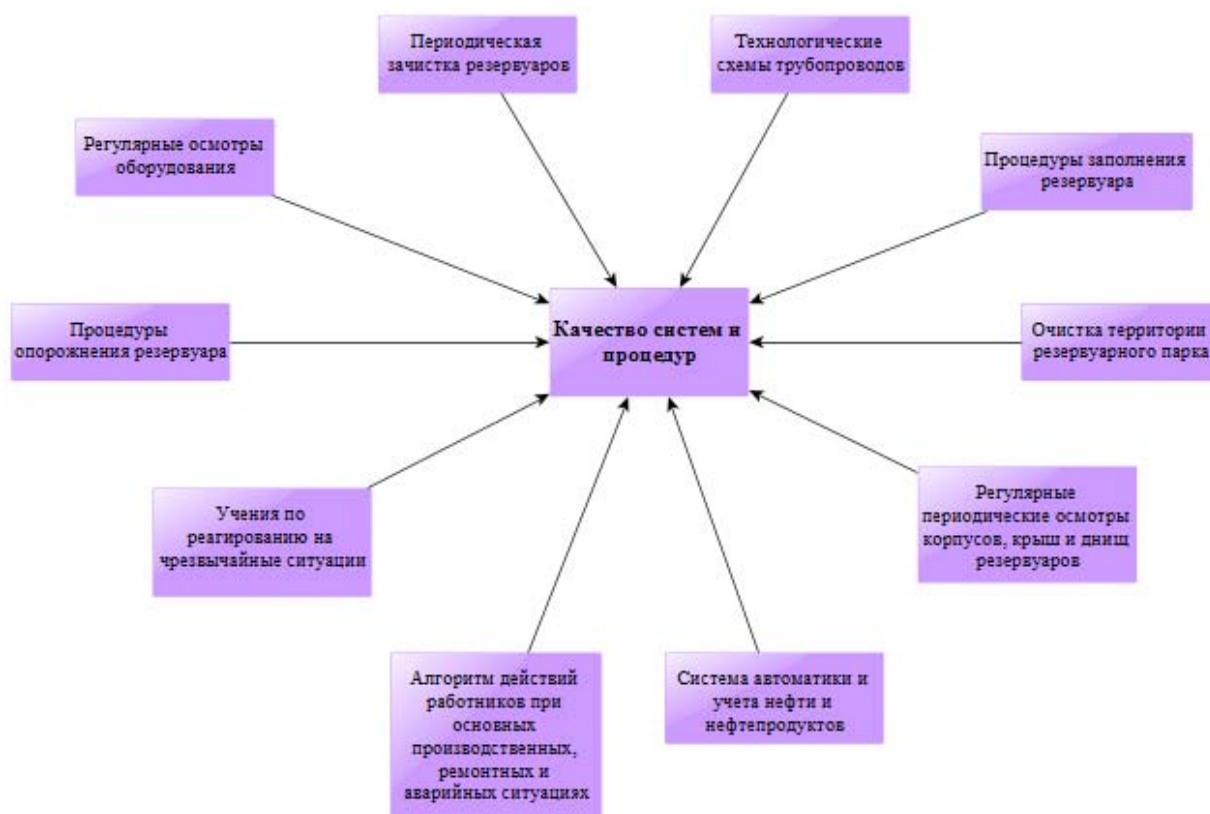


Рисунок 3.3.2.6 – Группа факторов «Качество систем и процедур»

7) Человеческий фактор

Характеристики, возникающие при взаимодействии человека и технических систем, часто называют «человеческий фактор». Ошибки, называемые проявлением человеческого фактора, как правило, непреднамеренны: человек выполняет ошибочные действия, расценивая их как верные или наиболее подходящие. Для моделирования общей причины «Качество человеческого и организационного фактора» рассмотрены существующие классификации.

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») [23]. Классификация представляет собой деление ЧФ на следующие три группы причин, способных вызвать ошибки в системе «человек–машина–среда».

Группа факторов «Человек» 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 представляет технологические генотипы, связанные с процедурами, отказами оборудования и систем, а также недостатки, связанные с выходными данными (сигналами и информацией), предоставляемыми интерфейсами.

Третья группа 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.

Для заполнения таблиц вероятностей узлов использованы статистические данные Raphael N. Mouga на основе 238 инцидентов [23].

В таблицах 3.3.2.8, 3.3.2.9 представлены значения причин, необходимые для дальнейшего моделирования в программе «GeNIe».

На основе таблицы 3.3.2.8 построена ветвь модели для основной причины «Человеческий фактор», представленная на рисунке 3.3.2.7.

Таблица 3.3.2.8 – Основные причины человеческого фактора

Группа причин	Название узла в сети	Количество несчастных случаев	%
Человек	<i>Chelovek</i>	136	57,14
Технология	<i>Tekhnologiia</i>	196	82,35
Организация	<i>Organizatsiia</i>	227	95,38



Рисунок 3.3.2.7 – Группа причин «Человеческого фактора»

Таблица 3.3.2.9 – Конкретные причины группы «Человек»

Подгруппа / Название в сети	Конкретная причина / Название в сети	Количество несчастных случаев	%
1	2	3	4
Действие / <i>Deistvie</i> (130 случаев / 95,59 %)	Неверное время / <i>Nevernoe vremia</i>	35	26,92
	Неверный ввод / <i>Nevernyi vvod</i>	28	21,54
	Неверный объект / <i>Nevernyi obiekt</i>	6	4,62
	Неверное место / <i>Nevernoe mesto</i>	75	57,69

Продолжение таблицы 3.3.2.9

1	2	3	4	
<p>Специфические когнитивные функции / <i>Spetsificheskie kognitivnye funktsii</i> (113 случаев / 83,09 %)</p>	<p>Наблюдение / <i>Nabliudenie</i> (47 случаев / 41,59 %)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Наблюдение не выполнено / <i>Nabliudenie ne vupolneno</i> - Неверное наблюдение / <i>Nevernoe nabliudenie</i> - Неверная идентификация / <i>Nevernaia identifikatsiia</i> 	<p>37</p> <p>8</p> <p>6</p>	<p>78,72</p> <p>17,02</p> <p>12,77</p>	
	<p>Интерпретация / <i>Interpretatsiia</i> (79 случаев / 69,91 %)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ошибочный диагноз / <i>Oshibochnyi diagnost</i> - Неверные рассуждения / <i>Nevernyie rassuzhdeniia</i> - Ошибка в решении / <i>Oshibka v reshenii</i> - Замедленная интерпретация / <i>Zamedlennaia interpretatsiia</i> - Неверный прогноз / <i>Nevernyi prognoz</i> 	<p>31</p> <p>27</p> <p>22</p> <p>11</p> <p>9</p>	<p>39,24</p> <p>34,18</p> <p>27,85</p> <p>13,92</p> <p>11,39</p>	
	<p>Планирование / <i>Planirovanie</i> (38 случаев / 33,63 %)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Неадекватный план / <i>Neadekvatnyi plan</i> - Ошибка приоритета / <i>Oshibka prioriteta</i> 	<p>23</p> <p>17</p>	<p>60,53</p> <p>44,74</p>	
	<p>Временные особенности человека / <i>Vremennye osobennosti cheloveka</i> (31 случай / 22,79 %)</p>	<p>Плохая память / <i>Plokhhaia pamiat</i></p>	<p>2</p>	<p>6,45</p>
		<p>Страх / <i>Strakh</i></p>	<p>5</p>	<p>16,13</p>
		<p>Рассеянность / <i>Rasseiannost</i></p>	<p>14</p>	<p>45,16</p>
		<p>Усталость / <i>Ustalost</i></p>	<p>7</p>	<p>22,58</p>
		<p>Изменчивость производительности / <i>Izmenchivost proizvoditelnosti</i></p>	<p>3</p>	<p>9,58</p>
		<p>Невнимательность / <i>Nevnimatelnost</i></p>	<p>5</p>	<p>16,13</p>
		<p>Физиологический стресс / <i>Fiziologicheskii stress</i></p>	<p>2</p>	<p>6,45</p>

Продолжение таблицы 3.3.2.9

1	2	3	4
Постоянные особенности человека / <i>Postoiannye osobennosti cheloveka</i> (18 случаев / 13,24 %)	Функциональные нарушения / <i>Funktsionalnye narusheniia</i>	1	5,56
	Когнитивный стиль / <i>Kognitivnyi stil</i>	0	0
	Когнитивное искажение / <i>Kognitivnoe iskazhenie</i>	17	94,45

На основе таблицы 3.3.2.9 построена ветвь модели для группы факторов «Человек», представленная на рисунке 3.3.2.8.

На основе таблицы 3.3.2.10 построена ветвь модели для группы факторов «Технология», представленная на рисунке 3.3.2.9.

Таблица 3.3.2.10 – Конкретные причины группы «Технология»

Подгруппа / <i>Название в сети</i>	Конкретная причина / <i>Название в сети</i>	Количество несчастных случаев	%
Оборудование / <i>Oborudovanie</i> (134 случая / 68,37 %)	Отказ оборудования / <i>Otkaz oborudovaniia</i>	131	97,76
	Сбой ПО / <i>Sboi PO</i>	6	4,48
Процедуры / <i>Protsedury</i> (105 случаев / 53,57 %)	Неадекватные процедуры / <i>Neadekvatnye protsedury</i>	105	53,57
Временный интерфейс / <i>Vremennyi interfeis</i> (45 случаев / 22,96 %)	Ограничения доступа / <i>Ogranicheniia dostupa</i>	3	6,67
	Неоднозначная информация / <i>Neodnoznachnaia informatsiia</i>	6	13,33
	Неполная информация / <i>Nepolnaia informatsiia</i>	42	93,33
Постоянный интерфейс / <i>Postoiannyi interfeis</i> (8 случаев / 4,08 %)	Проблемы с доступом / <i>Problemy s dostupom</i>	4	0,5
	Неверная маркировка / <i>Nevernaia markirovka</i>	4	0,5

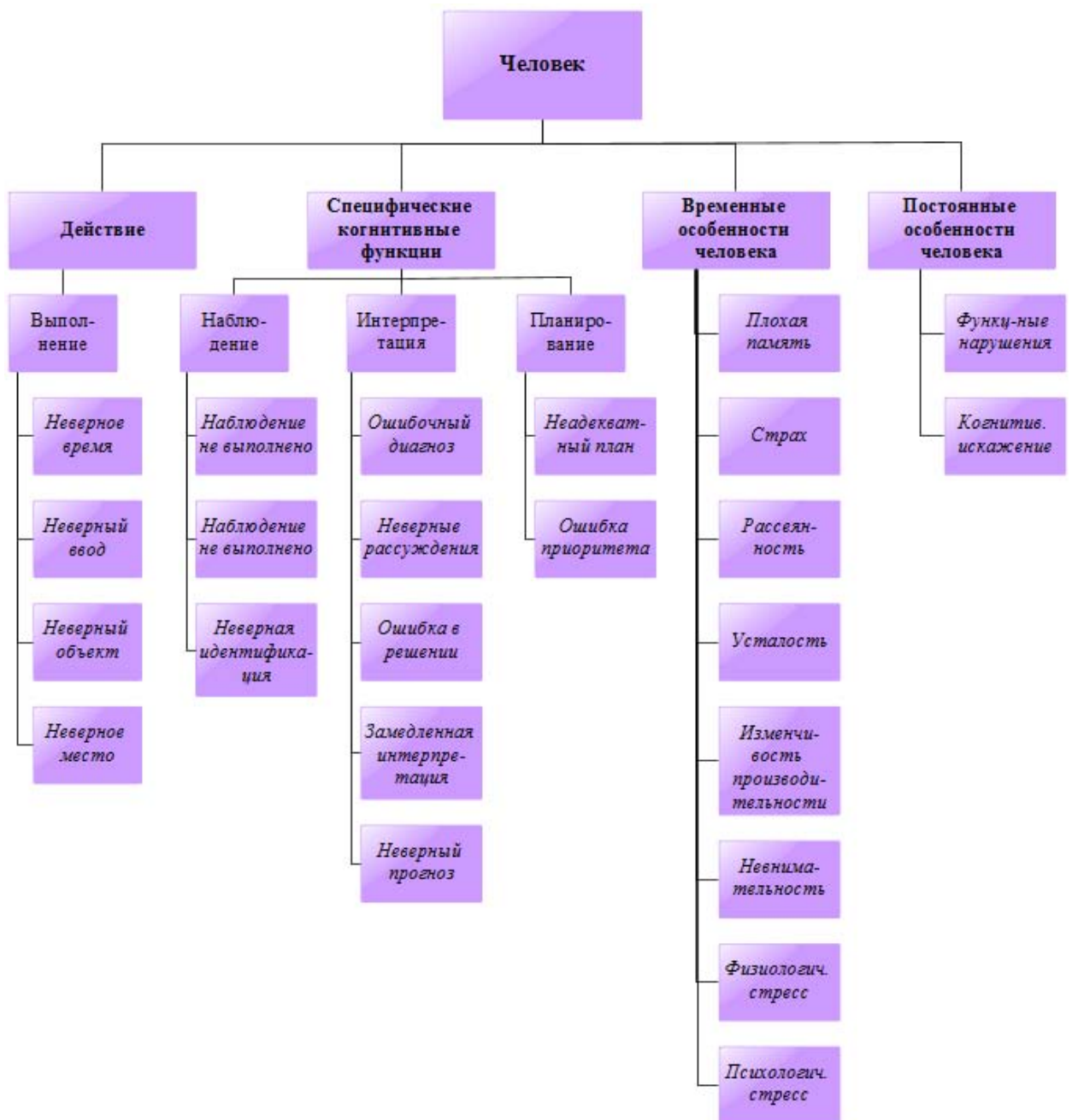


Рисунок 3.3.2.8 – Группа факторов «Человек»



Рисунок 3.3.2.9 – Группа факторов «Технология»

Таблица 3.3.2.11 – Конкретные причины группы «Организация»

Подгруппа / Название в сети	Конкретная причина / Название в сети	Количество несчастных случаев	%
1	2	3	4
Коммуникация / <i>Kommunikatsiia</i> (69 случаев / 30,4 %)	Потеря коммуникации / <i>Poteria komunikatsii</i>	25	36,23
	Потеря части информации / <i>Poteria chasti informatsii</i>	49	71,01
Организация / <i>Organizatsiia</i> (224 случаев / 98,68 %)	Некачественное обслуживание / <i>Nekachestvennoe obsluzhivanie</i>	83	37,05
	Неадекватный контроль качества / <i>Neadekvatnyi kontrol kachestva</i>	144	64,29
	Проблемы управления / <i>Problemy upravleniia</i>	22	9,82

Продолжение таблицы 3.3.2.11

1	2	3	4
	Отказ конструкции / <i>Otkaz konstruksii</i>	157	70,09
	Неадекватное распределение задач / <i>Neadekvatnoe raspredelenie zadach</i>	143	63,84
	Общественное давление / <i>Obshchestvennoe davlenie</i>	17	7,59
Обучение / <i>Obuchenie</i> (129 случаев / 56,83 %)	Недостаточные навыки / <i>Nedostatochnye navyki</i>	86	66,67
	Недостаточные знания / <i>Nedostatochnye znaniiia</i>	84	65,12
Условия окр. среды / <i>Usloviia okr. sredy</i> (21 случай / 9,25 %)	Звуки / <i>Zvuki</i>	0	0
	Влажность / <i>Vlazhnost</i>	0	0
	Неблагоприятные условия окр. среды / <i>Neblagopriiatnye usloviia</i>	17	80,95
	Освещение / <i>Osveshchenie</i>	2	9,52
	Температура / <i>Temperatura</i>	3	14,29
	Другое / <i>Drugoe</i>	0	0
Условия труда / <i>Usloviia truda</i> (27 случаев / 11,89 %)	Чрезмерные требования / <i>Chrezmernye trebovaniia</i>	13	48,15
	Неадекватная планировка раб.места / <i>Neadekvatnaia planirovka rab.mesta</i>	6	22,22
	Недостаточная поддержка команды / <i>Nedostatochnaia podderzhka komandy</i>	8	29,63
	Нерегулярное время работы / <i>Nereguliarnoie vremia raboty</i>	9	33,33

На основе таблицы 3.3.2.11 построена ветвь модели для группы факторов «Организация».

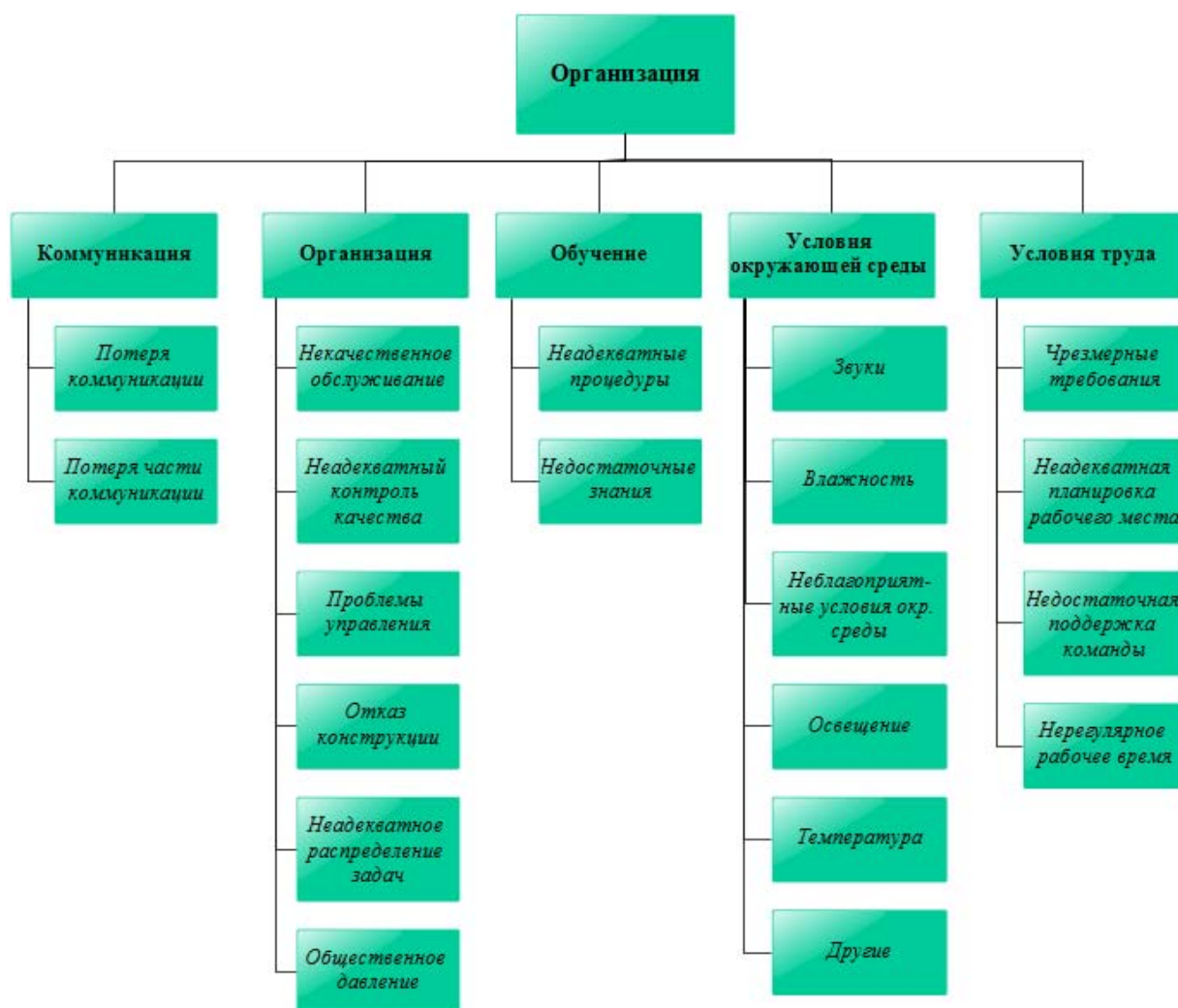


Рисунок 3.3.2.10 – Группа факторов «Организация»

8) Промежуточные причины

Каждый из ключевых факторов дополнительно влияет на последующие промежуточные причины, которые являются непосредственными причинами отказа. Определенные ключевые факторы влияют более чем на один промежуточный фактор.

Влияние ключевых факторов на промежуточные причины продемонстрировано в таблице 3.3.2.12.

Таблица 3.3.2.12 – Промежуточные причины

Ключевой фактор	Промежуточная причина	Название узла в сети
Качество проекта	Накопление статического заряда	<i>Nakoplenie staticheskogo zariada</i>
	Неисправность молниезащиты	<i>Neispravnost molniezashchity</i>
	Пиковое давление	<i>Pikovoe davlenie</i>
	Вибрация или циклическая нагрузка	<i>Vibratsiia ili tsiklicheskaia nagruzka</i>
Качество строительства	Разрушение сварного шва	<i>Razrushenie svarnogo shva</i>
	Разрушение внутренней стенки резервуара	<i>Razrushenie vnutrennei stenki rezervuara</i>
	Неисправность приемно – раздаточного патрубка	<i>Neispravnost priemno – razdatochnogo patrubka</i>
Качество обслуживания и осмотра Качество оборудования	Утечка из клапана	<i>Utechka iz klapana</i>
	Неисправность приемно – раздаточного патрубка	<i>Neispravnost priemno – razdatochnogo patrubka</i>
	Коррозия	<i>Korroziia</i>
	Неисправность системы контроля уровня жидкости	<i>Neispravnost sistemy kontroliia zhidkosti</i>
	Накопление статического заряда	<i>Nakoplenie staticheskogo zariada</i>
Качество оценки рисков	Неисправность приемно – раздаточного патрубка	<i>Neispravnost priemno – razdatochnogo patrubka</i>
	Чрезмерное перемещение жидкости	<i>Chrezmernoie peremeshchenie zhidkosti</i>
Качество систем и процедур	Неправильная работа клапана	<i>Nepravilnaia rabota klapana</i>
	Неправильная работа систем обслуживания резервуара	<i>Nepravilnaia rabota sistem obsluzhivaniia rezervuara</i>
	Утечка из клапана	<i>Utechka iz klapana</i>
	Неисправность системы контроля уровня жидкости	<i>Neispravnost sistemy kontroliia urovnia zhidkosti</i>

9) *Другие первопричины*

Кроме основных причин, влияющих на разрушение резервуара, существует перечень причин, оказывающих прямое воздействие на разрушение резервуара.

Согласно анализу статистических данных, выполненному Н.А. Кузнецовым в своей работе «Анализ отказов и аварий стальных резервуарных конструкций» вероятность реализации основных видов разрушения выглядят следующим образом:

- Коррозионное разрушение – $2,4 \times 10^{-4}$;
- Усталостные трещины – 6×10^{-5} .

Остальные вероятности реализации событий приняты по унифицированным деревьям отказов. В таблице 3.3.2.13 представлены другие первопричины разрушения резервуара в условиях нормальной эксплуатации.

Таблица 3.3.2.13 – Другие первопричины

Причина	Название узла в сети	Вероятность реализации данного события
Удар молнии	<i>Udar molnii</i>	0,000095
Отказ резервуара	<i>Otkaz rezervuara</i>	0,0001
Коррозионное разрушение	<i>Korrozionnoe razrushenie</i>	0,00024
Усталостные трещины	<i>Ustalostnye treshchiny</i>	0,00006
Наличие коррозионной среды	<i>Nalichie korrozionnoi sredy</i>	0,92
Нарушение правил эксплуатации	<i>Narushenie pravil ekspluatatsii</i>	0,0010
Выход из строя стенки резервуара	<i>Vykhod iz stroia stenki rezervuara</i>	0,00001
Пожар на дыхательной арматуре	<i>Pozhar na dykhatelnoi armature</i>	0,00009
Пожар по всей поверхности резервуара	<i>Pozhar po vsei poverkhnosti rezervuara</i>	0,00009
Землетрясение	<i>Zemletriasenie</i>	0,037
Ураган	<i>Uragan</i>	0,0476
Оползень	<i>Opolzen</i>	0,005
Карстовый провал	<i>Karstovyi proval</i>	0,51
Сель	<i>Sel</i>	0,0095

10) Природно-климатические условия Севера

Одной из основных причин аварии являются природно-климатические условия Севера. Определяющими внешними факторами являются низкие температуры атмосферного воздуха и аномальные неблагоприятные метеорологические условия, характеризующиеся мощными продолжительными инверсиями в сочетании со штилем. Эти внешние параметры окружающей среды оказывают влияние как на частоту аварий, так и на дальность зоны действия поражающих факторов при аварии [24]. Согласно диссертации Захаровой М.И. на тему «Анализ и оценка риска аварий резервуаров и газопроводов при низких температурах», разрушение резервуара может случиться по таким основным причинам, как хрупкое разрушение и взрыв при низких температурах [25]. В таблице 3.3.2.14 представлены основные причины хрупкого разрушения резервуаров при низких температурах.

Таблица 3.3.2.14 – Конкретные причины группы «Хрупкое разрушение»

Причина	Название узла в сети	Вероятность реализации данного события
Сталь низкого качества	<i>Stal nizkogo kachestva</i>	0,06
Трещины	<i>Treshchiny</i>	0,31
Неравномерная осадка основания резервуара	<i>Neravnomernaiia osadka osnovaniia rezervuara</i>	0,19
Низкие температуры атмосферного воздуха	<i>Nizkie temperatury atmosfernogo vozdukha</i>	0,31
Внешние воздействия (взрывные работы в карьере)	<i>Vneshnie vozdeistviia (vzryvnye raboty v karere)</i>	0,06
Старение	<i>Starenie</i>	0,06

В таблице 3.3.2.15 представлены основные причины аварий со взрывом резервуара при минусовых температурах окружающей среды.

Таблица 3.3.2.15 – Конкретные причины группы «Взрыв при минусовых температурах»

Причина	Название узла в сети	Вероятность реализации данного события
Резервуар с нефтепродуктом попал в очаг пожара	<i>Rezervuar s nefteproduktom popal v ochag pozhara</i>	0,18
Воздействие статического электричества на резервуар с нефтепродуктом	<i>Vozdeistvie staticheskogo elektrichestva</i>	0,09
Нарушение правил технической и пожарной безопасности	<i>Narushenie pravil tekhnicheskoi i pozharnoi bezopasnosti</i>	0,45
Диверсия	<i>Diversiia</i>	0,09
Воздействие резкого колебания температуры атмосферного воздуха	<i>Vozdeistvie rezkogo kolebaniia temperatury atmosfernogo vozdukh</i>	0,09

На основе таблиц 3.3.2.14 и 3.3.2.15 построена ветвь модели для основной причины «Природно-климатические условия Севера», представленная на рисунке 3.3.2.11.



Рисунок 3.3.2.11 – Группа факторов «Природно-климатические условия Севера»

3.3.3 Моделирование сети Байеса для прогнозирования риска в резервуарном парке ТЭК

Моделирование включает следующие этапы.

1) Подготовка узлов в соответствии с данными п. 3.3.2:

- качество проекта,
- качество обслуживания и осмотра,
- качество строительства,
- качество подбора оборудования,
- качество оценки рисков,
- качество систем и процедур,
- человеческий фактор,
- промежуточные причины,
- другие первопричины,
- природно-климатические условия Севера (если ПОО расположены в регионе с низкими температурами).

2) Моделирование причинно-следственных связей для данных узлов

В программном комплексе моделируются ветви узлов и формируются причинно-следственные связи.

Рассмотрим подробно на примере узла «Качество проекта» моделирование причинно-следственных связей.

Для остальных узлов моделирование осуществляется аналогично и в приложении А представлены рисунки структурных построений ветвей от каждого родительского узла и блок-схемы построения ветвей:

рисунок А.1 – Составляющие дерева байесовской сетевой модели,

рисунок А.2 – Структурное построение ветви «Качество проекта»,

рисунок А.3 – Блок-схема построения ветви «Качество проекта»,

рисунок А.4 – Структурное построение ветви «Природно-климатические условия»,

рисунок А.5 – Блок-схема построения ветви «Природно-климатические условия»,

рисунок А.6 – Структурное построение «Качество обслуживания и осмотра»,

рисунок А.7 – Блок-схема построения ветви «Качество обслуживания и осмотра»,

рисунок А.8 – Структурное построение ветви «Качество строительства»,

рисунок А.9 – Блок-схема построения ветви «Качество строительства»,

рисунок А.10 – Структурное построение ветви «Качество подбора оборудования»,

рисунок А.11 – Блок-схема построения ветви «Качество подбора оборудования»,
рисунок А.12 – Структурное построение ветви «Качество оценки рисков»,
рисунок А.13 – Блок-схема построения ветви «Качество оценки рисков»,
рисунок А.14 – Структурное построение ветви «Качество систем и процедур»,
рисунок А.15 – Блок-схема построения ветви «Качество систем и процедур»,
рисунок А.16 – Структурное построение ветви «Человеческий фактор» (крупным планом),
рисунок А.17 – Блок-схема построения ветви «Человеческий фактор» (крупным планом),
рисунок А.18 – Структурное построение ветви «Человеческий фактор»,
рисунок А.19 – Блок-схема построения ветви «Человеческий фактор»,
рисунок А.20 – Структурное построение ветви «Человек»,
рисунок А.21 – Блок-схема построения ветви «Человек»,
рисунок А.22 – Структурное построение ветви «Технология»,
рисунок А.23 – Блок-схема построения ветви «Технология»,
рисунок А.24 – Структурное построение ветви «Организация»,
рисунок А.25 – Блок-схема построения ветви «Организация».

3.3.4 Алгоритм сетевого моделирования основных причин разрушения резервуара

1) Моделирование узла «Качество проекта»

Для моделирования ветви основной причины «Kachestvo proekta» («Качество проекта») создается узел «Kachestvo proekta» («Качество проекта») и 10 родительских узлов.

Кроме этого, для «Sobliudenie normativov» («Соблюдение нормативов») создается 4 родительских узла: «Требования международных стандартов», «Требования национальных стандартов», «Требования стандартов организации» и «Требования технических регламентов» (рисунок 3.3.4.1).

С помощью инструмента «Ark» к узлу «Kachestvo proekta» от остальных узлов строятся дуги, показывающие причинно-следственные связи (рисунок 3.3.4.2). Аналогичным образом строятся дуги к узлу «Sobliudenie normativov» от его родительских узлов, перечисленных выше.

Учитывая, что копирование рисунка из программы нечеткое, представим его в виде рисунка 3.3.4.3 (без интерфейса программы). Рисунок 3.3.4.3 соответствует рисунку А.2 в приложении А.

Затем для каждого из родительских узлов в программе заполняется таблица вероятностей. Таблицы узлов состоят из двух строк или двух возможных ситуаций:

– строка «у» («ДА») – вероятность того, что требование по качеству полностью выполнено;

– строка «п» («НЕТ») – вероятность того, что требование полностью не выполнено.

Составляем исходные таблицы вероятностей родительского узла «Kachestvo proekta».

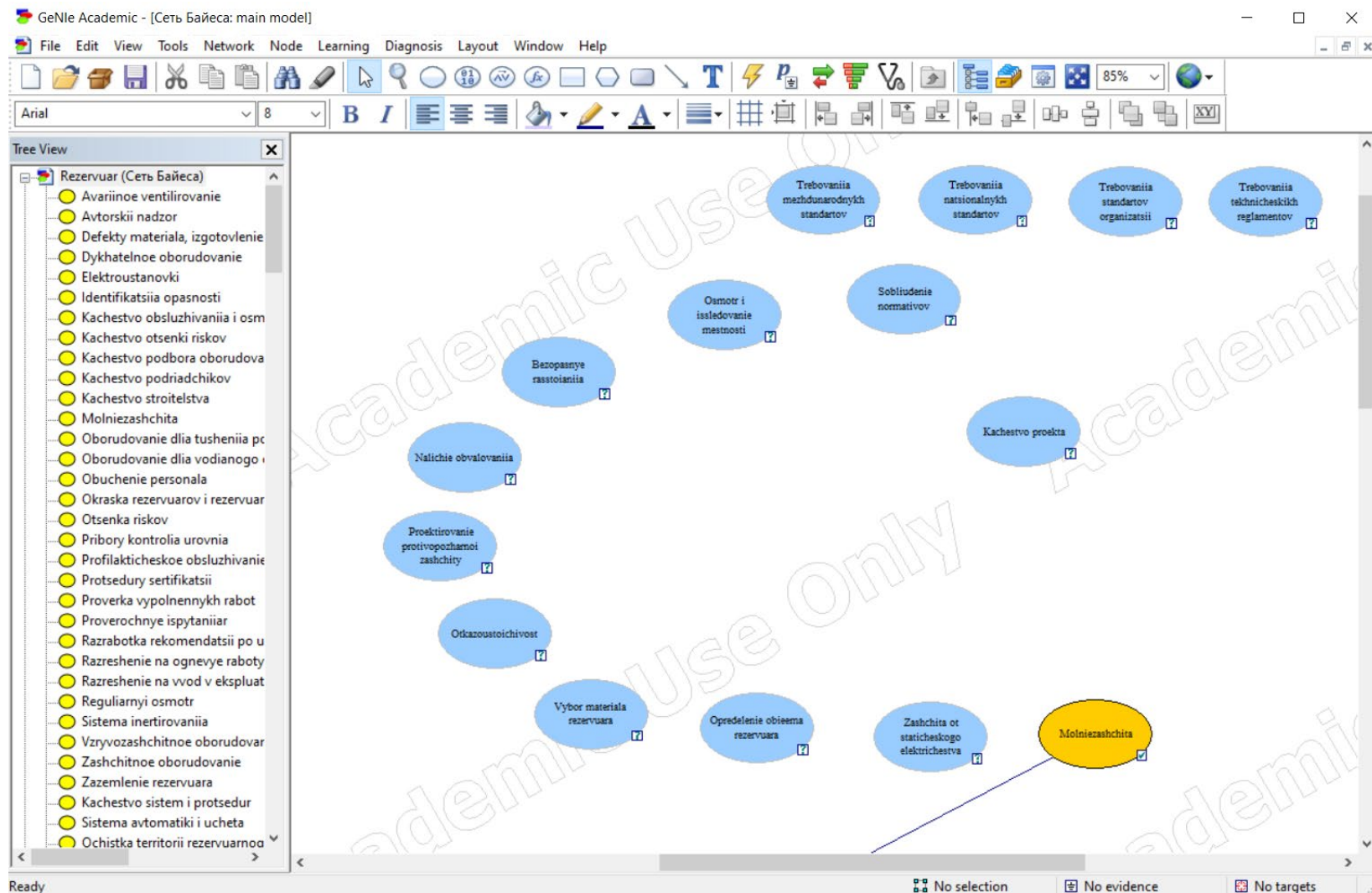


Рисунок 3.3.4.1 – Создание узла ветви «Kachestvo proekta»

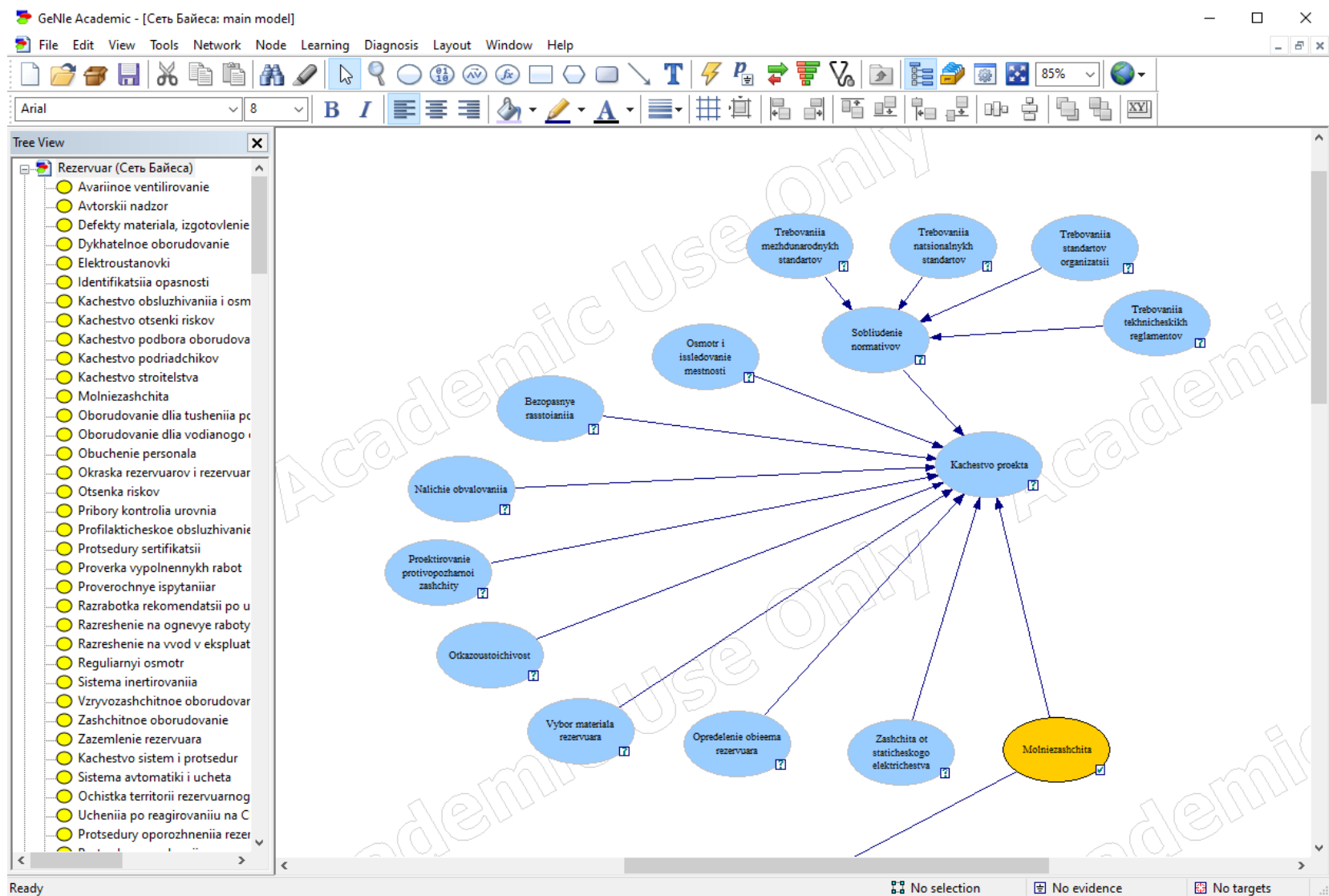


Рисунок 3.3.4.2 – Создание причинно-следственных связей

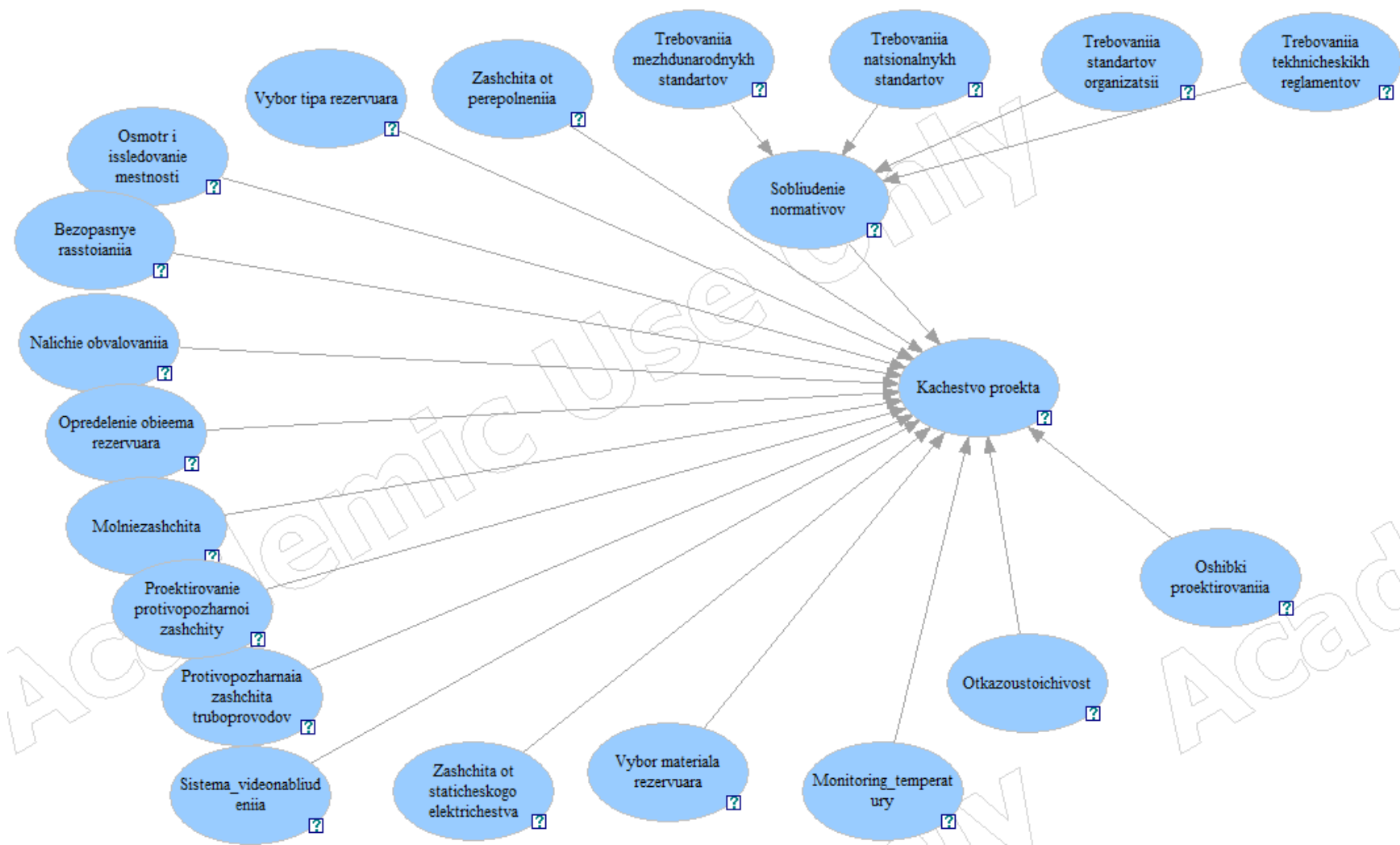


Рисунок 3.3.4.3 – Структурное построение ветви «Качество проекта»

Затем для каждого из родительских узлов в программе заполняется таблица вероятностей. Таблицы узлов состоят из двух строк или двух возможных ситуаций:

– строка «у» («ДА») – вероятность того, что требование по качеству полностью выполнено;

– строка «п» («НЕТ») – вероятность того, что требование полностью не выполнено.

Начальным значением для вероятности того, что требование по качеству полностью выполнено возьмем 1 и соответственно вероятность того, что требование по качеству полностью выполнено равно 0. Составляем исходные таблицы вероятностей для ветвей родительского узла «Kachestvo proekta».

Для определения вероятности узла «Sobliudenie normativov» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждому из факторов значения их влияния (по отдельности) на основную причину, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. В данном исследовании введено допущение о том, что при полном выполнении требований родительских узлов одновременно, условная вероятность наилучшего соблюдения нормативов будет равна 0,9. Пусть 90 – это максимальное суммарное количество баллов, распределённое по четырем узлам.

В таблице 3.3.4.1 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доли от максимума, которые будут использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «Sobliudenie normativov».

Таблица 3.3.4.1 – Балльная оценка условной вероятности факторов, влияющих на «Соблюдение нормативных стандартов и правил»

Фактор	Балл влияния	%
Требования международных стандартов	25	0,25
Требования национальных стандартов	25	0,25
Требования стандартов организации	15	0,15
Требования технических регламентов	25	0,25

С помощью таблицы 3.3.4.1 заполняется таблица вероятностей у зла «Sobliudenie normativov» по принципу сложения долей, участвующих факторов риска, для каждой конкретной ветки дерева по рисунку 3.3.4.4.

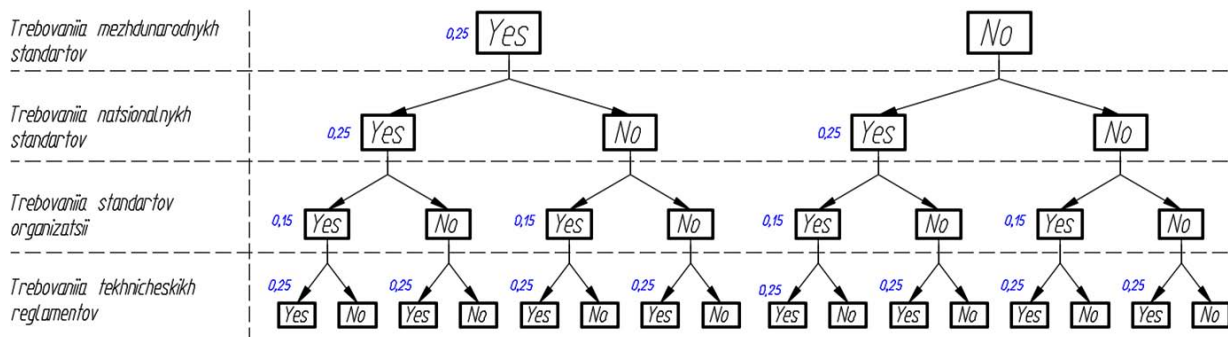


Рисунок 3.3.4.4 – Дерево сложения основных факторов, влияющих на «Соблюдение нормативов»

Например, для первой ветки, где все причины имеют значение «у» (то есть «ДА»), условная вероятность равна сумме всех долей, а именно – 0,9. Для предпоследней ветки, где единственной причиной, имеющей значение «у», является «Trebovaniia tekhnicheskikh reglamentov», значение условной вероятности равно 0,25.

Таблица условных вероятностей для узла «Sobliudenie normativov» представлена на рисунке 3.3.4.5

Trebovaniia me...	y								n							
Trebovaniia nat...	y				n				y				n			
Trebovaniia sta...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n
Trebovaniia tek...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n
y	0.9	0.65	0.75	0.5	0.65	0.4	0.5	0.25	0.65	0.4	0.5	0.25	0.4	0.15	0.25	0
n	0.1	0.35	0.25	0.5	0.35	0.6	0.5	0.75	0.35	0.6	0.5	0.75	0.6	0.85	0.75	1

Рисунок 3.3.4.5 – Таблица условных вероятностей узла «Sobliudenie normativov»

Для определения вероятности узла «Kachestvo proekta» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждому из факторов значения их влияния (по отдельности) на основную причину, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. В данном исследовании введено допущение о том, что при полном

выполнении требований родительских узлов одновременно, условная вероятность наилучшего качества проекта будет равна 0,8. Пусть 80 – это максимальное суммарное количество баллов, распределённое на равные части по десяти узлам.

В таблице 3.3.4.2 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доля от максимума, которая будет использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «Kachestvo proekta».

Таблица 3.3.4.2 – Балльная оценка условной вероятности факторов, влияющих на «Качество проекта»

Фактор	Балл влияния	%
Соблюдение нормативных стандартов и правил	8	0,08
Осмотр и исследование местности	8	0,08
Безопасные расстояния	8	0,08
Наличие обвалования	8	0,08
Определение объема резервуара	8	0,08
Молниезащита	8	0,08
Проектирование противопожарной защиты и систем противопожарной защиты	8	0,08
Защита от статического электричества	8	0,08
Выбор материала резервуара	8	0,08
Отказоустойчивость	8	0,08

С помощью таблицы 3.3.4.2 заполнена таблица вероятностей узла «Kachestvo proekta» по принципу сложения долей участвующих факторов для каждой конкретной ветки дерева по рисунку 3.3.4.6 (ниже приведена одна из восьми частей рисунка). Полностью все 8 частей приведены на рисунке А.28.

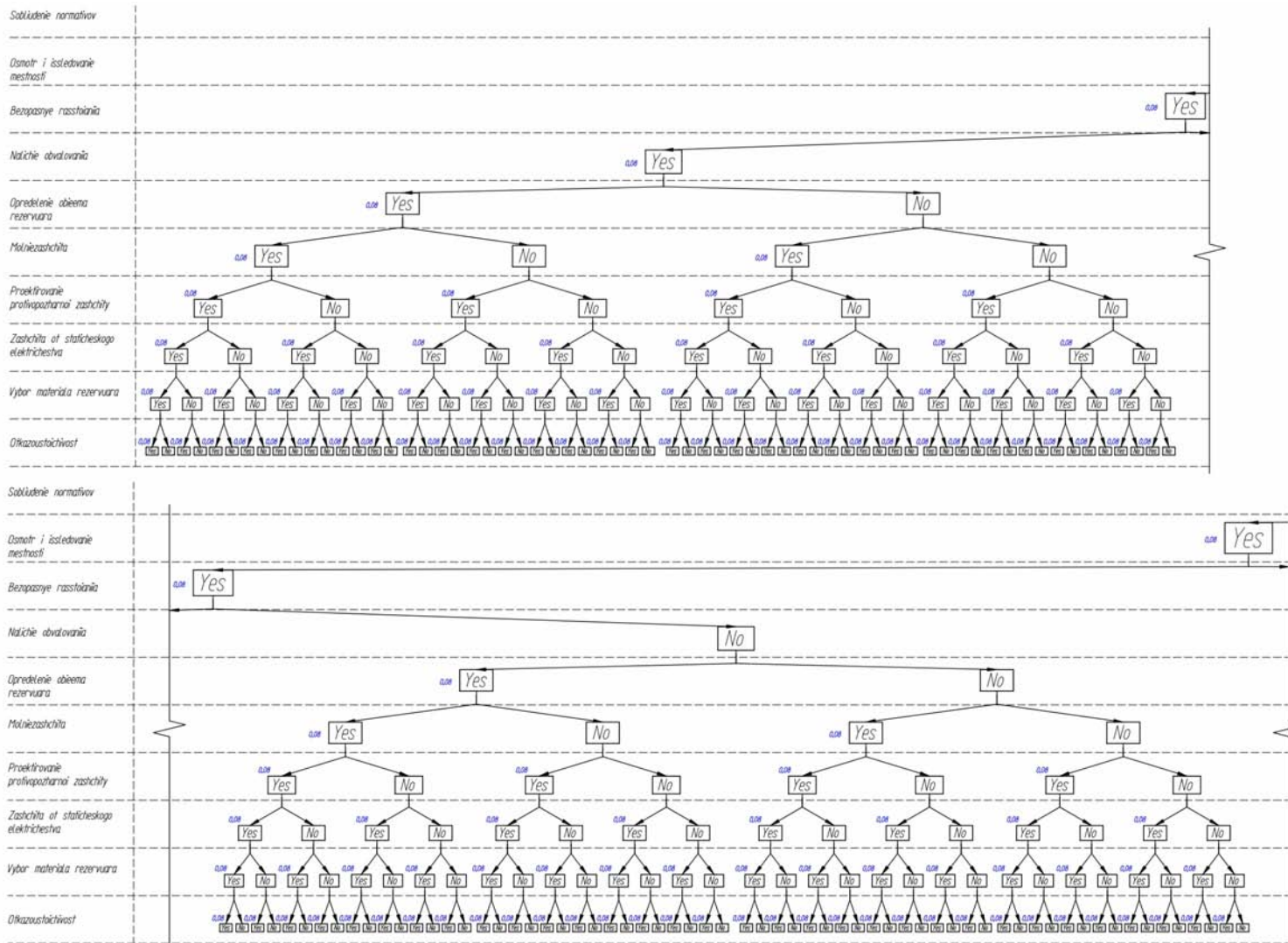


Рисунок 3.3.4.6 – Дерево сложения основных факторов, влияющих на «Качество проекта» (часть 1 из 8)

Например, для первой ветки, где все причины имеют значение «у» (то есть «ДА»), условная вероятность равна сумме всех долей, а именно – 0,8. Для предпоследней ветки, где единственной причиной, имеющей значение «у», является «Otkazoustoichivost», значение условной вероятности равно 0,08. Таблица условных вероятностей для зависимого узла «Kachestvo proekta» представлена на рисунке 3.3.4.7 (ниже приведена часть 1 из 13). Полностью расчетная таблица условных вероятностей для зависимого узла «Kachestvo proekta» представлена на рисунке А.29 (13 частей).

Sobliudenie nor...	y																n
Osmotr i issledo...	y																n
Bezopasnye ra...	y																n
Nalichie obvalo...	y																n
Opreделение obi...	y																n
Molniezashchita	y																n
Proektirovanie ...	y								n								
Zashchita ot st...	y				n				y				n				
Vybor materiala...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
Otkazoustoichi...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
y	0.8	0.72	0.72	0.64	0.72	0.64	0.64	0.56	0.72	0.64	0.64	0.56	0.64	0.56	0.56	0.48	
n	0.2	0.28	0.28	0.36	0.28	0.36	0.36	0.44	0.28	0.36	0.36	0.44	0.36	0.44	0.44	0.52	

Sobliudenie nor...	y																n
Osmotr i issledo...	y																n
Bezopasnye ra...	y																n
Nalichie obvalo...	y																n
Opreделение obi...	y																n
Molniezashchita	y	n															
Proektirovanie ...	y								n								
Zashchita ot st...	y				n				y				n				
Vybor materiala...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
Otkazoustoichi...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
y	0.72	0.64	0.64	0.56	0.64	0.56	0.56	0.48	0.64	0.56	0.56	0.48	0.56	0.48	0.48	0.4	
n	0.28	0.36	0.36	0.44	0.36	0.44	0.44	0.52	0.36	0.44	0.44	0.52	0.44	0.52	0.52	0.6	

Sobliudenie nor...	y																n
Osmotr i issledo...	y																n
Bezopasnye ra...	y																n
Nalichie obvalo...	y																n
Opreделение obi...	y	n															
Molniezashchita	y																n
Proektirovanie ...	y								n								
Zashchita ot st...	y				n				y				n				
Vybor materiala...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
Otkazoustoichi...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
y	0.72	0.64	0.64	0.56	0.64	0.56	0.56	0.48	0.64	0.56	0.56	0.48	0.56	0.48	0.48	0.4	
n	0.28	0.36	0.36	0.44	0.36	0.44	0.44	0.52	0.36	0.44	0.44	0.52	0.44	0.52	0.52	0.6	

Sobliudenie nor...	y																n
Osmotr i issledo...	y																n
Bezopasnye ra...	y																n
Nalichie obvalo...	y																n
Opreделение obi...	y	n															
Molniezashchita	y	n															
Proektirovanie ...	y								n								
Zashchita ot st...	y				n				y				n				
Vybor materiala...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
Otkazoustoichi...	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	y	n	
y	0.64	0.56	0.56	0.48	0.56	0.48	0.48	0.4	0.56	0.48	0.48	0.4	0.48	0.4	0.4	0.32	
n	0.36	0.44	0.44	0.52	0.44	0.52	0.52	0.6	0.44	0.52	0.52	0.6	0.52	0.6	0.6	0.68	

Рисунок 3.3.4.7 – Таблица условных вероятностей узла «Kachestvo proekta» (часть 1 из 13)

На рисунке 3.3.4.8 представлено моделирование общей причины – ветви узла «Kachestvo proekta» с заполненными таблицами условных вероятностей.

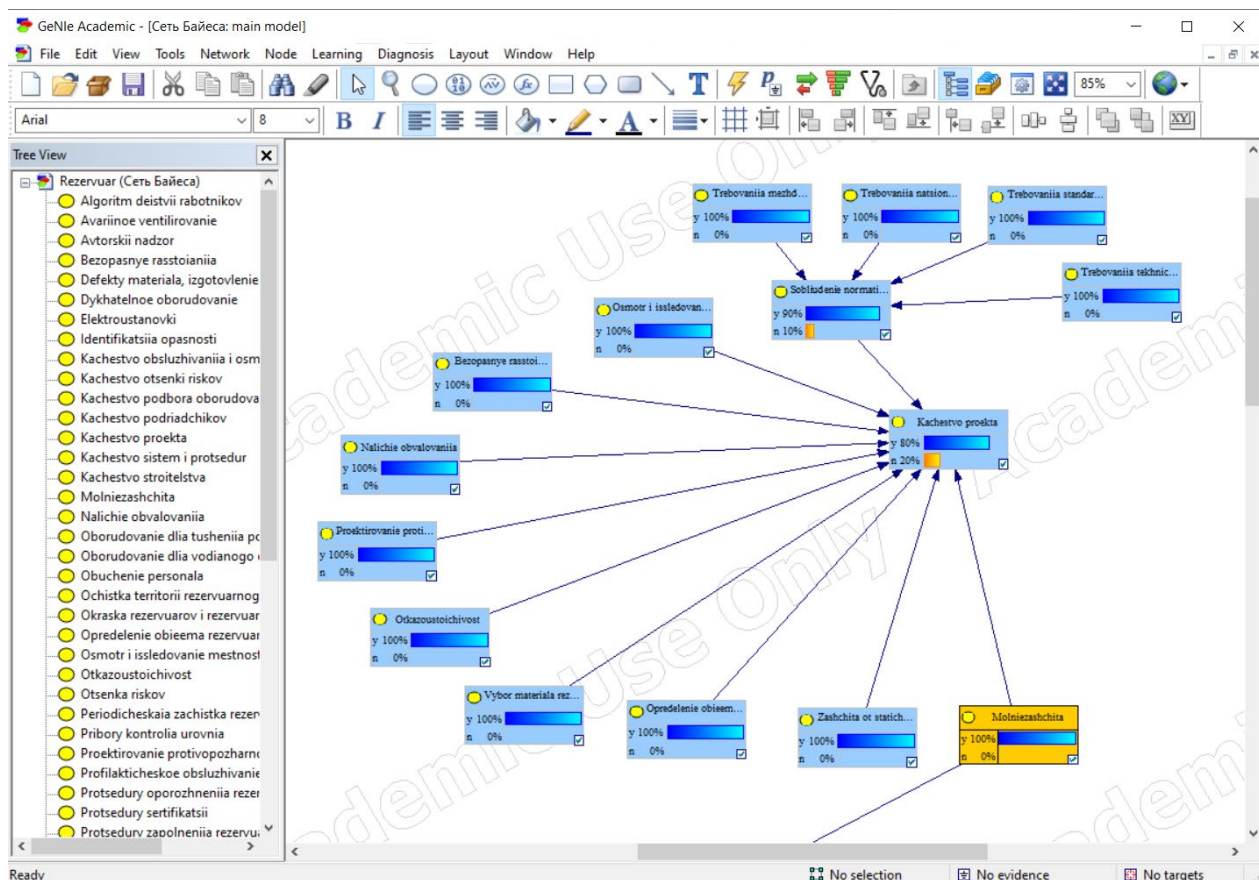


Рисунок 3.3.4.8 – Итоговый вид ветви «Kachestvo proekta»

Аналогично осуществляется моделирование для каждого из созданных узлов, поэтому далее приведем без детализации итоговые виды ветвей для остальных узлов.

2) Моделирование узла «Kachestvo obsluzhivaniya i osmotra»

Для моделирования ветви основной причины «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra» («Kachestvo obsluzhivaniya i osmotra») создается основной узел «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra» («Kachestvo obsluzhivaniya i osmotra») и 8 родительских узлов (рисунок 3.3.4.9).

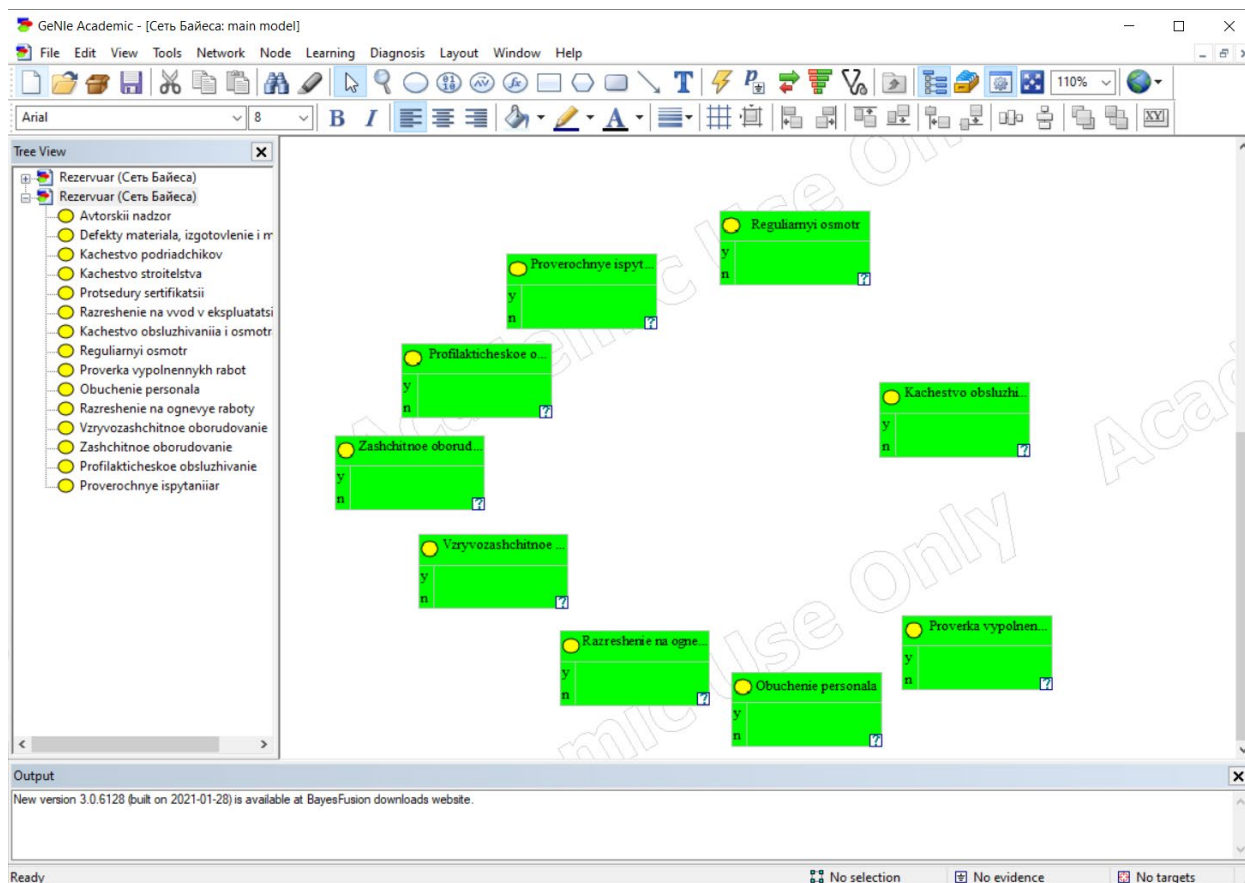


Рисунок 3.3.4.9 – Создание узлов ветви «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra»

С помощью инструмента «Ark» к узлу «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra» от остальных узлов строятся дуги, показывающие причинно-следственные связи (рисунок 3.3.4.10).

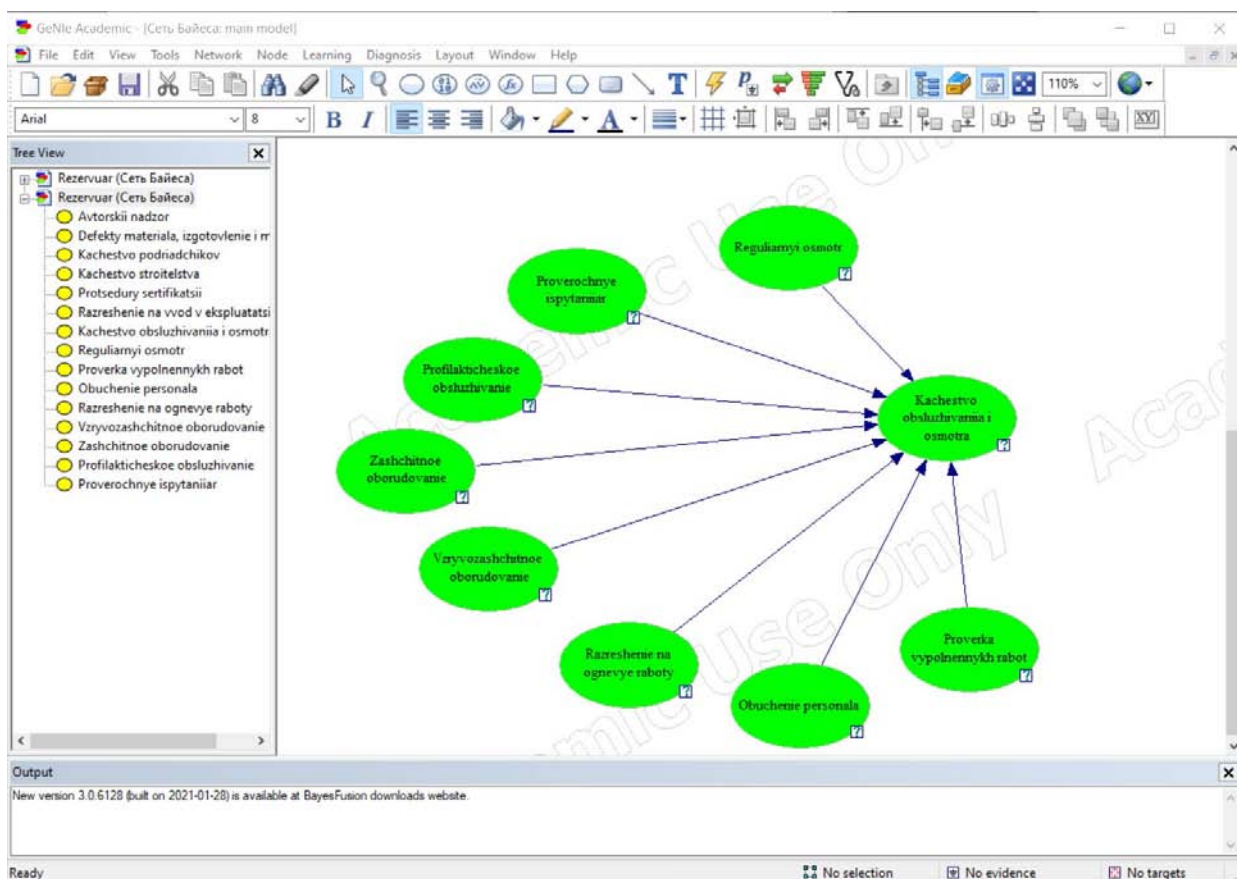


Рисунок 3.3.4.10 – Создание причинно-следственных связей

Затем для каждого из родительских узлов в программе заполняется таблица вероятностей.

Для определения вероятности узла «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждому из факторов значения их влияния (по отдельности) на основную причину, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. В данном исследовании введено допущение о том, что при полном выполнении требований родительских узлов одновременно, условная вероятность наилучшего качества обслуживания и осмотра будет равна 0,8. Пусть 80 – это максимальное суммарное количество баллов, распределённое по восьми узлам.

В таблице 3.3.4.3 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доля от максимума, которая будет использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra».

Таблица 3.3.4.3 – Балльная оценка условной вероятности факторов, влияющих на «Качество обслуживания и осмотра»

Фактор	Балл влияния	%
Регулярный осмотр	15	0,15
Проверочные испытания	5	0,05
Профилактическое обслуживание	15	0,15
Защитное оборудование	13	0,13
Взрывозащитное оборудование	13	0,13
Разрешение на огневые работы	5	0,05
Обучение персонала	7	0,07
Проверка выполненных работ	7	0,07

С помощью таблицы 3.3.4.3 заполнена таблица вероятностей узла «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra» по принципу сложения долей участвующих факторов для каждой конкретной ветки дерева.

На рисунке 3.3.4.11 представлено моделирование общей причины – ветви узла «Kachestvo osluzhivaniya i osmotra» с заполненными таблицами условных вероятностей.

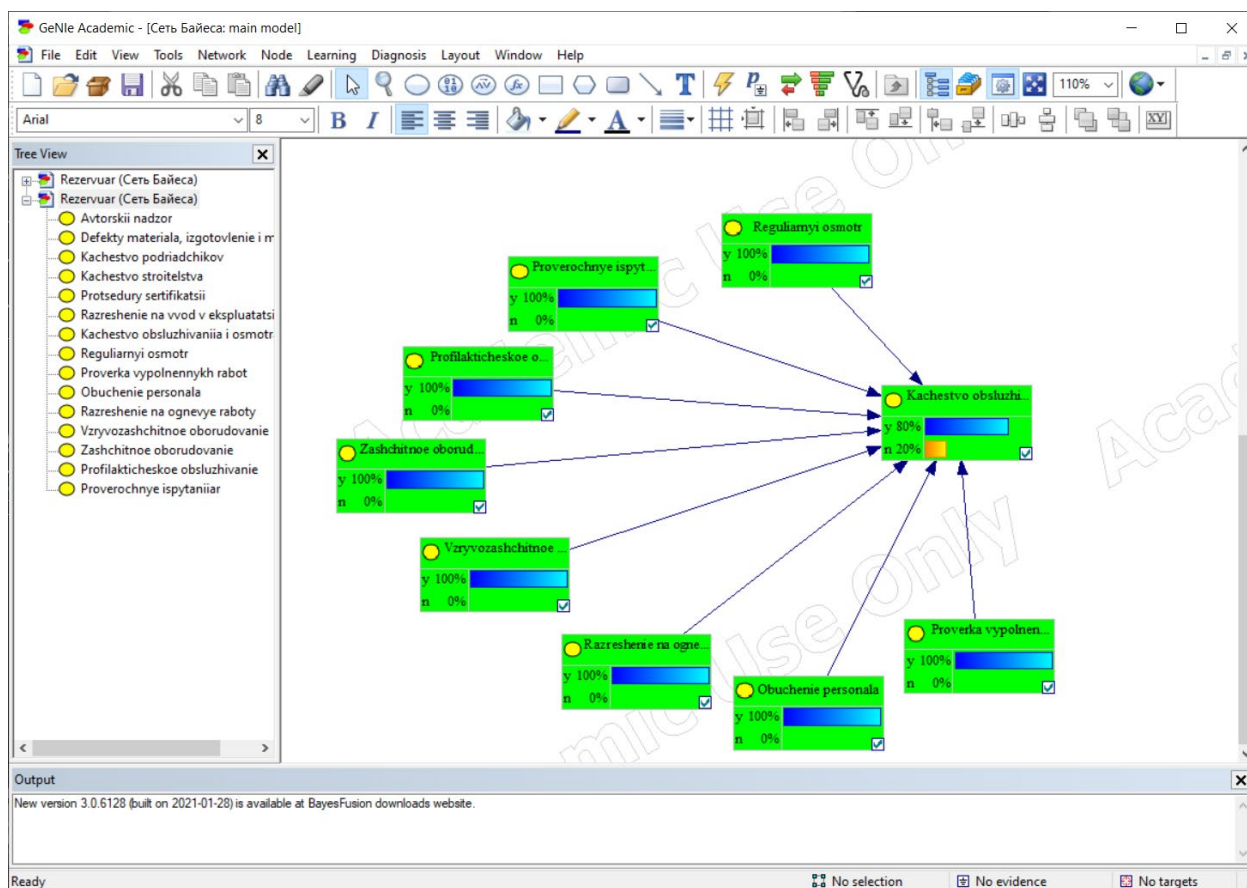


Рисунок 3.3.4.11 – Итоговый вид ветви «Качество обслуживания и осмотра»

3) Моделирование узла «Качество строительства»

Для моделирования ветви основной причины «Kachestvo stroitelstva» («Качество строительства») с помощью инструмента «Chance» создается основной узел «Kachestvo stroitelstva» («Качество строительства») и 5 родительских узлов (рисунок 3.3.4.12).

С помощью инструмента «Arc» к узлу «Kachestvo stroitelstva» от остальных узлов проводятся дуги, показывающие причинно-следственные связи (рисунок 3.3.4.13).

Затем для каждого из родительских узлов в программе заполняется таблица вероятностей.

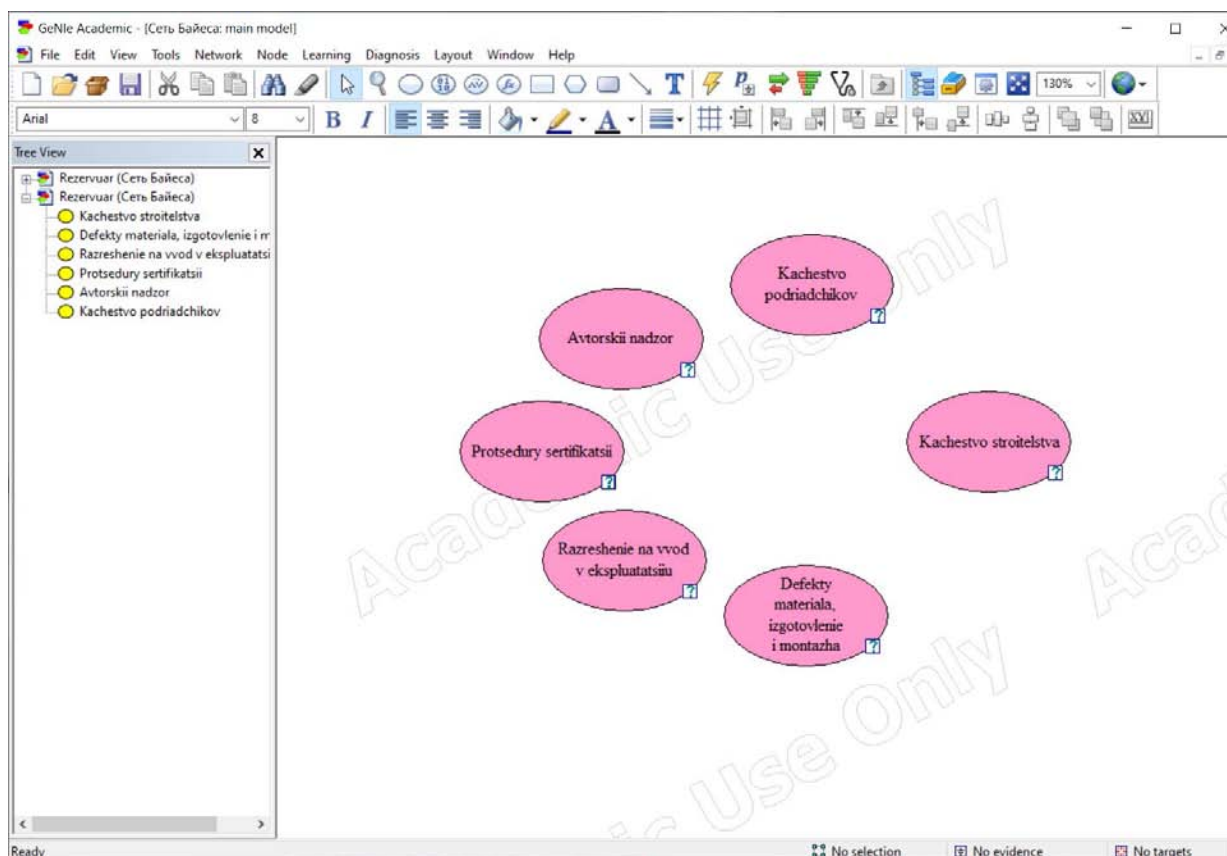


Рисунок 3.3.4.12 – Создание узлов ветви «Kachestvo stroitelstva»

Для определения вероятности узла «Kachestvo stroitelstva» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждому из факторов значения их влияния (по отдельности) на основную причину, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. В данном исследовании введено допущение о том, что при полном выполнении требований родительских узлов одновременно, условная вероятность наилучшего качества строительства будет равна 0,7. Пусть 70 – это максимальное суммарное количество баллов, распределённое по пяти узлам.

В таблице 3.3.4.4 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доля от максимума, которая будет использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «Kachestvo stroitelstva».

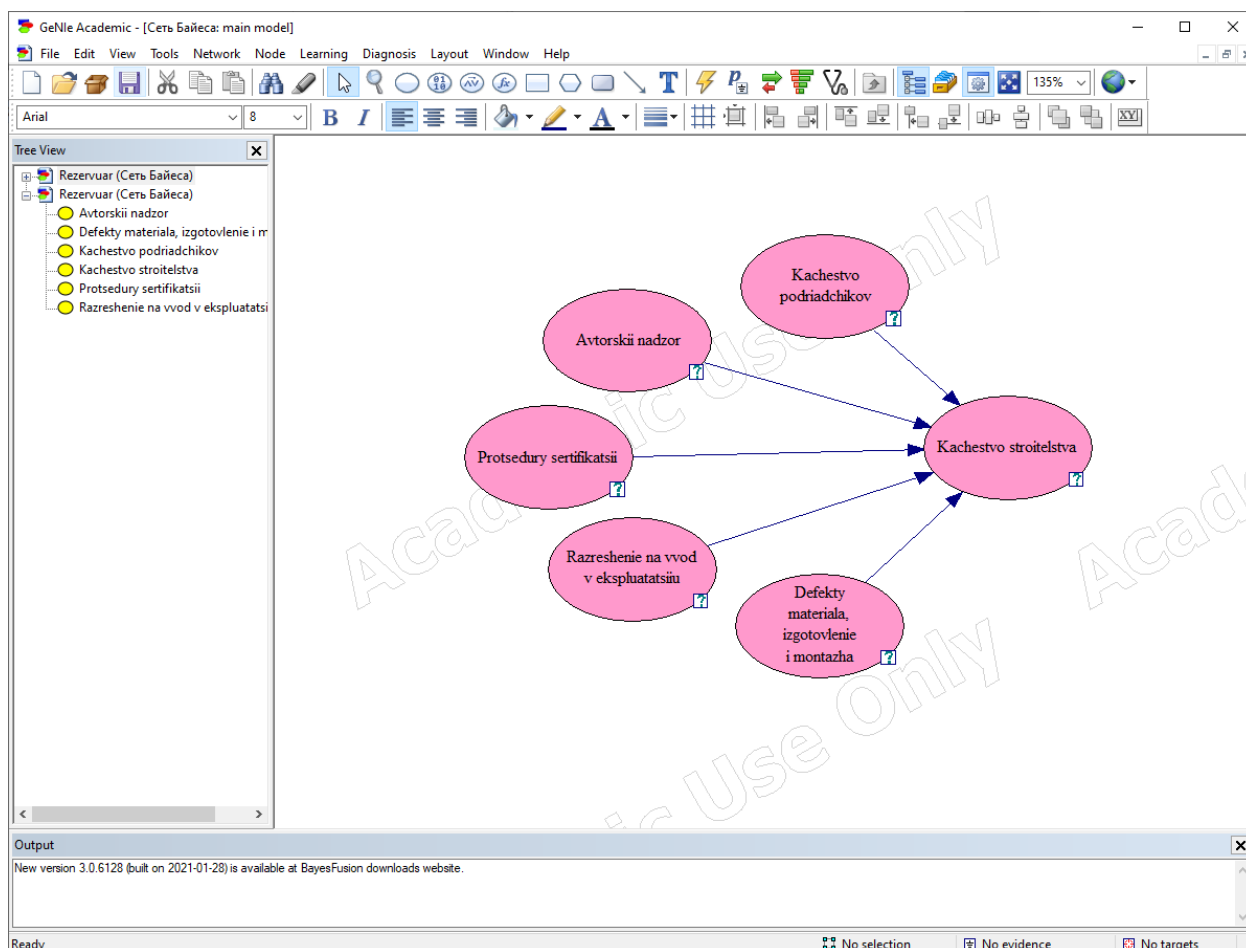


Рисунок 3.3.4.13 – Создание причинно-следственных связей

Таблица 3.3.4.4 – Балльная оценка условной вероятности факторов, влияющих на «Качество строительства»

Фактор	Балл влияния	%
Качество подрядчиков	19	0,19
Авторский надзор	7	0,07
Процедуры сертификации	14	0,14
Разрешение на ввод в эксплуатацию	12	0,12
Дефекты материала, изготовления и монтажа	18	0,18

С помощью таблицы 3.3.4.4 заполнена таблица вероятностей узла «Kachestvo stroitelstva» по принципу сложения долей участвующих факторов для каждой конкретной ветви дерева.

На рисунке 3.3.4.14 представлено моделирование общей причины – ветви узла «Kachestvo stroitelstva» с заполненными таблицами условных вероятностей.

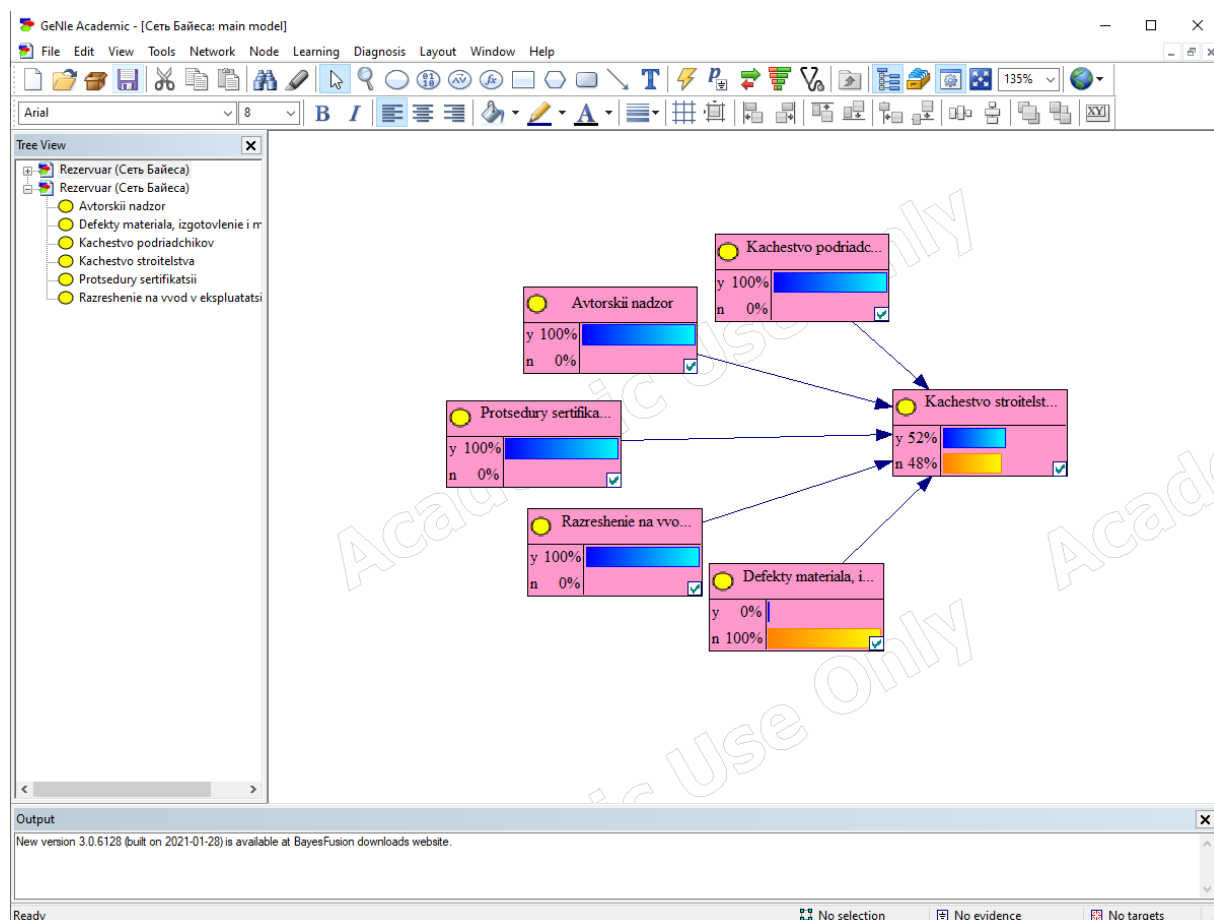


Рисунок 3.3.4.14 – Итоговый вид ветви «Качество строительства»

4) Моделирование узла «Качество подбора оборудования»

Для моделирования ветви основной причины «Kachestvo podbora oborudovaniya» («Качество подбора оборудования») с помощью инструмента «Chance» создается основной узел «Kachestvo podbora oborudovaniya» («Качество подбора оборудования») и 10 родительских узлов (рисунок 3.3.4.15).

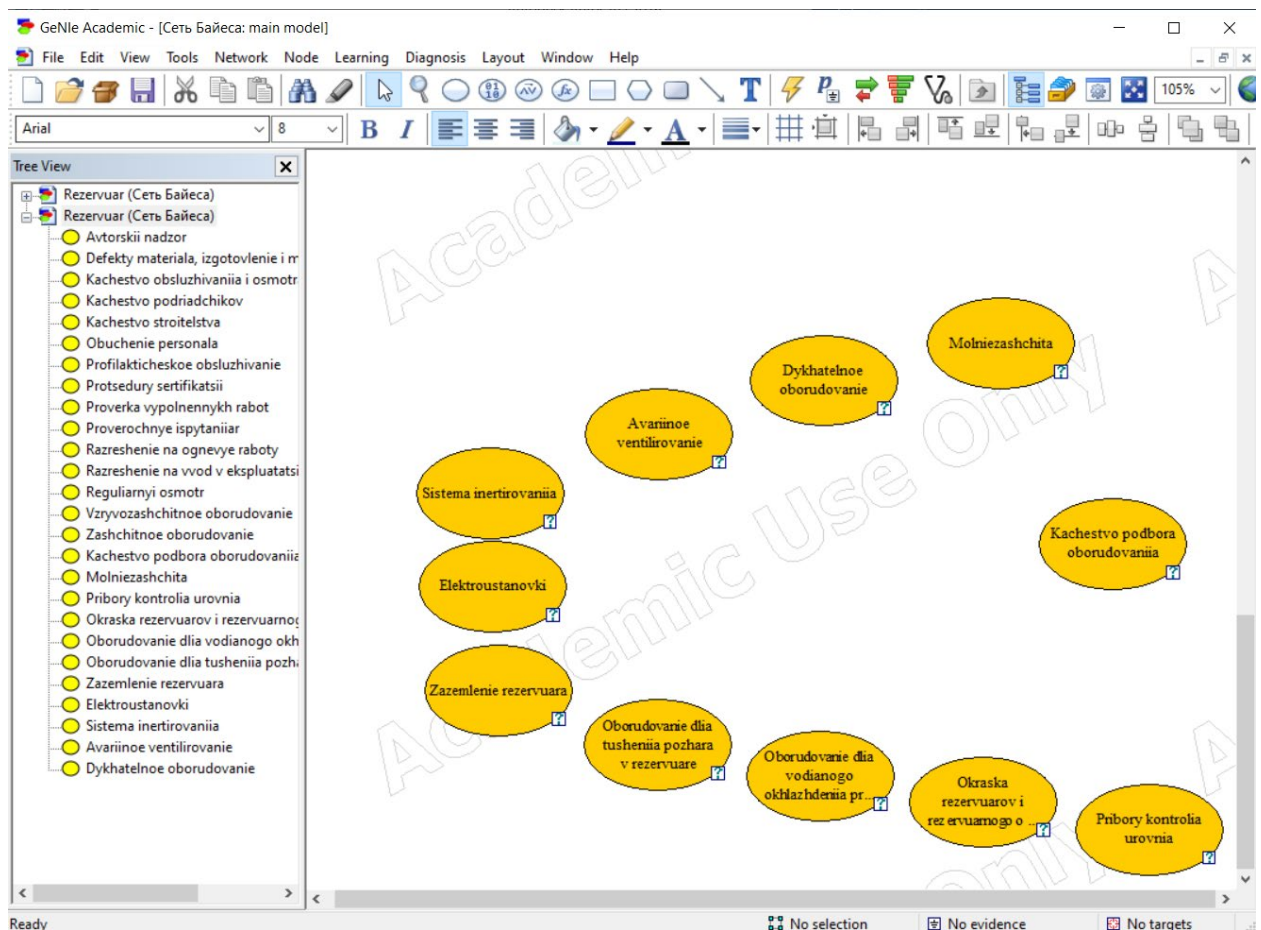


Рисунок 3.3.4.15 – Создание узлов ветви «Kachestvo podbora oborudovaniya»

С помощью инструмента «Ark» к узлу «Kachestvo podbora oborudovaniya» от остальных узлов строятся дуги, показывающие причинно-следственные связи (рисунок 3.3.4.16).

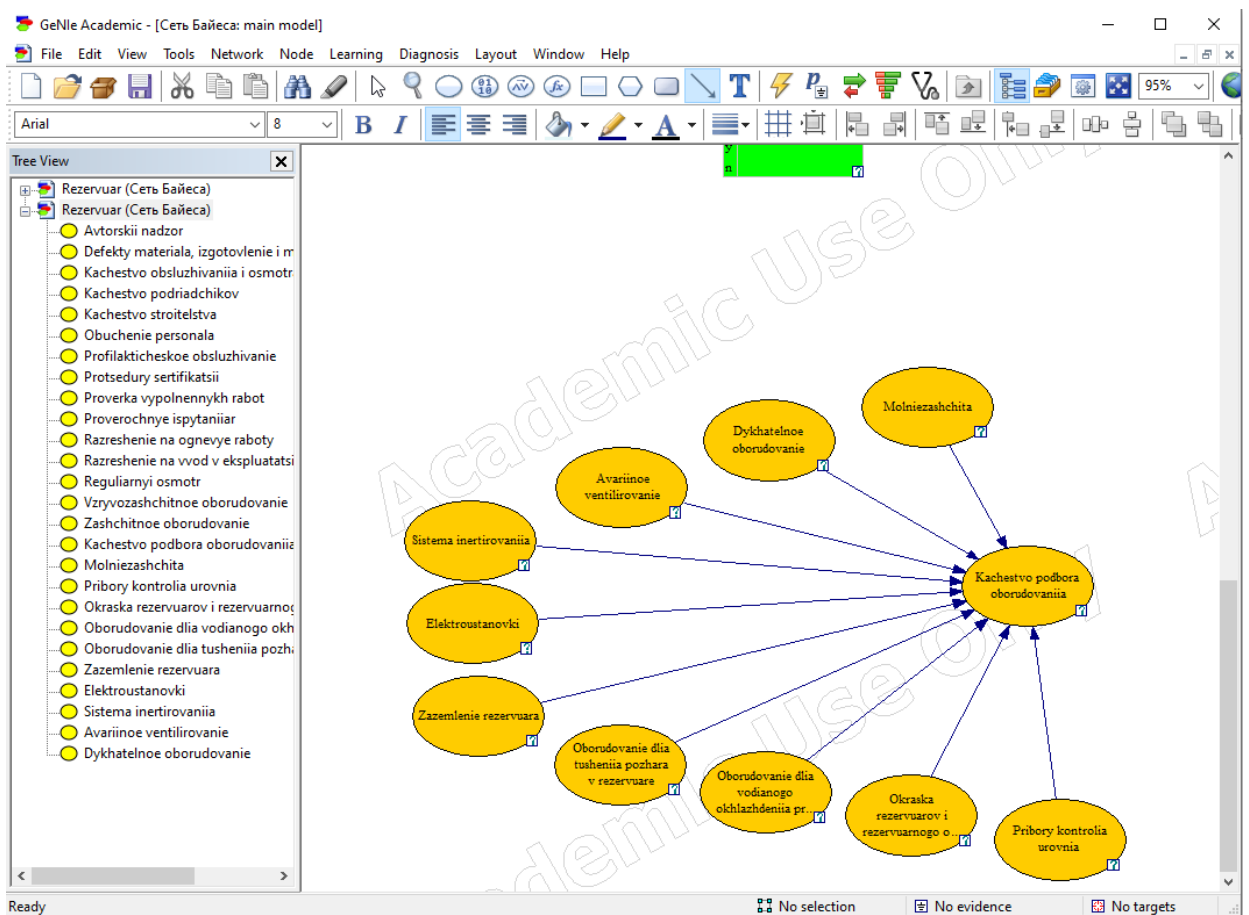


Рисунок 3.3.4.16 – Создание причинно – следственных связей

Затем для каждого из родительских узлов в программе заполняется таблица вероятностей.

Для определения вероятности узла «Kachestvo podbora oborudovaniya» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждому из факторов значения их влияния (по отдельности) на основную причину, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. В данном исследовании введено допущение о том, что при полном выполнении требований родительских узлов одновременно, условная вероятность наилучшего качества подбора оборудования будет равна 0,70. Пусть 70 – это максимальное суммарное количество баллов, распределённое по десяти узлам на равные части.

В таблице 3.3.4.5 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доля от максимума, которая будет использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «Kachestvo podbora oborudovaniya».

Таблица 3.3.4.5 – Балльная оценка условной вероятности факторов, влияющих на «Качество подбора оборудования»

Фактор	Балл влияния	%
Молниезащита	7	0,07
Дыхательное оборудование	7	0,07
Аварийное вентилирование	7	0,07
Система инертирования	7	0,07
Электроустановки	7	0,07
Заземление резервуара	7	0,07
Оборудование для тушения пожара в резервуаре	7	0,07
Оборудование для водяного охлаждения при пожаре	7	0,07
Окраска резервуаров и резервуарного оборудования	7	0,07
Приборы контроля уровня	7	0,07

С помощью таблицы 3.3.4.5 заполнена таблица вероятностей узла «Kachestvo podbora oborudovaniya» по принципу сложения долей участвующих факторов для каждой конкретной ветки дерева.

На рисунке 3.3.4.17 представлено моделирование общей причины – ветви узла «Kachestvo podbora oborudovaniya» с заполненными таблицами условных вероятностей.

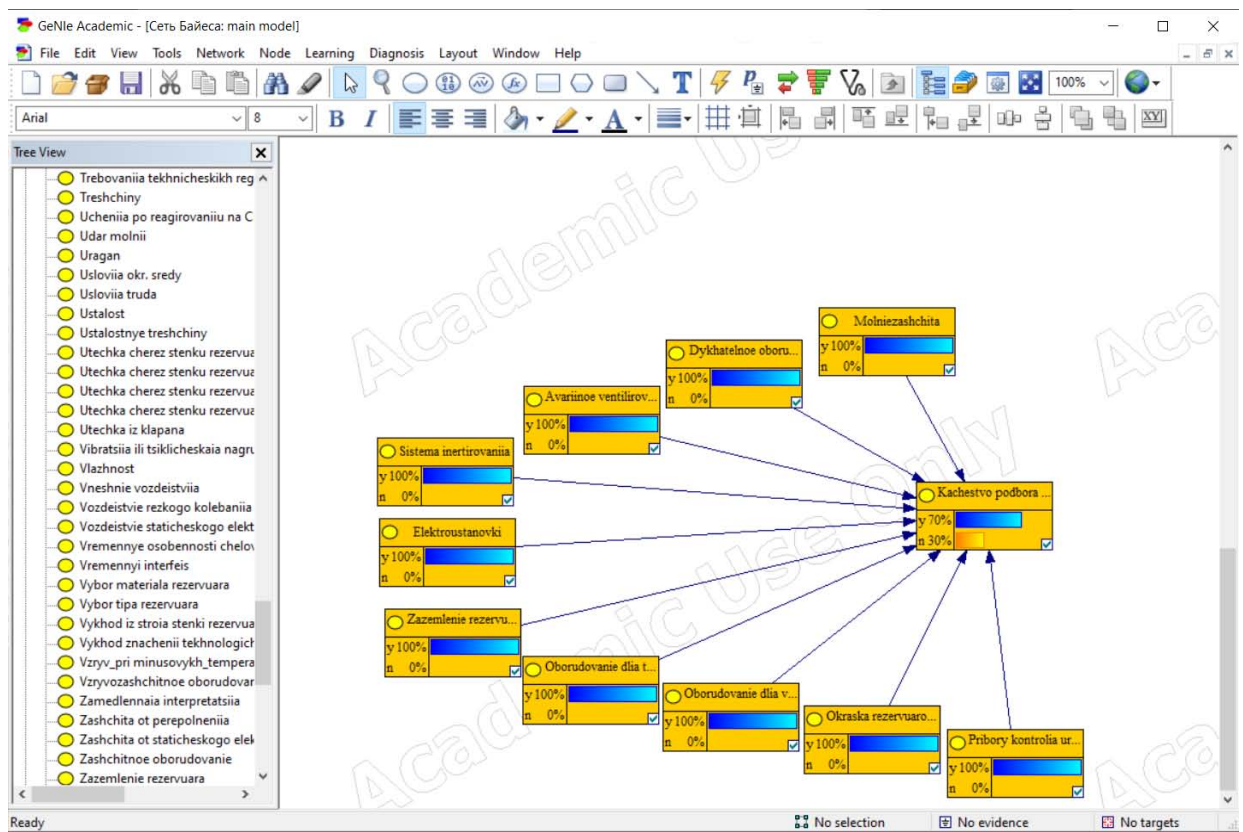


Рисунок 3.3.4.17 – Итоговый вид ветви «Качество подбора оборудования»

5) Моделирование узла «Качество оценки рисков»

Для моделирования ветви основной причины «Kachestvo otsenki riskov» («Качество оценки рисков») с помощью инструмента «Chance» создается основной узел «Kachestvo otsenki riskov» («Качество оценки рисков») и 3 родительских узла (рисунок 3.3.4.18).

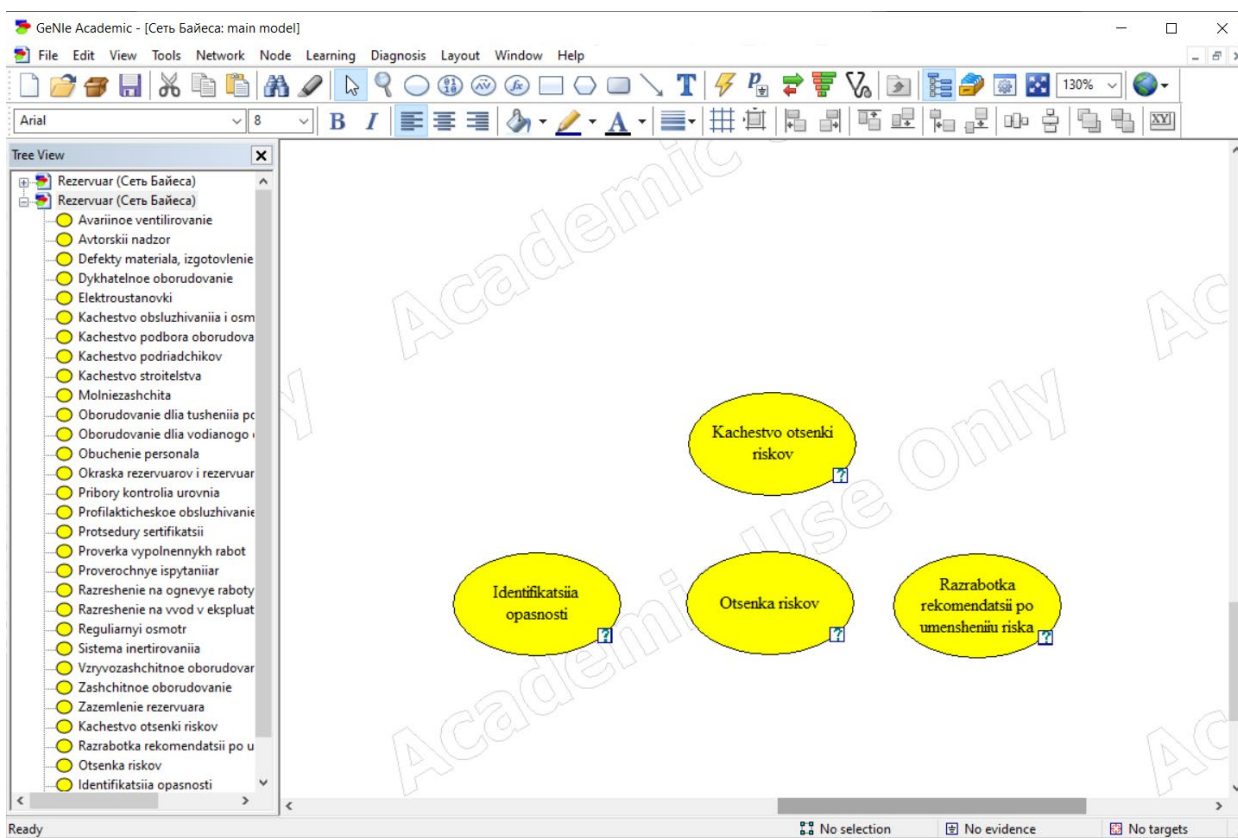


Рисунок 3.3.4.18 – Создание узлов ветви «Kachestvo otsenki riskov»

С помощью инструмента «Ark» к узлу «Kachestvo otsenki riskov» от остальных узлов проводятся дуги, показывающие причинно-следственные связи (рисунок 3.3.4.19).

Затем для каждого из родительских узлов в программе заполняется таблица вероятностей.

Для определения вероятности узла «Kachestvo otsenki riskov» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждому из факторов значения их влияния (по отдельности) на основную причину, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. В данном исследовании введено допущение о том, что при полном выполнении требований родительских узлов одновременно, условная вероятность наилучшего качества оценки рисков будет равна 0,9. Пусть 90 – это максимальное суммарное количество баллов, распределённое по трем узлам.

В таблице 3.3.4.6 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доля от максимума, которая будет использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «Kachestvo otsenki riskov».

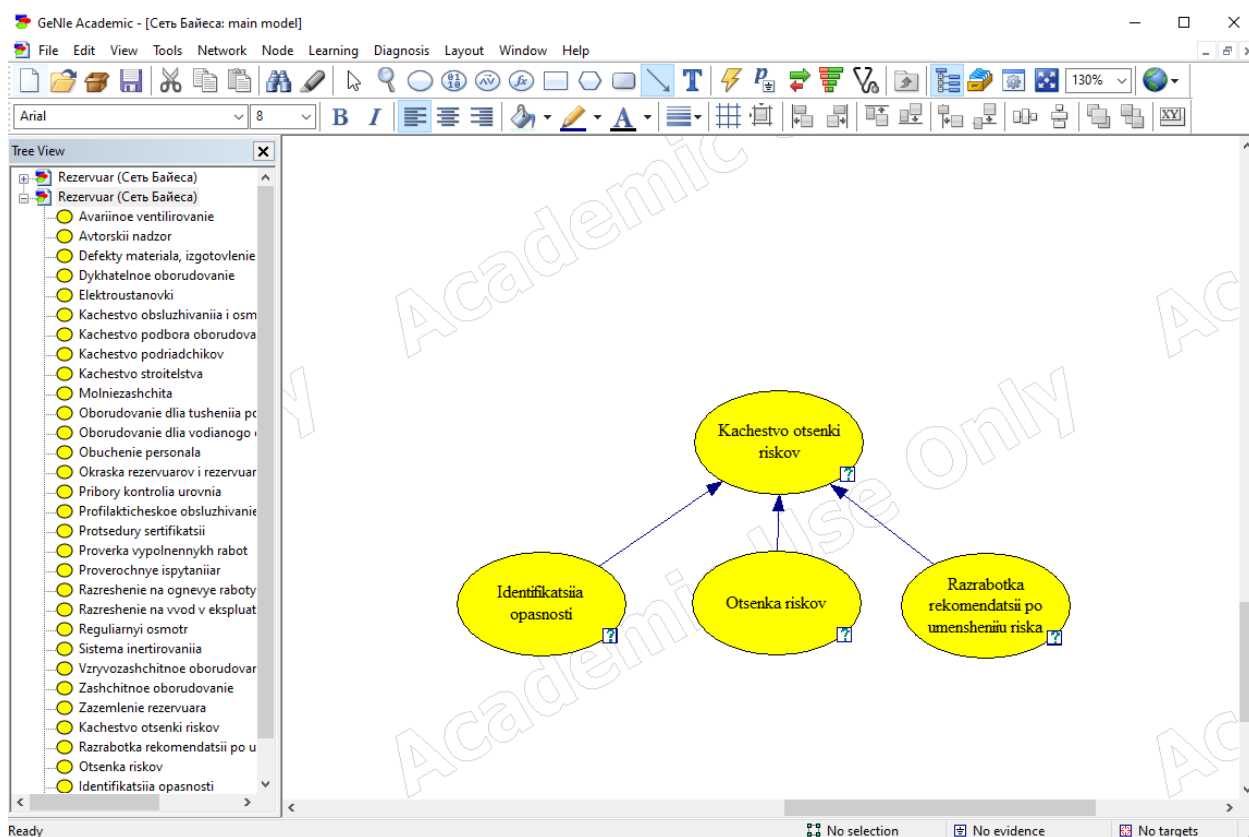


Рисунок 3.3.4.19 – Создание причинно-следственных связей

Таблица 3.3.4.6 – Балльная оценка условной вероятности факторов, влияющих на «Качество оценки рисков»

Фактор	Балл влияния	%
Идентификация опасности	30	0,30
Оценка рисков	30	0,30
Разработка рекомендаций по уменьшению риска	30	0,30

С помощью таблицы 3.3.4.6 заполнена таблица вероятностей узла «Kachestvo otsenki riskov» по принципу сложения долей участвующих факторов для каждой конкретной ветки дерева.

На рисунке 3.3.4.20 представлено моделирование общей причины – ветви узла «Kachestvo otsenki riskov» с заполненными таблицами условных вероятностей.

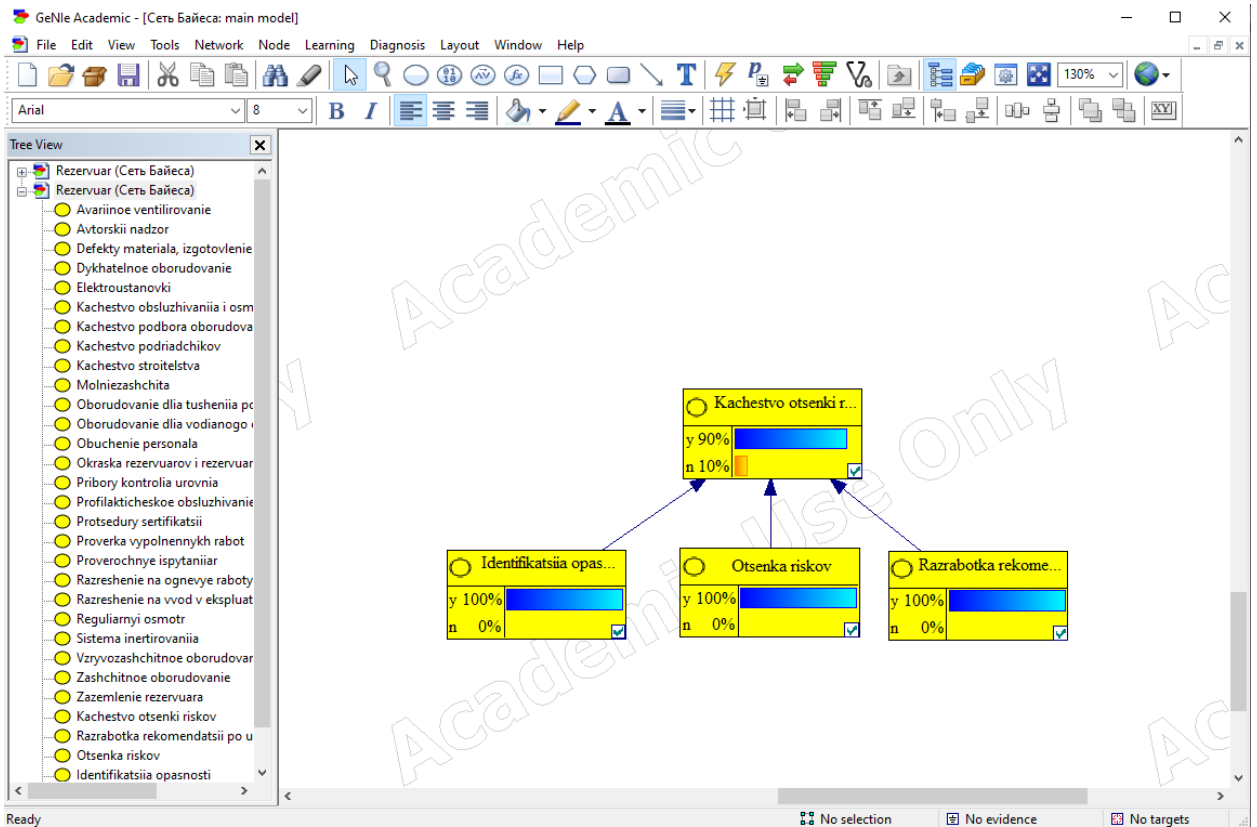


Рисунок 3.3.4.20 – Итоговый вид ветви «Качество оценки рисков»

б) Моделирование узла «Качество систем и процедур»

Для моделирования ветви основной причины «Kachestvo sistem i protsedur» («Качество систем и процедур») с помощью инструмента «Chance» создается основной узел «Kachestvo sistem i protsedur» («Качество систем и процедур») и 10 родительских узлов (рисунок 3.3.4.21).

С помощью инструмента «Ark» к узлу «Kachestvo sistem i protsedur» от остальных узлов проводятся дуги, показывающие причинно-следственные связи (рисунок 3.3.4.22).

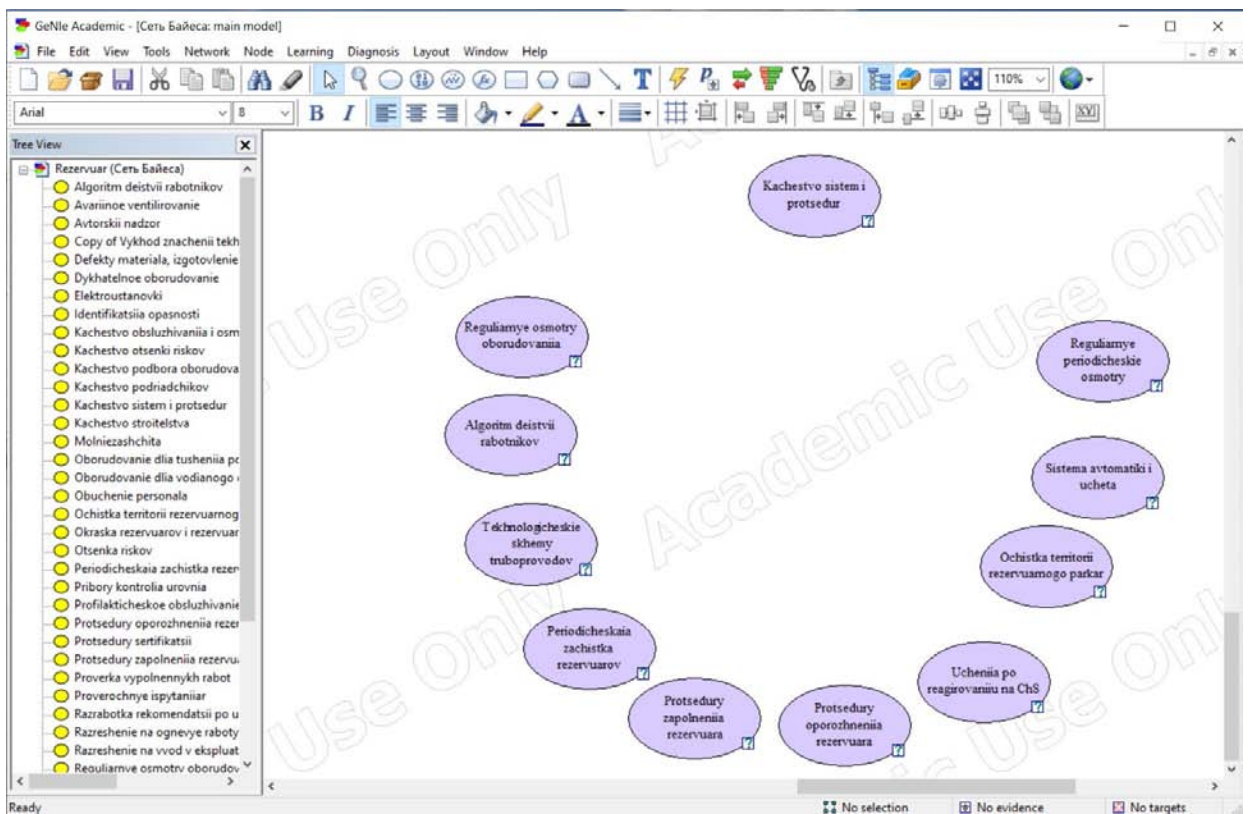


Рисунок 3.3.4.21 – Создание узлов ветви «Kachestvo sistem i protsedur»

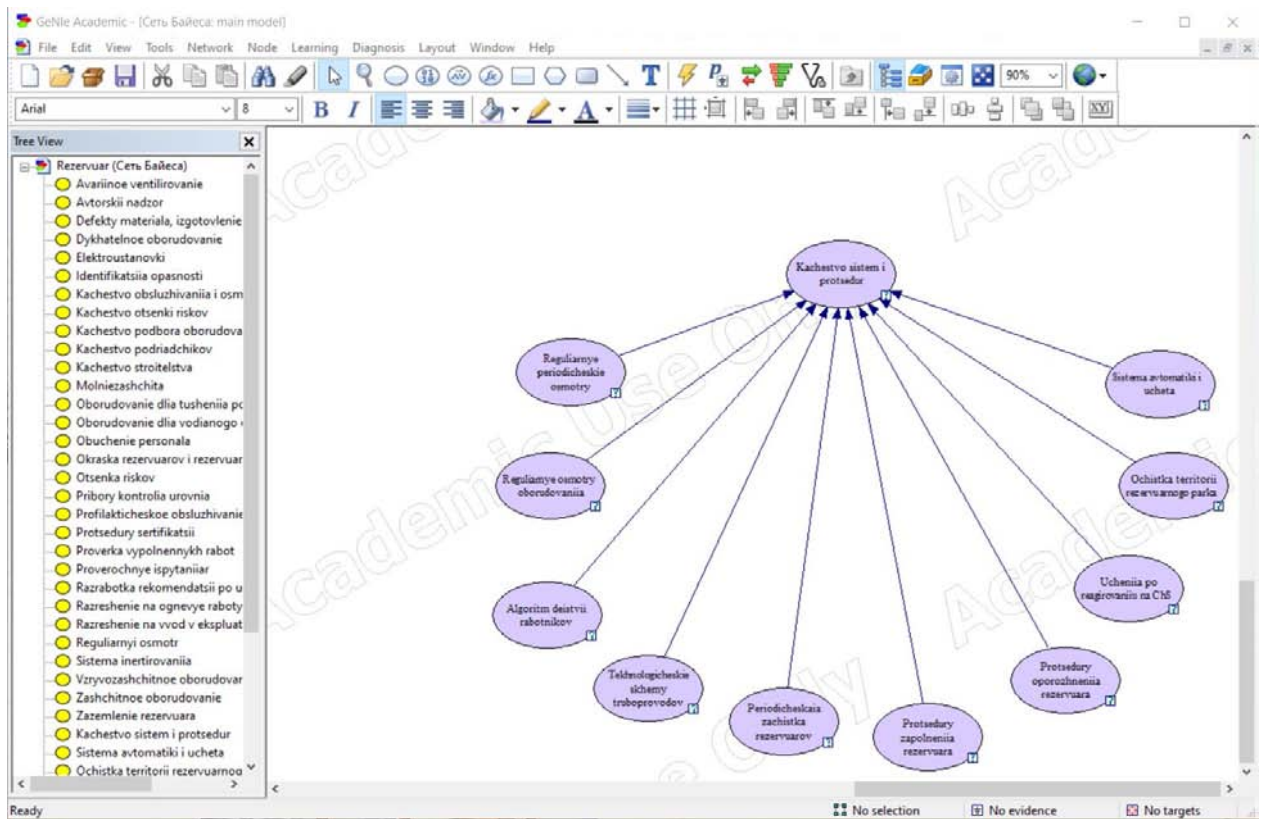


Рисунок 3.3.4.22 – Создание причинно-следственных связей

Затем для каждого из родительских узлов в программе заполняется таблица вероятностей.

Для определения вероятности узла «Kachestvo sistem i protsedur» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Для этого используется метод балльной экспертной оценки. Суть метода заключается в назначении каждому из факторов значения их влияния (по отдельности) на основную причину, оцениваемое в виде балла, основанного на мнении эксперта. В данном исследовании введено допущение о том, что при полном выполнении требований родительских узлов одновременно, условная вероятность наилучшего качества систем и процедур будет равна 0,7. Пусть 70 – это максимальное суммарное количество баллов, распределённое по десяти узлам.

В таблице 3.3.4.7 представлены назначенные автором настоящего исследования балльные оценки и их доля от максимума, которая будет использоваться при заполнении таблицы вероятностей узла «Kachestvo sistem i protsedur».

Таблица 3.3.4.7 – Балльная оценка условной вероятности факторов, влияющих на «Качество систем и процедур»

Фактор	Балл влияния	%
Регулярные периодические осмотры	7	0,07
Регулярные осмотры оборудования	7	0,07
Алгоритм действий работников	7	0,07
Технологические схемы трубопроводов	7	0,07
Периодическая зачистка резервуаров	7	0,07
Процедуры заполнения резервуара	7	0,07
Процедуры опорожнения резервуара	7	0,07
Учения по реагированию на ЧС	7	0,07
Очистка территории резервуарного парка	7	0,07
Система автоматики и учета нефти и нефтепродуктов	7	0,07

С помощью таблицы 3.3.4.7 была заполнена таблица вероятностей узла «Kachestvo sistem i protsedur» по принципу сложения долей участвующих факторов для каждой конкретной ветки дерева.

На рисунке 3.3.4.23 представлено моделирование общей причины – ветви узла «Kachestvo otsenki riskov» с заполненными таблицами условных вероятностей.

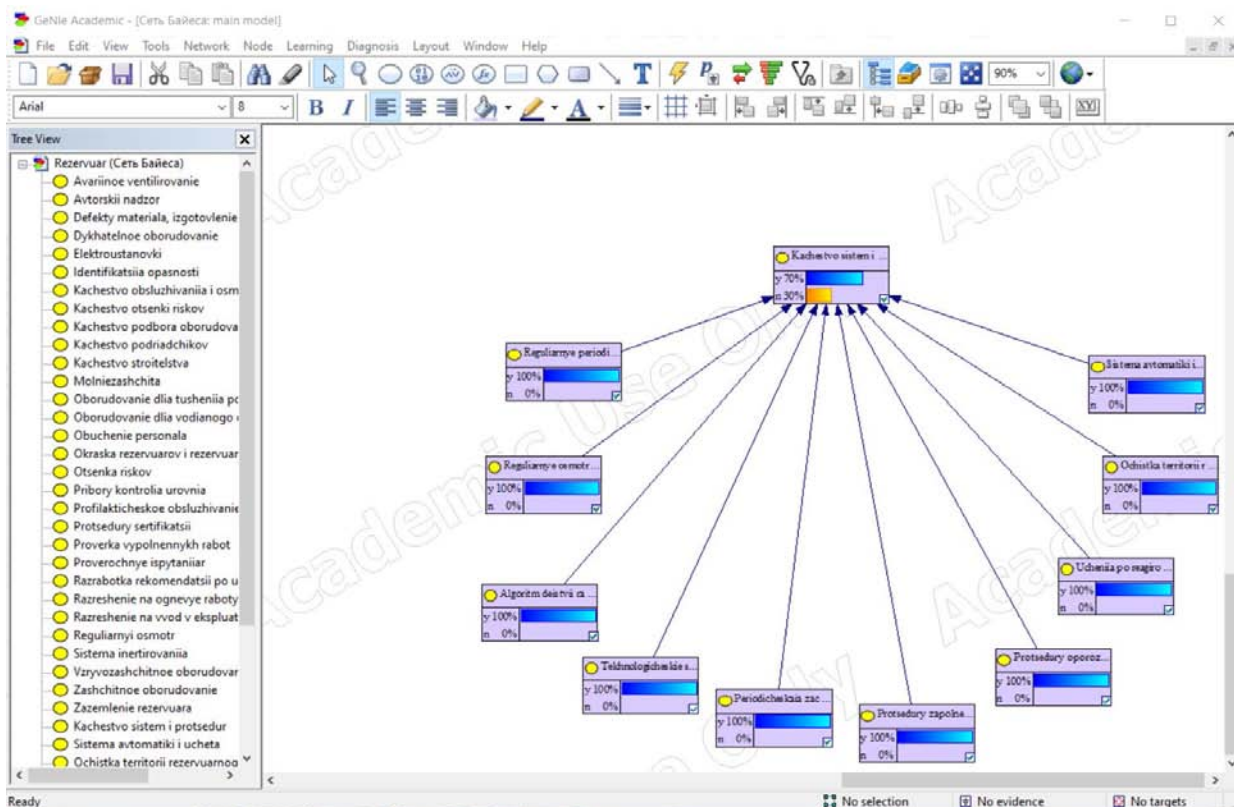


Рисунок 3.3.4.23 – Итоговый вид ветви «Качество систем и процедур»

7) Моделирование узла «Человеческий фактор»

Общий вид ветви «Chelovek» («Человек») представлен на рисунке 3.3.4.24.

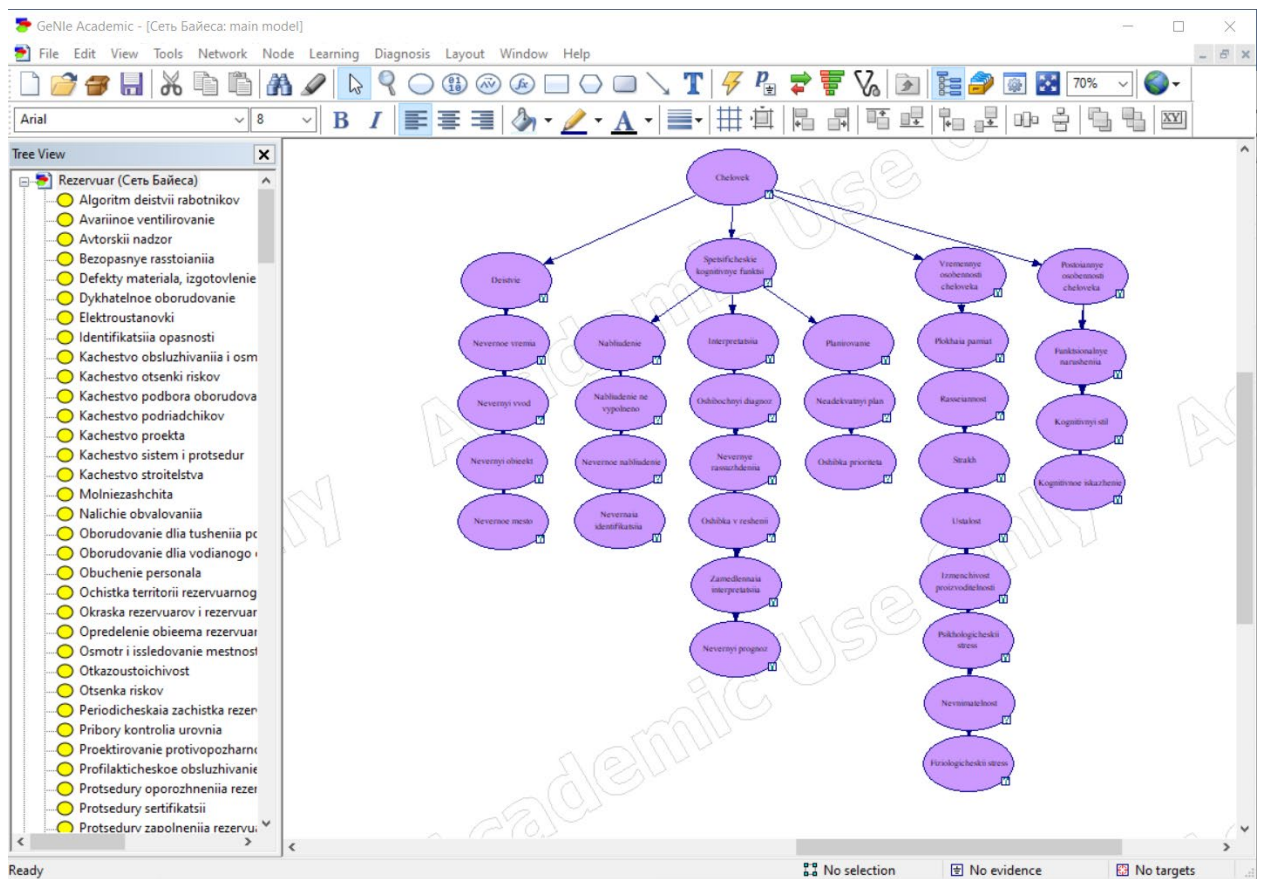


Рисунок 3.3.4.24 – Общий вид ветви «Человек» («Человек»)

Таблицы условных вероятностей для узлов заполняются в соответствии исходными данными. Итоговый вид ветви «Человек» («Человек») представлен на рисунке 3.3.4.25.

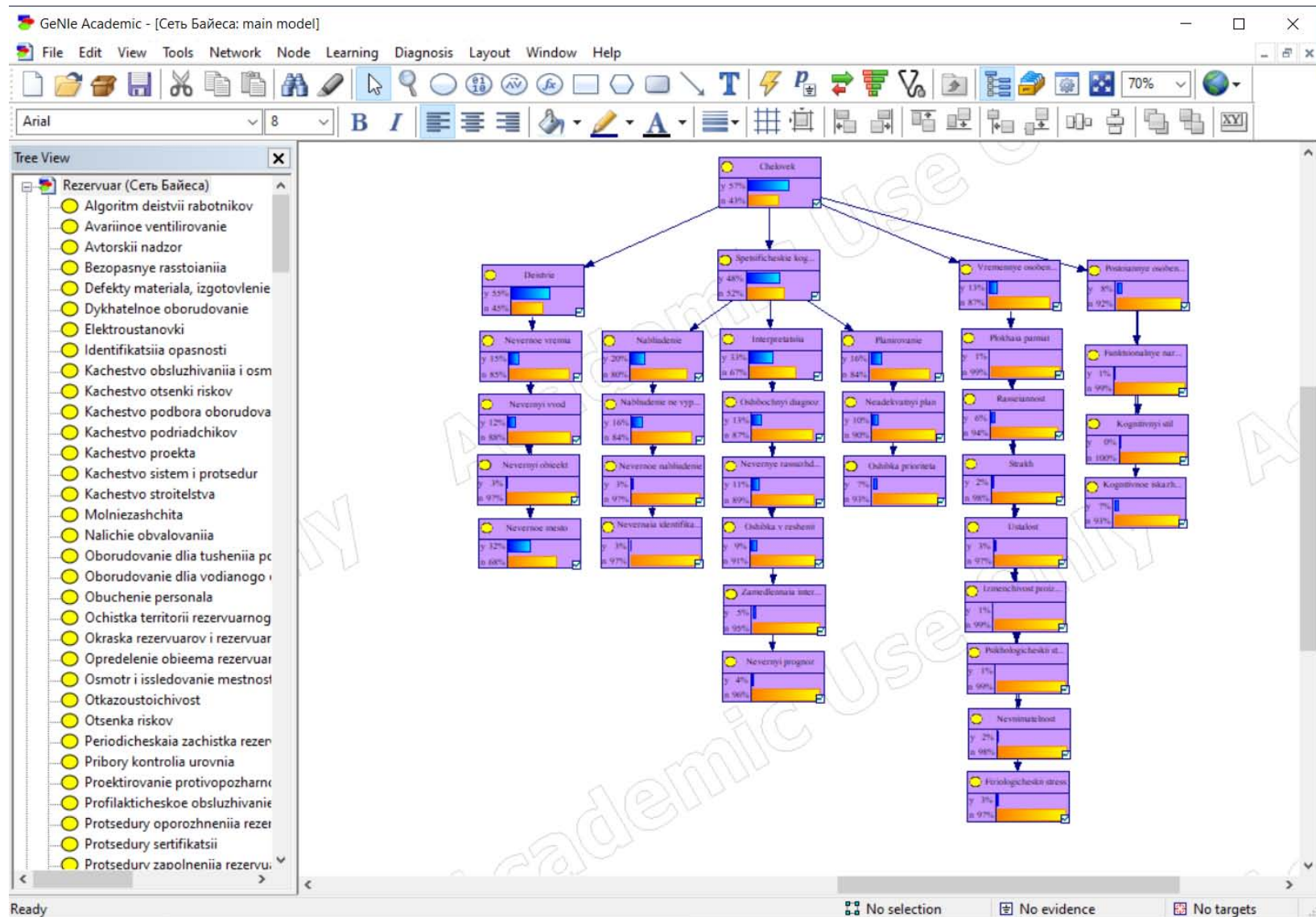


Рисунок 3.3.4.25 – Итоговый вид ветви «Человек»

Общий вид модели ветви «Tekhnologiia» («Технология») представлен на рисунке 3.3.4.26.

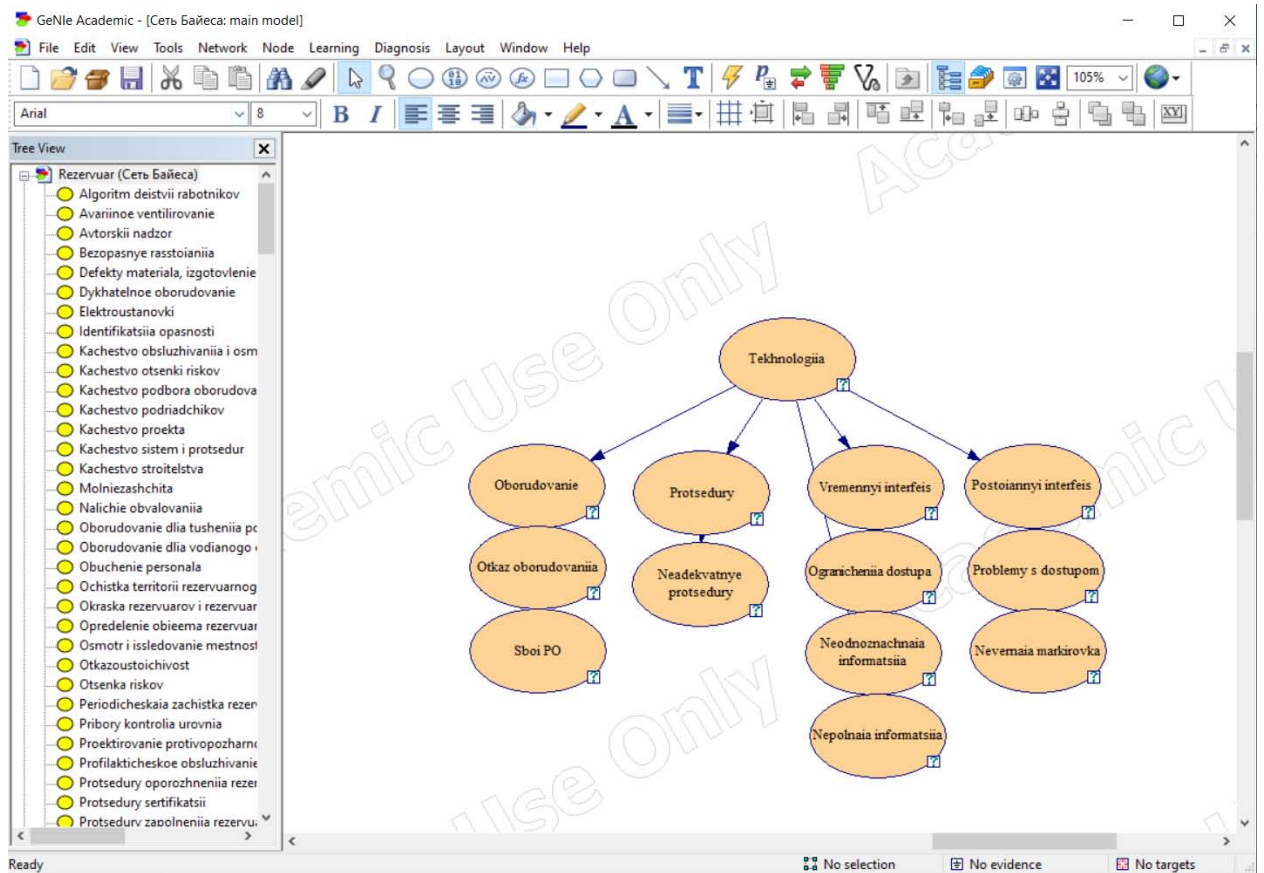


Рисунок 3.3.4.26 – Общий вид ветви «Tekhnologiia» («Технология»)

Значения таблиц условных вероятностей для узлов занесены в программу аналогично модели «Chelovek» («Человек»). Итоговый вид «Tekhnologiia» («Технология») представлен на рисунке 3.3.4.27.

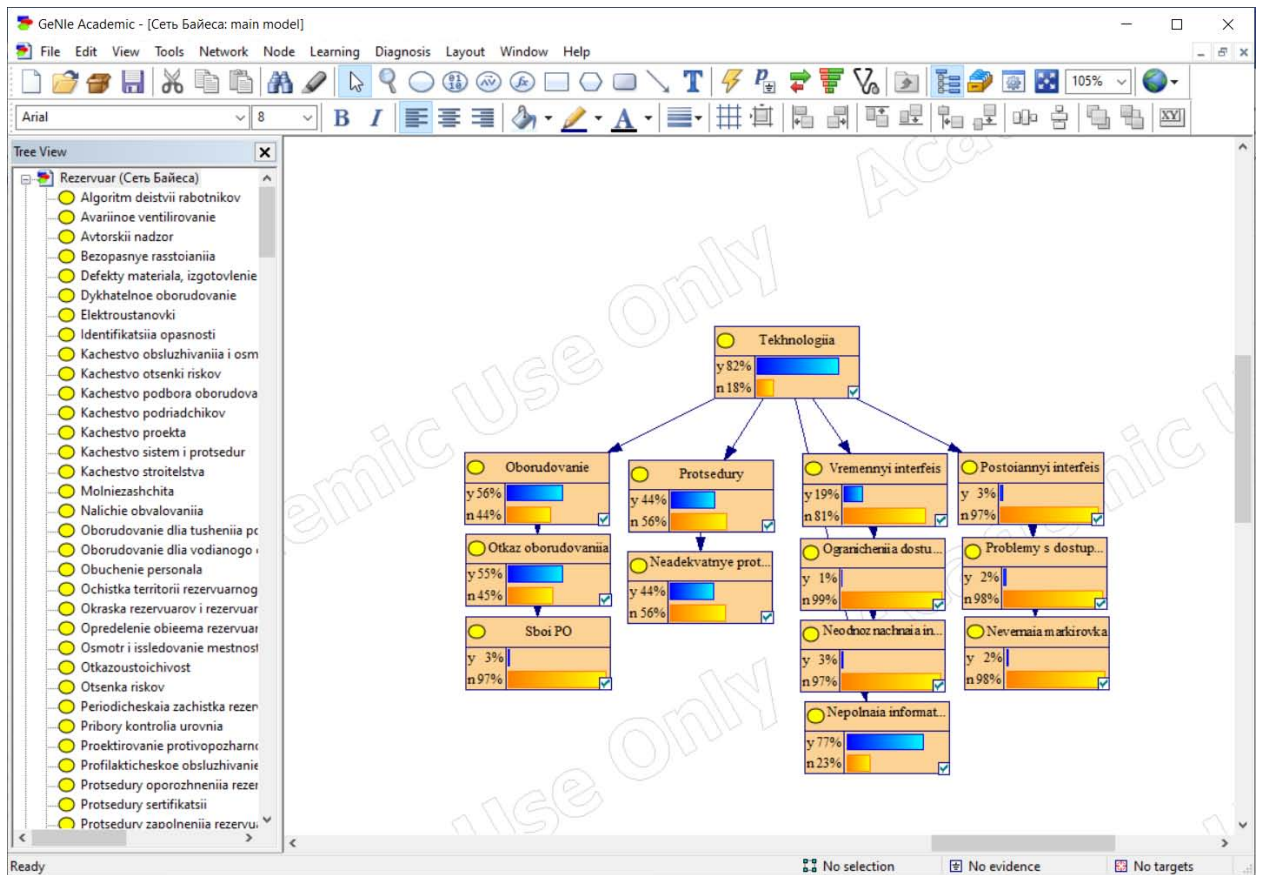


Рисунок 3.3.4.27 – Итоговый вид ветви «Tekhnologiya» («Технология»)

Общий вид модели ветви «Organizatsiya» («Организация») представлен на рисунке 3.3.4.28.

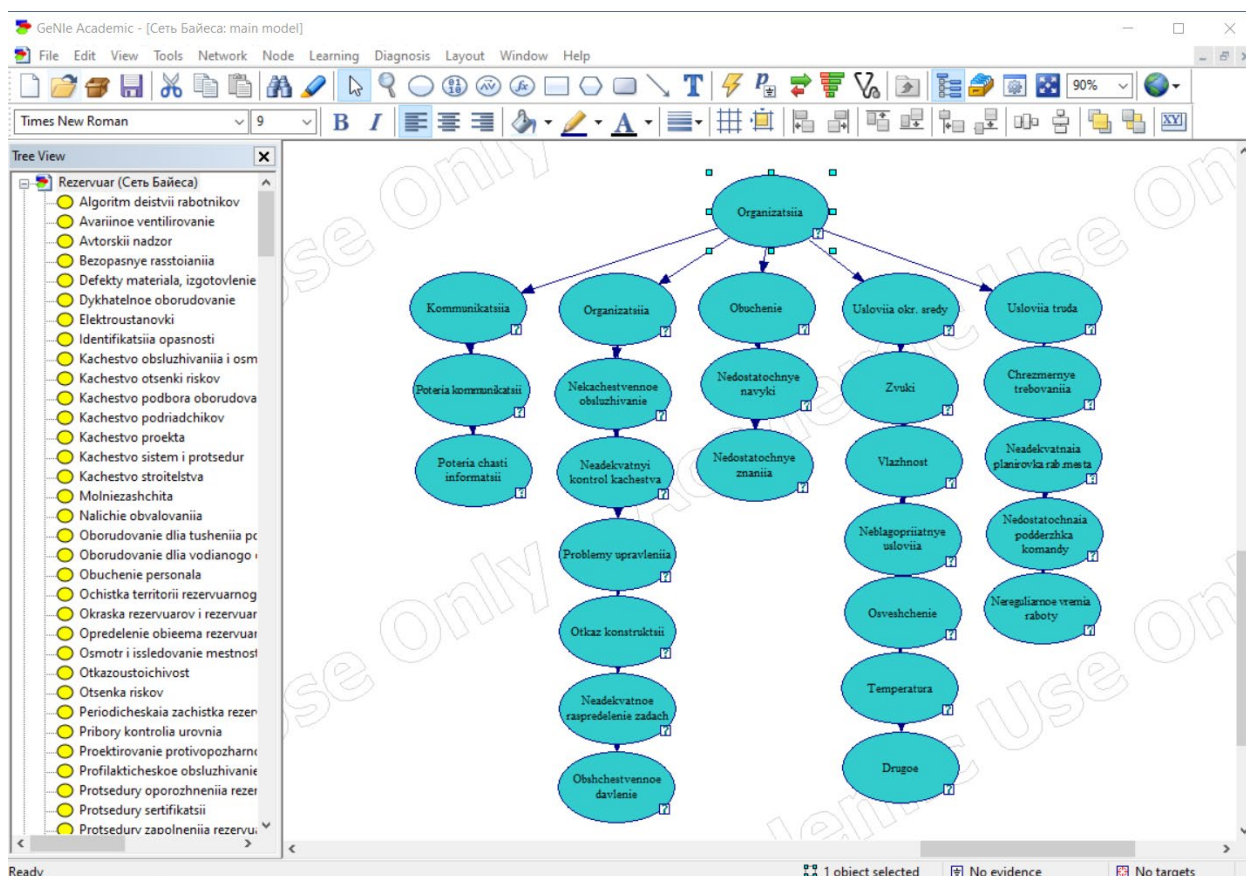


Рисунок 3.3.4.28 – Общий вид модели развития аварии по ветви «Organizatsiia» («Организация»)

Значения таблиц условной вероятности для узлов занесены в программу аналогично модели «Chelovek» («Человек»). Итоговый вид ветви «Organizatsiia» («Организация») представлен на рисунке 3.3.4.29.

Для дальнейшего моделирования три ветви причин человеческих ошибок «Chelovek», «Tekhnologiya» и «Organizatsiia» объединены в одном узле «Chelovecheskii faktor» («Человеческий фактор»). Объединение ветвей показано на рисунке 3.3.4.30.

8) Моделирование узла «Природно-климатические условия Севера»

Общий вид ветви «Khrupkoe razrushenie» («Хрупкое разрушение») представлен на рисунке 3.3.4.31.

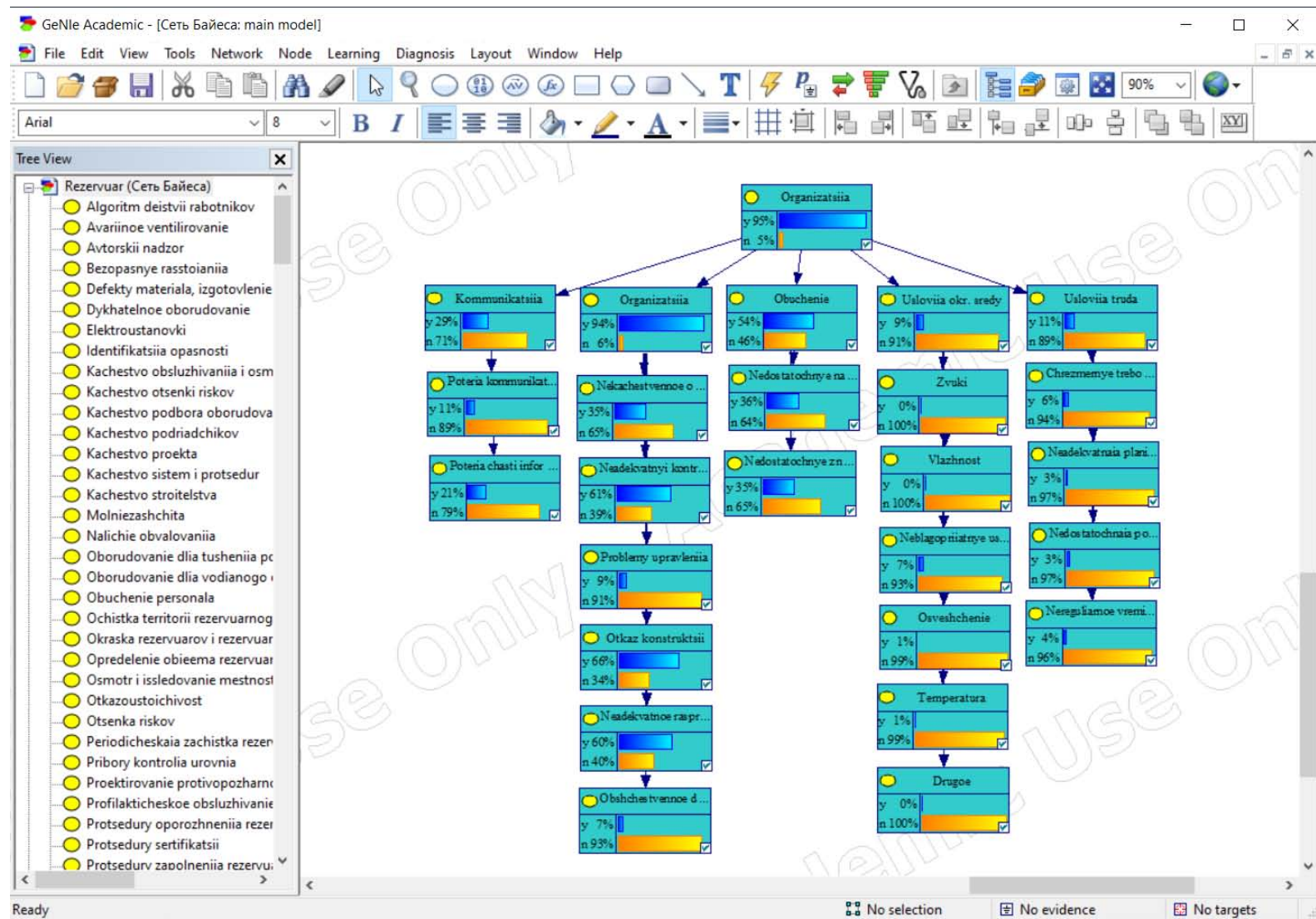


Рисунок 3.3.4.29 – Итоговый вид модели развития аварии по ветви «Organizatsiia» («Организация»)

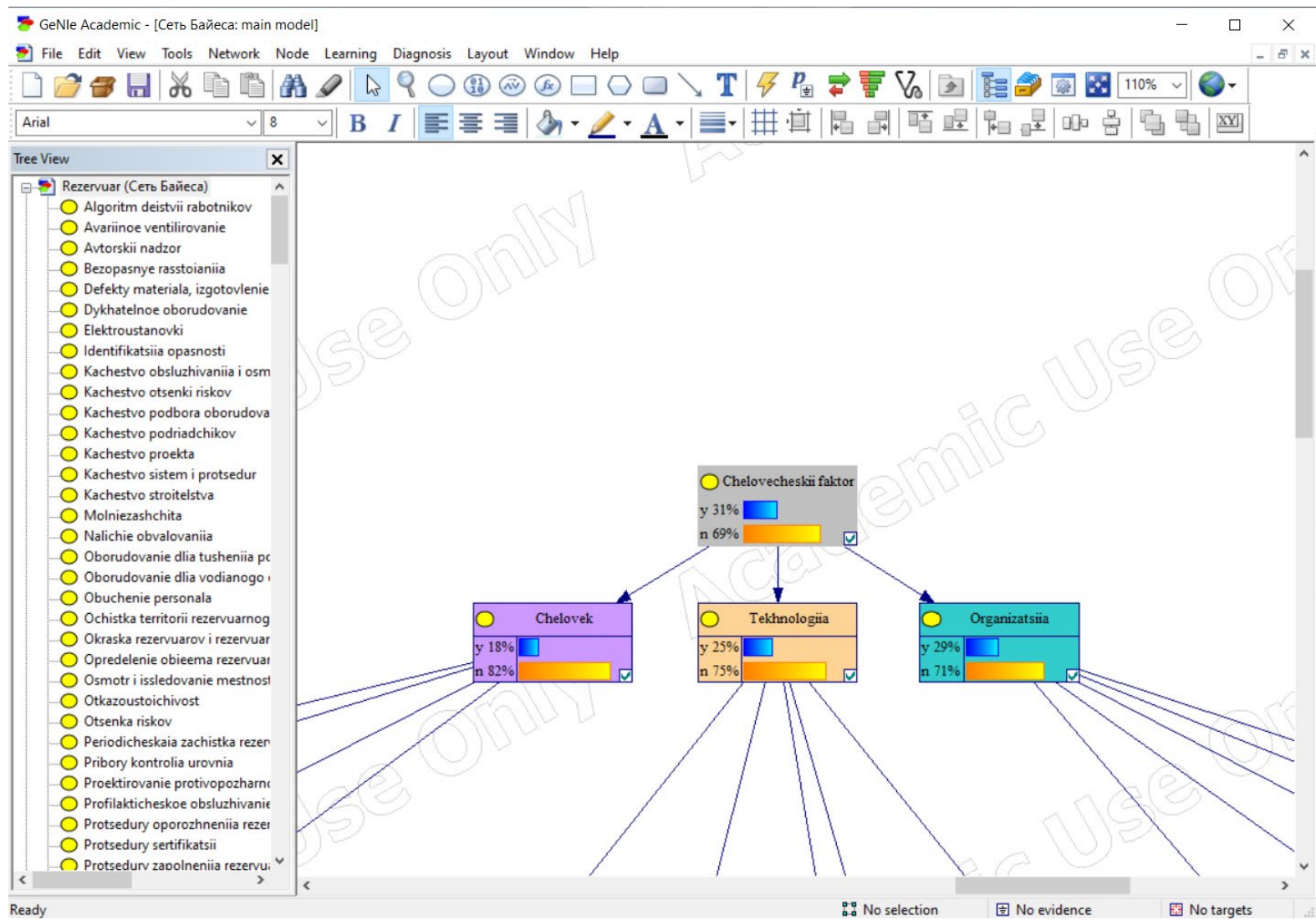


Рисунок 3.3.4.30 – Объединение групп причин человеческих ошибок в узле «Chelovecheskii faktor» («Человеческий фактор»)

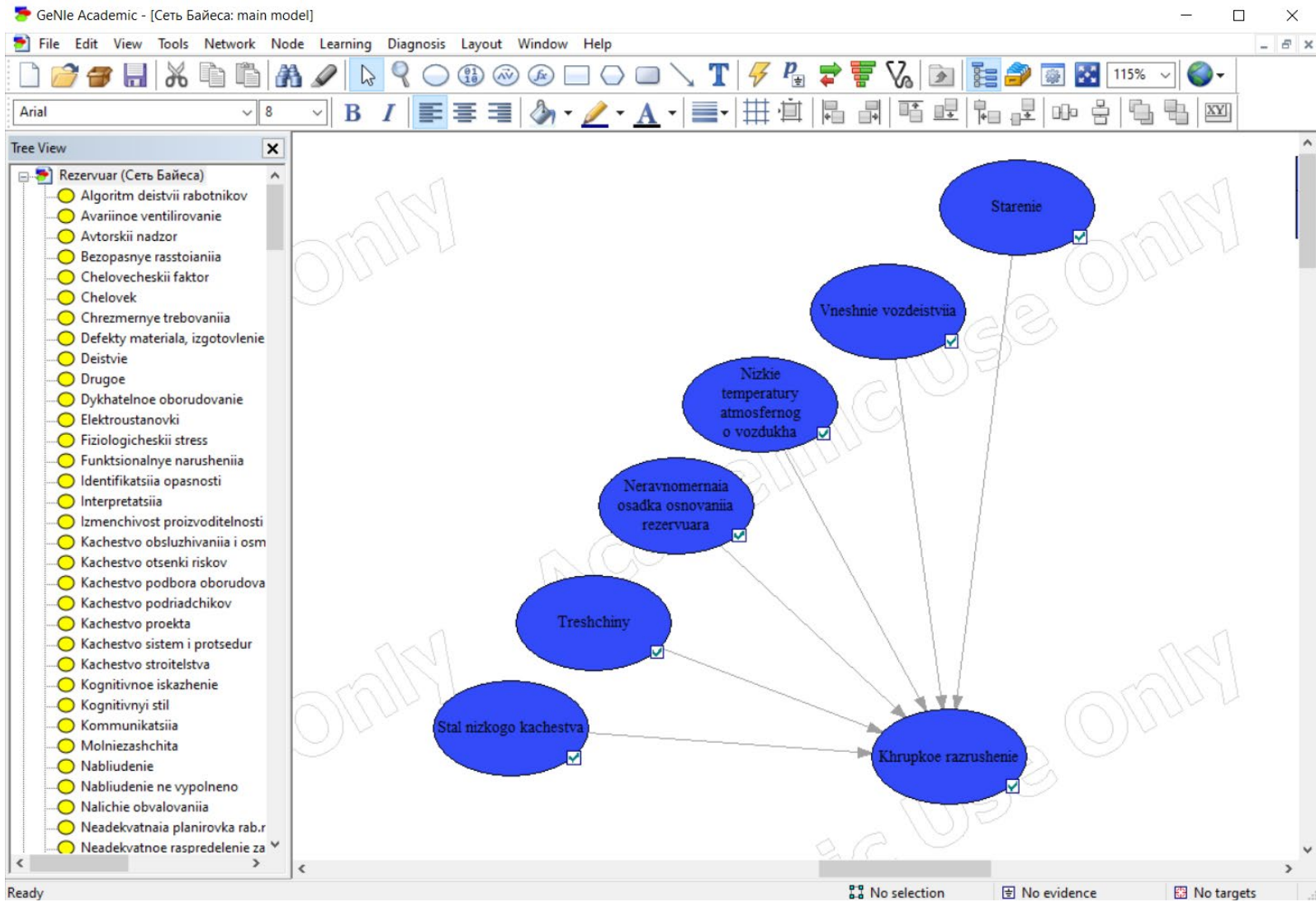


Рисунок 3.3.4.31 – Общий вид ветви «Khrupкое razrushenie» («Хрупкое разрушение»)

Таблицы вероятностей для узлов заполняются согласно исходным данным.

Для определения вероятности узла «Khрупкое razrushenie» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Так, при возникновении каждого из факторов вероятность того, что наступит хрупкое разрушение, равна 100 %.

Общий вид ветви «Vzryv pri minusovykh temperaturakh» («Взрыв при минусовых температурах») представлен на рисунке 3.3.4.32.

Таблицы вероятностей для пяти родительских узлов ветви «Vzryv pri minusovykh temperaturakh» заполняются в соответствии с исходными данными.

Для определения вероятности узла «Vzryv pri minusovykh temperaturakh» необходимо задать условные вероятности родительских причин, которые будут представлять собой уровень влияния каждой конкретной причины. Так, при возникновении каждого из факторов вероятность того, что наступит хрупкое разрушение, равна 100%.

Для дальнейшего моделирования две ветви «Khрупкое razrushenie» («Хрупкое разрушение») и «Vzryv pri minusovykh temperaturakh» («Взрыв при минусовых температурах»), представленные на рисунках рисунке 3.3.4.31 и рисунке 3.3.4.32, объединены в одном узле «Prirodno-klimaticheskie usloviya Severa» («Природно-климатические условия Севера»). Объединение ветвей показано на рисунке 3.3.4.33.

Значение вероятности возникновения узла «Prirodno-klimaticheskie usloviya Severa» («Природно-климатические условия Севера») принято равным 100 %.

Итоговый вид ветви «Природно-климатические условия Севера» приведен на рисунке 3.3.4.34.

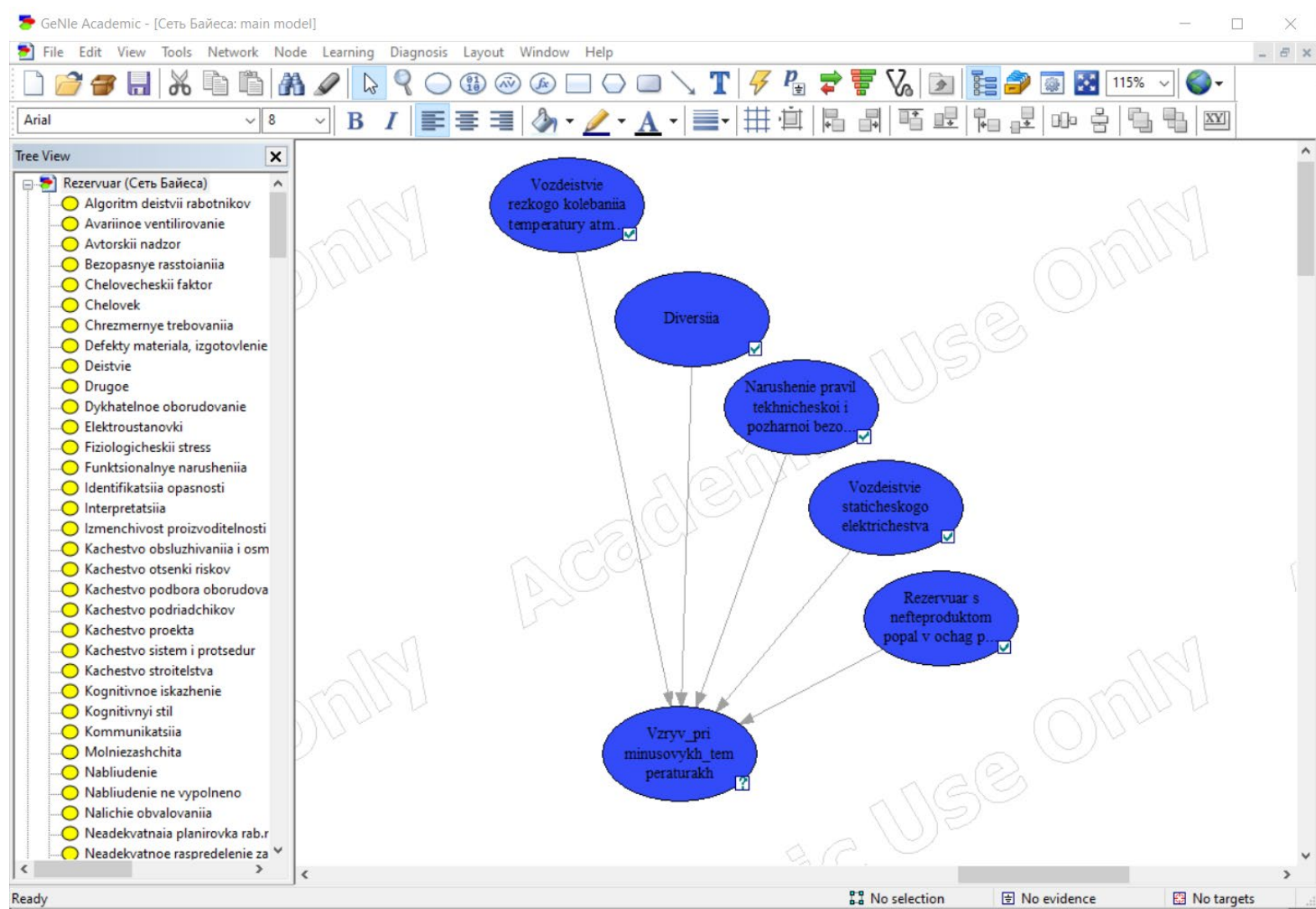


Рисунок 3.3.4.32 – Общий вид ветви «Vzryv pri minusovykh temperaturakh» («Взрыв при минусовых температурах»)

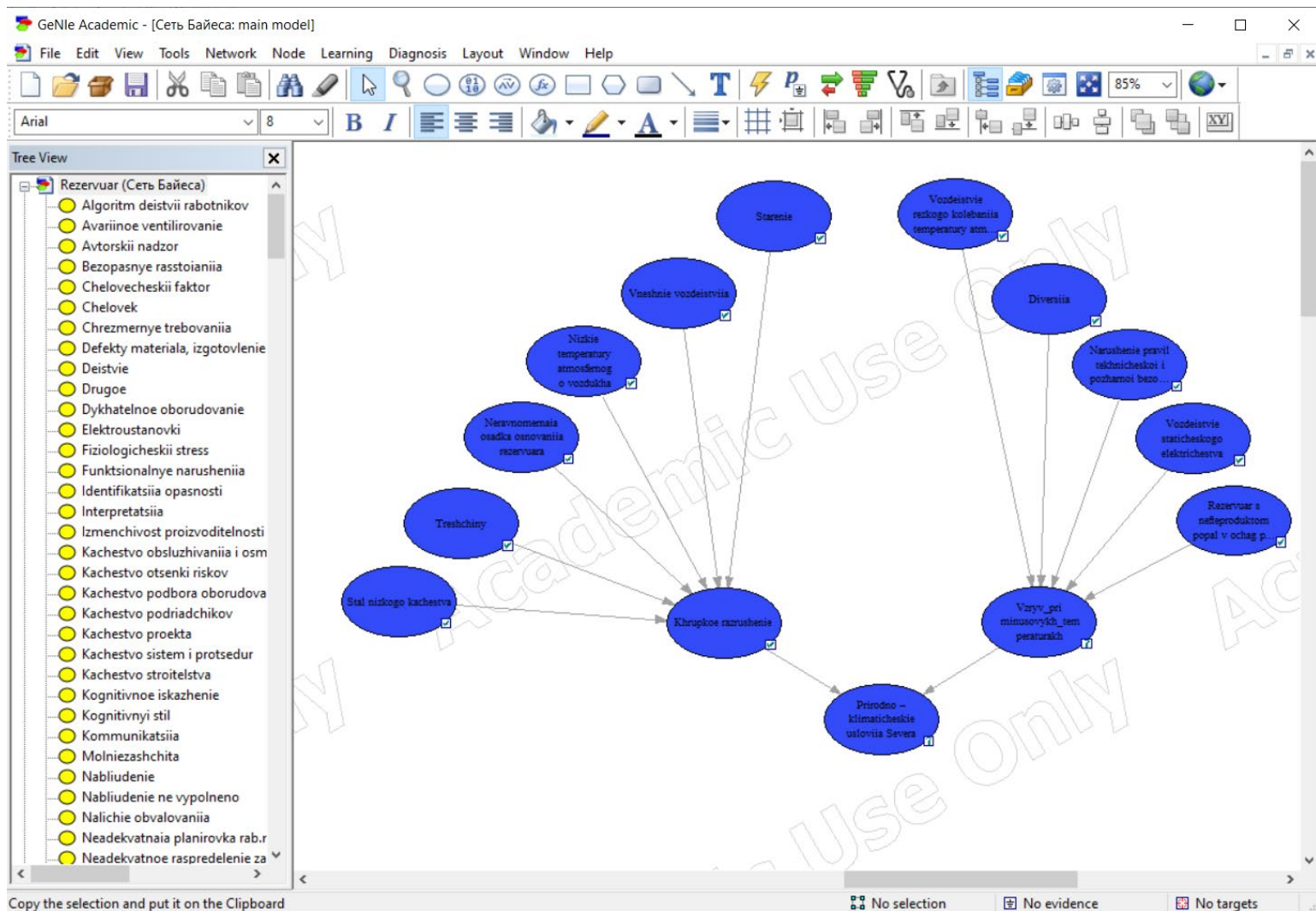


Рисунок 3.3.4.33 – Объединение групп причин человеческих ошибок в узле «Природно-климатические условия Севера» («Природно-климатические условия Севера»)

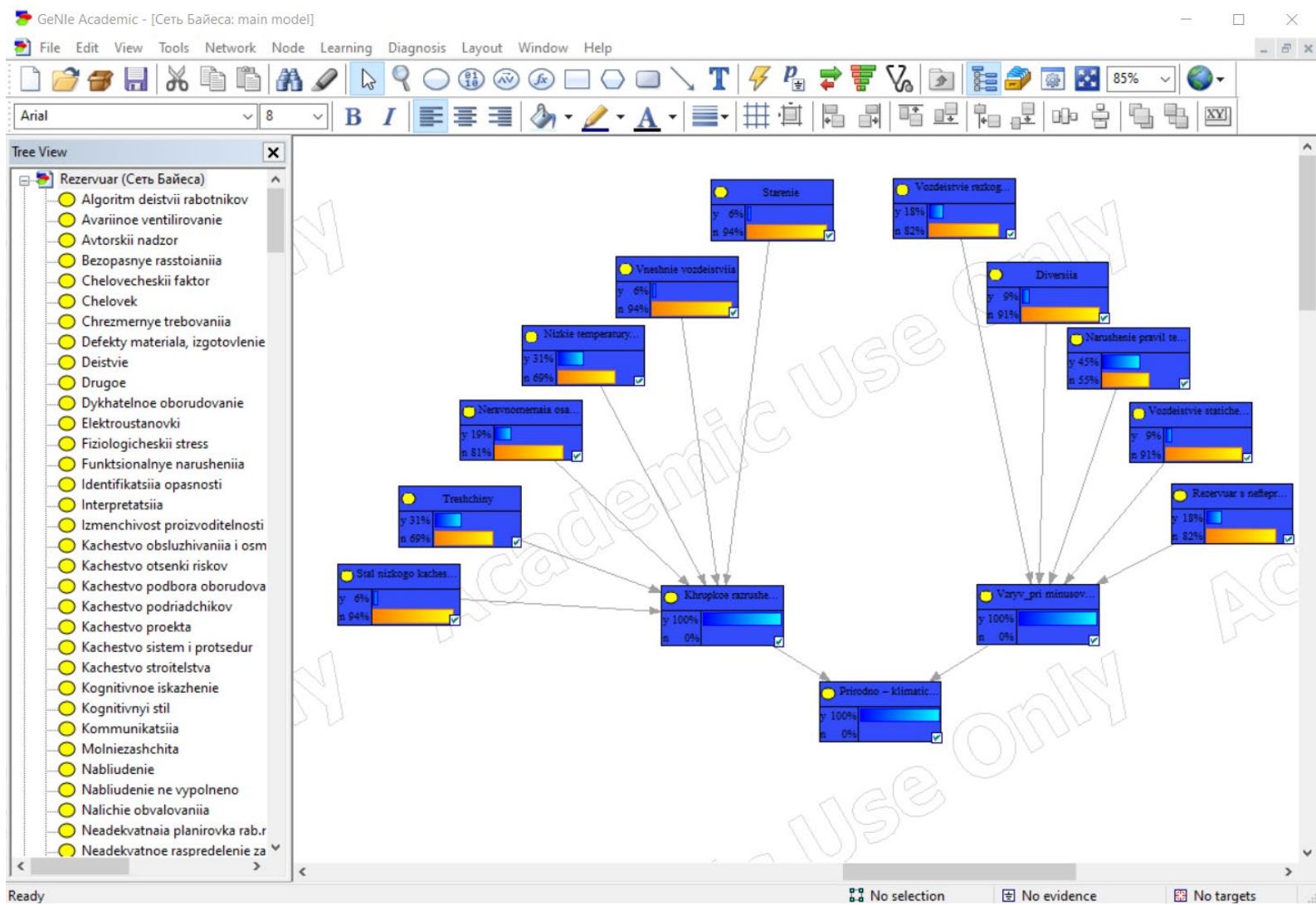


Рисунок 3.3.4.34 – Итоговый вид ветви «Природно-климатические условия Севера»

Завершающим этапом является структурное построение всей сети Байеса на рисунке 3.3.4.35 и блок-схема построения всей сети Байеса (для расчета) на рисунке 3.3.4.36. Все ветви смоделированы в разных цветах, что удобно для анализа.

В приложении А приведен рисунок А.26 – Структурное построение сети Байеса и рисунок А.27 – Блок-схема построения сети Байеса (для расчета).

На основании Байесовской сети разработана методика, представляющая собой алгоритм действий, которые необходимо выполнить для получения выходных данных (рисунок 3.3.4.37).

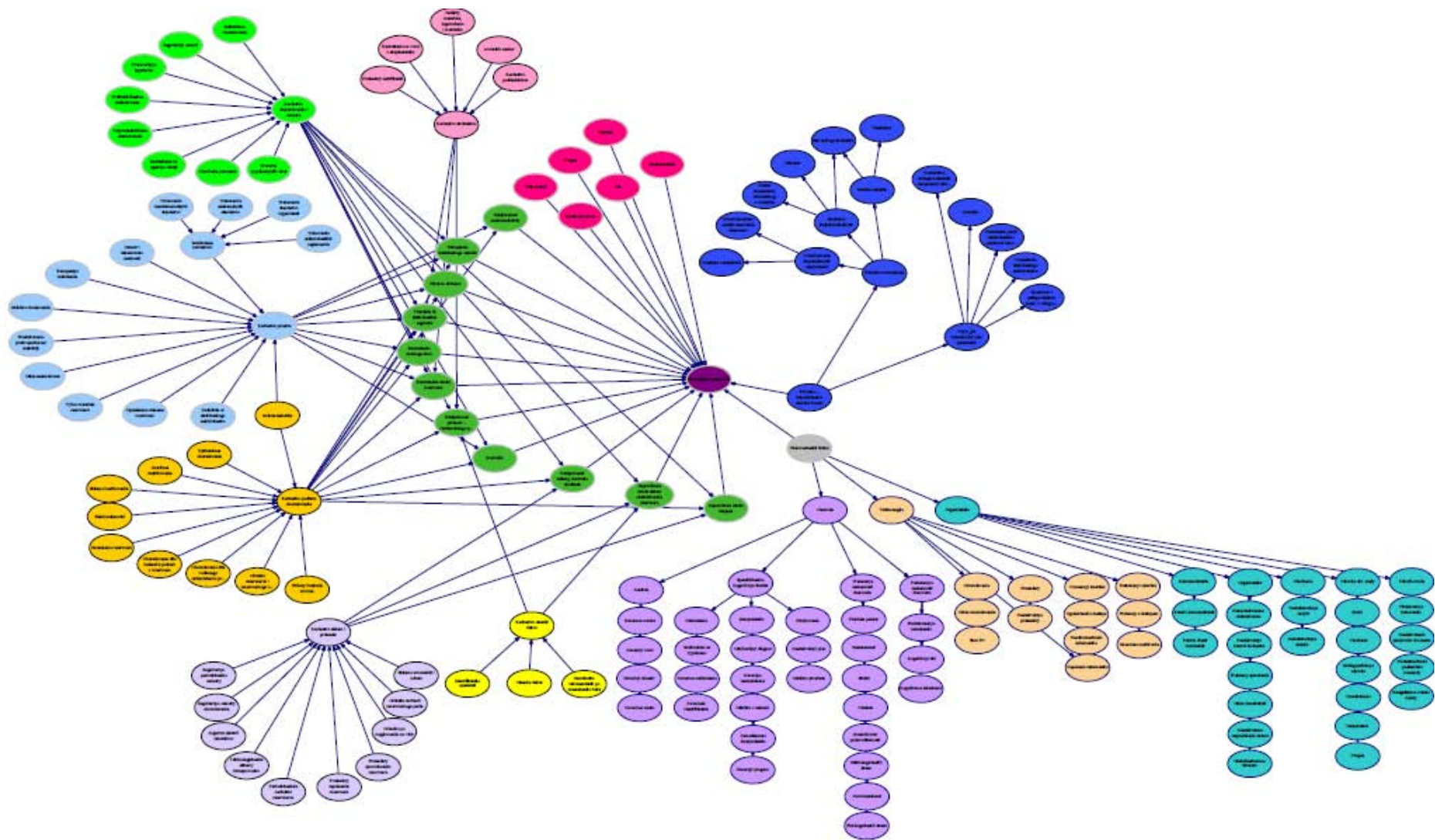


Рисунок 3.3.4.35 – Структурное построение всей сети Байеса

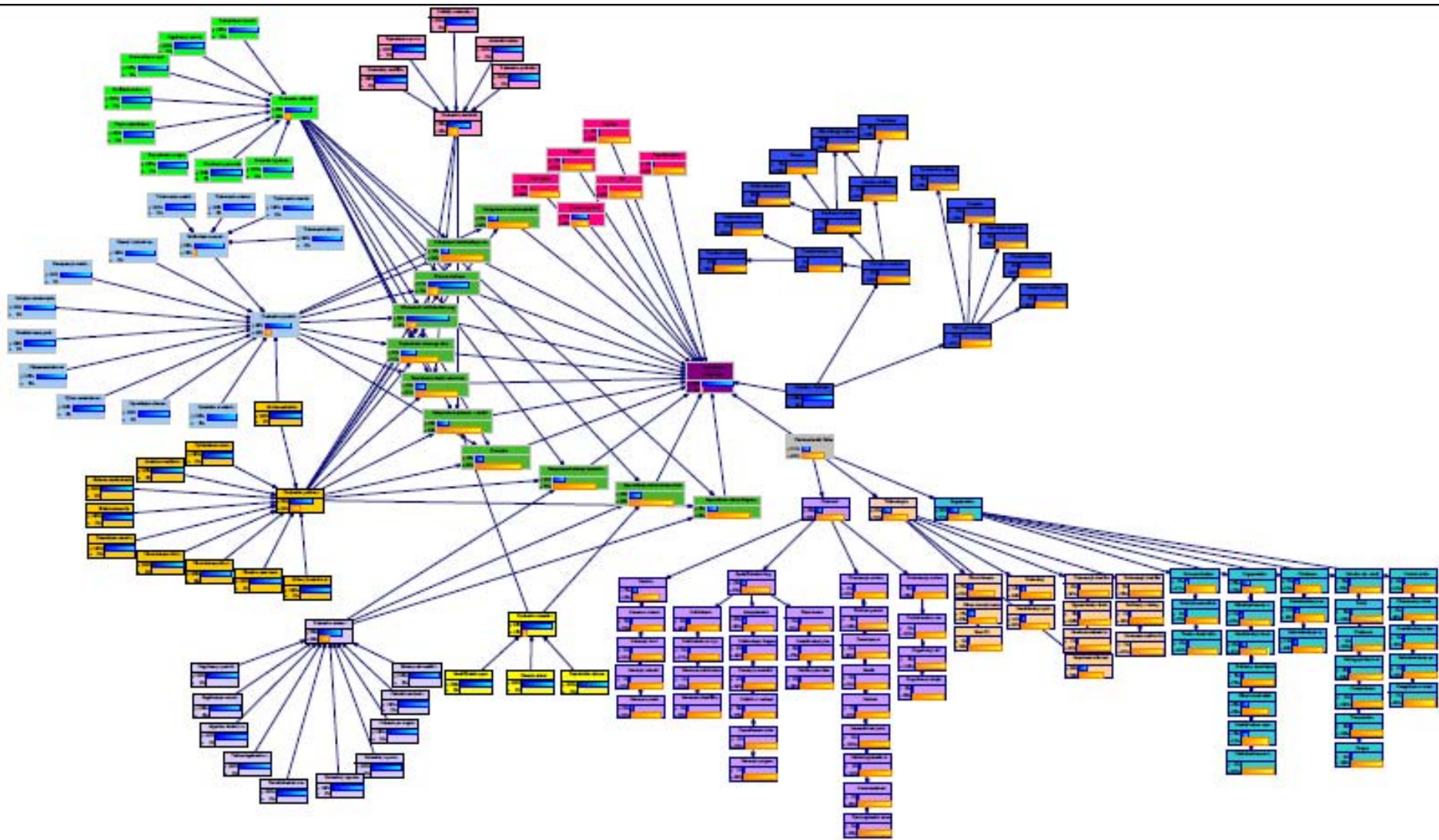


Рисунок 3.3.4.36 – Блок-схема построения всей сети Байеса (для расчета)

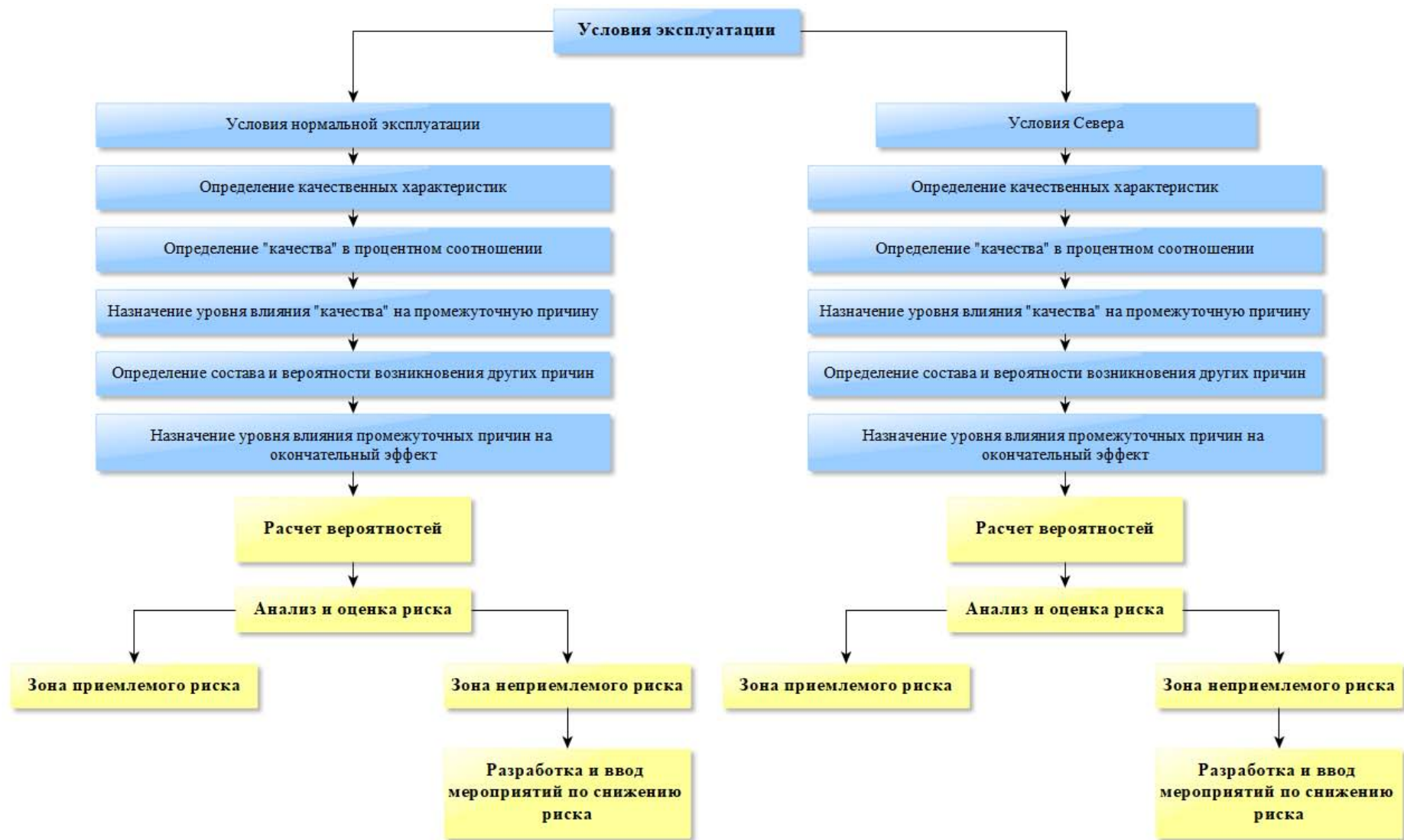


Рисунок 3.3.4.37 – Алгоритм сетевого моделирования

В приложении А приведены рисунки, содержащие:

- полное дерево байесовской сетевой модели (рисунок А.1),
- структурные построения моделей всех ветвей байесовской сети:
 - А.2 – Структурное построение ветви «Качество проекта»,
 - А.4 – Структурное построение ветви «Природно-климатические условия»,
 - А.6 – Структурное построение ветви «Качество обслуживания и осмотра»,
 - А.8 – Структурное построение ветви «Качество строительства»,
 - А.10 – Структурное построение ветви «Качество подбора оборудования»,
 - А.12 – Структурное построение ветви «Качество оценки рисков»,
 - А.14 – Структурное построение ветви «Качество систем и процедур»,
 - А.16 – Структурное построение ветви «Человеческий фактор» (крупным планом),
 - А.18 – Структурное построение ветви «Человеческий фактор»,
 - А.20 – Структурное построение ветви «Человек»,
 - А.22 – Структурное построение ветви «Технология»,
 - А.24 – Структурное построение ветви «Организация»,
- блок-схемы построения моделей всех ветвей байесовской сети:
 - А.3 – Блок-схема построения ветви «Качество проекта»,
 - А.5 – Блок-схема построения ветви «Природно-климатические условия»,
 - А.7 – Блок-схема построения ветви «Качество обслуживания и осмотра»,
 - А.9 – Блок-схема построения ветви «Качество строительства»,
 - А.11 – Блок-схема построения ветви «Качество подбора оборудования»,
 - А.13 – Блок-схема построения ветви «Качество оценки рисков»,
 - А.15 – Блок-схема построения ветви «Качество систем и процедур»,
 - А.17 – Блок-схема построения ветви «Человеческий фактор» (крупным планом),
 - А.19 – Блок-схема построения ветви «Человеческий фактор»,
 - А.21 – Блок-схема построения ветви «Человек»,
 - А.23 – Блок-схема построения ветви «Технология»,
 - А.25 – Блок-схема построения ветви «Организация»,
- блок-схему построения сети Байеса для расчета (рисунок А.27).

Это фактически шаблоны поэтапного моделирования для всех ветвей байесовской сети и в целом для всей сети, которые можно использовать на всех стадиях жизненного цикла объектов для оценки прогнозирования риска, корректировки частот при недостаточной защищенности объектов, разработки мероприятий, направленных на снижение риска.

Построенная сетевая модель, обладая достаточной полнотой базы факторов, влияющих на риск, позволяет использовать ее как шаблон для оценки риска на различных ПОО, КВО ТЭК.

Рассмотрим пример использования шаблона для моделирования конкретной ситуации. Известно, согласно приведенным в п. 3.3.2 данным, что при производстве резервуара, эксплуатируемого в условиях Севера, использовалась сталь низкого качества. Кроме того, известно, что в процессе эксплуатации возникли трещины. То есть для этих узлов задано значение вероятности, равное 100 %.

Ранее, когда модель не имела узлов с заданными значениями вероятностей, программа рассчитывала вероятность возникновения «Катастрофического разрушения резервуара», учитывая все возможные факторы. Узел имел вероятность, равную 26 % (рисунок 3.3.4.38). В смоделированной ситуации программа автоматически пересчитала вероятность, увеличив ее до 67 % (рисунок 3.3.4.39). Таким образом, можно утверждать, что при проектировании резервуара строго необходимо учитывать условия его эксплуатации, правильно подбирать марки стали с требуемым химическим составом и физическими свойствами.

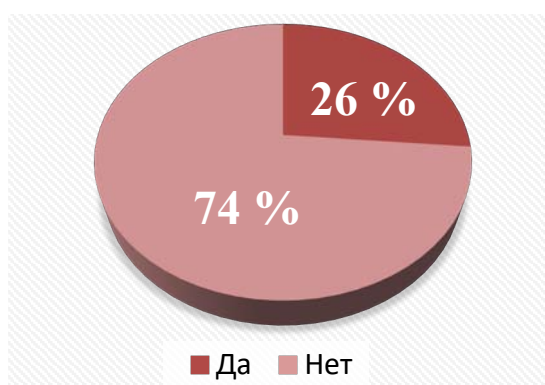


Рис. 3.3.4.38 – Исходные значения

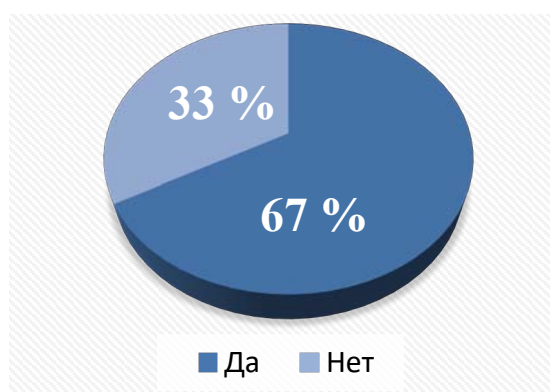


Рис. 3.3.4.39 – Результаты после моделирования

Представленная демонстрация только одного из примеров показывает, что построенная сеть Байеса (рисунок 3.3.4.40) является наглядной моделью, обеспечивающей простоту понимания и ясное графическое представление результатов. Разработанная сеть обладает функциями гибкости и позволяет быстрее и проще визуализировать сценарии «Что – Если» в сложных системах. Применение сети позволит поддерживать величину риска объекта в актуальном состоянии в визуально понятной форме и принимать меры по факторам, которые вносят существенный вклад в механизм отказа.

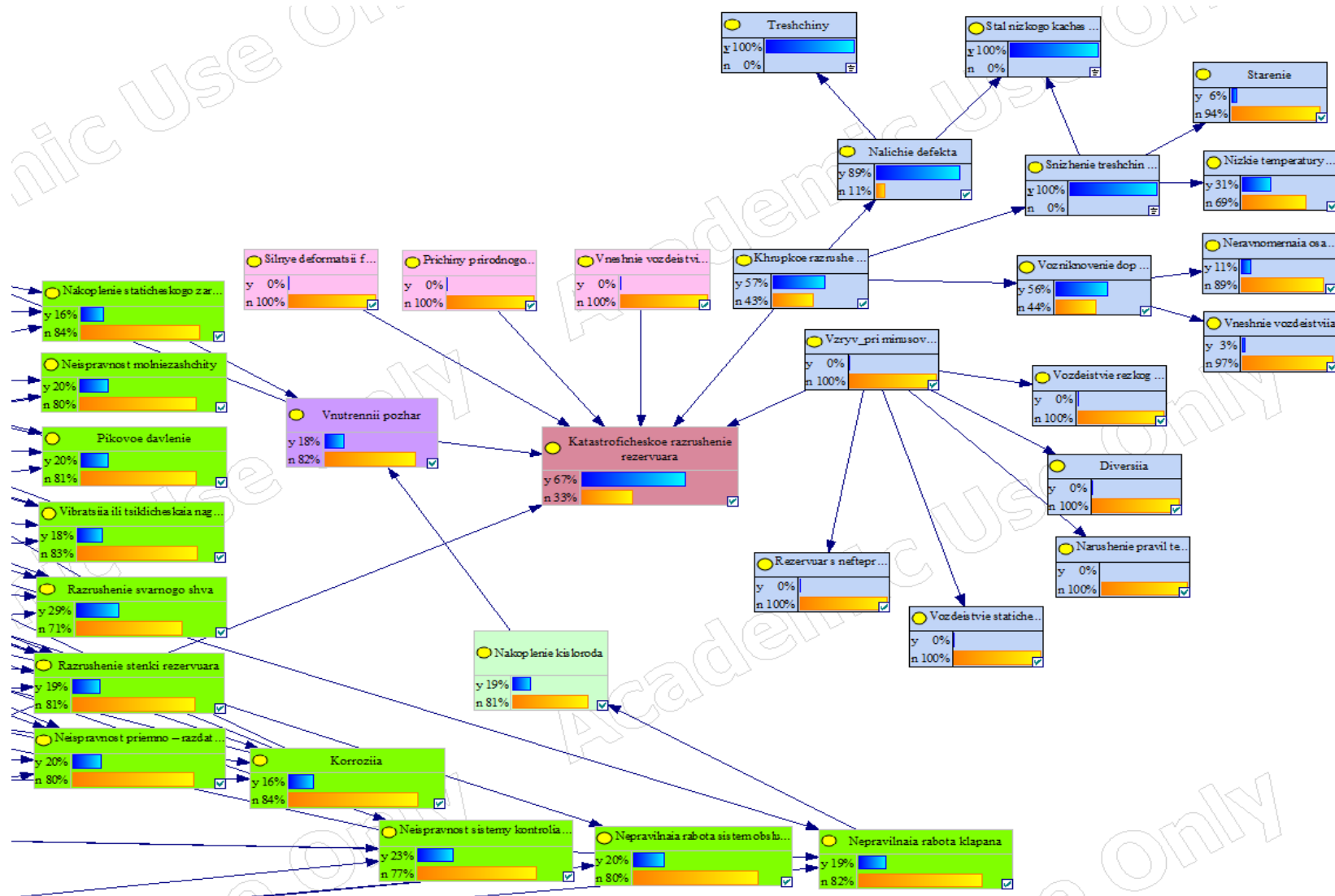


Рисунок 3.3.4.40 – Сетевая модель катастрофического разрушения резервуара

3.4 Заключение к разделу 3

Разработанная сеть Байеса включает максимально возможное число факторов, влияющих на риск эксплуатации, и может использоваться на любой стадии жизненного цикла объекта (ПОО, КВО).

Наиболее эффективным применением сетевого моделирования является его использование для объектов высокого уровня ответственности на стадии проектирования, входящих в него составляющих.

Сетевой подход будет полезным дополнением к традиционной оценке риска. В настоящее время отсутствует нормативно правовой методический документ для активного освоения, использования и внедрения сетевого прогнозирования в практику разработчиков, экспертов, руководителей КВО, ПОО.

Рассмотренные примеры для железнодорожного транспортирования пожаровзрывоопасных веществ, ПОО ТЭК, для которых построены сети с максимально полным перечнем случайных факторов, влияющих на риск их эксплуатации, могут быть шаблонами для построения сетей прогнозирования гипотетического риска и анализа уже произошедших аварий для подобных объектов, отправной точкой моделирования.

Базовая сеть позволяет вносить уточнения по новым частотам отказов, отключать и моделировать новые узлы, увеличивать/доставлять дерево факторов, влияющих на риск. Эта гибкость построения модели позволяет изучать эскалацию аварий (домино) и уже на этапе проектирования находить оптимально безопасный вариант строительства объекта.

В отличие от частотного подхода мы идем от сетей и обновляемых статистических данных по среднеотраслевым и реальным отказам к прогнозированию риска. Такой подход дает возможность ранжировать перечень самых чувствительных узлов и их сочетаний по отношению к целевому состоянию, что позволяет факторы, влияющие на риск, оценивать и визуализировать на сетевой модели в дифференцированной цветовой гамме по узлам и степени чувствительности, оперативно предусматривать мероприятия, направленные на снижение риска.

Практическая значимость исследования состоит в следующем:

- разработанная сеть Байеса может служить основой/шаблоном для оценки риска при проектировании или эксплуатации ПОО, КВО;
- сетевой анализ аварий, уже произошедших, дает важный опыт и возможность обучения персонала;
- модель может использоваться для разработки мероприятий по снижению риска;

– сеть Байеса обладает функциями гибкости и постоянного дополнения, что позволяет уточнять параметры каждого конкретного объекта и получать более точную оценку риска;

– сети Байеса наглядно представляют причинно-следственную связь исследуемого события. Вследствие этого лица, принимающие решения, могут использовать более достоверные результаты в процессе управления;

– метод сетей Байеса позволяет проводить процедуры, недоступные для традиционной оценки риска, и является надежным инструментом для оценки рисков с учетом неопределенности исходных данных;

– метод обеспечивает наглядное, простое и ясное графическое представление результатов;

– методика сетевого моделирования оценки риска безопасности эксплуатации ПОО, КВО может быть использована специалистами в области промышленной безопасности (ПБ) при разработке проектной документации на строительство, деклараций ПБ, при обосновании безопасности объектов, при разработке паспортов безопасности ПОО.

4 Разработка математических методов идентификации редких событий при расчете балансовой надежности ЭЭС

Аннотация. Рассматриваются процедуры моделирования редких событий, к числу которых относится дефицит мощности и энергии при анализе балансовой надежности электроэнергетических систем статистическими методами. Показано, что основным направлением здесь является использование итерационных методов формирования последовательности вложенных вероятностных подпространств, с их убывающей вероятностью.

Рассмотрены методические аспекты оценки оптимального резерва мощности в концентрированной электроэнергетической системе (ЭЭС). Определены источники погрешностей формулы Марковича. Показано, что основным требованием по применимости формулы Марковича является допущение об абсолютной надежности дополнительно вводимых резервных энергоагрегатов. Выполнен анализ математических процедур по определению вероятности и математического ожидания (МО) дефицита мощности (ДМ). Предложены формулы, позволяющие аналитически определить МО и дисперсию ДМ. Предложено график плановых ремонтов основного генерирующего оборудования представлять как детерминированную составляющую дополнительной нагрузки, что позволяет перейти от модели случайных процессов к случайным величинам. Показано, что между вероятностью и МО ДМ существует практически линейная функциональная связь, что позволяет оценивать показатели балансовой надежности исходя из интервальной вероятности ДМ.

Выполнено сравнение обсуждаемых процедур. Показано, что основным недостатком рассмотренных методов является их существенная зависимость от априорно задаваемых параметрических констант. Обозначены пути улучшения надежности сходимости итерационных процедур.

4.1 Введение

Задача определения оптимального резерва мощности (ОРМ) в ЭЭС известна со времен образования ЭЭС и трансформируется во времени, в основном, в направлении совершенствования вычислительных процедур и расширения спектра учитываемых свойств и факторов реально существующих ЭЭС [1–8].

Значимой вехой является решение этой задачи И.М. Марковичем [1], представляемое в виде критерия

$$\mathcal{F}_{def,T}(R_{opt}) = \frac{c}{T \cdot y_0}, \quad (4.1)$$

который формулируется следующим образом: оптимальный резерв мощности R_{opt} должен быть таким, чтобы соответствующая ему интервальная (на интервале времени T , например, год) вероятность дефицита мощности (ДМ) $\mathcal{F}_{def,T}(R_{opt})$ обеспечивала равенство (4.1), где c , y_0 – константы, отражающие затраты (c) на создание и содержание резерва R и удельный ущерб (y_0) от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Представленная формула является решением оптимизационной задачи:

$$\mathcal{Z}(R) = cR + y_0 T m_{def,T}(R) \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

где

$m_{def,T}(R)$ – МО на интервале T дефицита мощности, зависящего от резерва мощности $R = G_{уст} - L_{max}$, определенного при заданной максимальной мощности нагрузки L_{max} ;

$G_{уст}$ – величина суммарной (с учетом R) установленной генерирующей мощности.

Решение (результатирующая суммарная установленная мощность ЭЭС) оптимизационной задачи (4.2) не изменится, если в качестве варьируемой переменной принять $G_{уст}$:

$$\mathcal{Z}(G_{уст,opt}) = cG_{уст} + y_0 T m_{def,T}(G_{уст}) \rightarrow \min. \quad (4.3)$$

В представленной постановке задачи константы c , y_0 , как и $G_{уст}$ рассматриваются как некоторые обобщённые величины, не зависящие от вида установленного генерирующего оборудования. Отсюда решение задачи (4.3) носит обобщенный оценочный характер.

Чаще всего задача выбора оптимального резерва мощности рассматривается при оценке вариантов развития ЭЭС, где с целью повышения надежности электроснабжения потребителей определяется оптимальное число n_{new} дополнительно (к существующей системе генерации $G_{уст,0}$) устанавливаемых энергоблоков заданного типа с единичной мощностью $G_{a,new}$. При этом варьируемая переменная n_{new} является дискретной

величиной a оптимизационная задача (4.2) трансформируется к виду задач дискретного программирования:

$$Z(n_{new}) = c_{new}n_{new} + y_0 T m_{def,T}(G_{уст,0} + G_{a,new}n_{new}) \rightarrow \min. \quad (4.4)$$

Частично отображающая удельные капиталовложения константа c_{new} здесь привязывается к конкретному типу энергетического оборудования, что больше соответствует практической направленности задачи. Расчетная процедура усложняется за счет перехода в многомерное пространство (векторы \mathbf{c}_{new} , \mathbf{n}_{new}), но не меняется по существу, если рассматривается ввод в эксплуатацию некоторой комбинации энергоагрегатов:

$$Z(\mathbf{n}_{new}) = \mathbf{c}_{new}^T \mathbf{n}_{new} + y_0 T m_{def,T}(G_{уст,0} + \mathbf{G}_{a,new}^T \mathbf{n}_{new}) \rightarrow \min. \quad (4.5)$$

Представленное в (4.2) и определенное на интервале T МО недоотпуска электроэнергии $\Delta \mathcal{E} = T m_{def}(G_{уст})$ является аддитивной функцией времени. При дискретности интервала T (например, в виде множества часовых, подынтервалов)

$$\Delta \mathcal{E} = \sum_{t \in T} \Delta \mathcal{E}_t = \sum_{t \in T} \tau_t m_{def,t}(L_t, G_{вкл,t}),$$

где

τ_t – длительность подынтервала t ;

$G_{вкл,t} = G_{уст,t} - G_{ав,t} - G_{пл,t}$ – мощность генерирующих устройств, находящихся в состоянии готовности генерации энергии.

Компоненты целевой функции – нагрузка и генерация являются величинами, имеющих случайный характер, вызванный, в основном, суточной и сезонной неравномерностью электропотребления $\Delta L = L_{max} - L(t)$, ошибкой прогноза и случайным характером нагрузки δL , а также аварийно ($G_{ав}$) и планоно ($G_{пл}$) отключенной генерацией $G_{откл} = G_{ав} + G_{пл}$. При этом функция дефицитности (ФД) в произвольный момент времени:

$$\psi = L - G = (L_{max} - \Delta L + \delta L) - (G_{уст} - G_{ав} - G_{пл}) = G_{ав} + G_{пл} + \delta L - \Delta L - R.$$

ДМ наступает тогда, когда случайная составляющая ФД больше установленного резерва мощности R :

$$\varphi = G_{ав} + G_{пл} + \delta L - \Delta L > R. \quad (4.6)$$

ФД, являясь случайной величиной, характеризуется своей функцией распределения $F_\varphi(x)$ с параметрами: m_φ , σ_φ . При этом МО дефицита мощности [1, 8]:

$$m_{def} = \int_R^\infty (x - R)f_\varphi(x)dx.$$

Интегрирование по частям позволяет получить иное представление МО ДМ:

$$m_{def} = \int_R^\infty \mathcal{F}_\varphi(x)dx.$$

При этом выражение (4.2) трансформируется к виду

$$Z(R) = cR + y_0T \int_R^\infty \mathcal{F}_\varphi(x)dx \rightarrow \min. \quad (4.7)$$

Формальное дифференцирование (4.4) по параметру R и приравнение производной к нулю приводит к критерию Марковича (4.1) при условии независимости подынтегрального выражения от R . Действительно, в общем виде производная интеграла по параметру имеет вид

$$\frac{d}{d\alpha} \int_{\chi(\alpha)}^{\psi(\alpha)} f(x, \alpha)dx = f(\psi(\alpha), \alpha)\psi'(\alpha) - f(\chi(\alpha), \alpha)\chi'(\alpha) + \int_{\chi(\alpha)}^{\psi(\alpha)} f'_\alpha(x, \alpha)dx. \quad (4.8)$$

В нашем случае

$$\frac{d}{dR} \int_R^\infty \mathcal{F}_\varphi(R, x) dx = -\mathcal{F}_\varphi(R) + \int_R^\infty \left(\frac{d}{dR} \mathcal{F}_\varphi(R, x) \right) dx. \quad (4.9)$$

В результате критерий Марковича справедлив только при условии

$$\frac{d}{dR} \mathcal{F}_\varphi(R, x) = 0,$$

то есть при независимости подынтегральной функции от R : $\mathcal{F}_\varphi(R, x) \equiv \mathcal{F}_\varphi(x)$.

Проверочные оптимизационные расчеты, выполненные согласно (4.3), при условии абсолютной надежности дополнительных генерирующих устройств показали абсолютную тождественность критерия (4.1). Однако, при оценке показателей балансовой надежности (ПБН) ЭЭС все исправные, готовые к эксплуатации энергоагрегаты рассматриваются как готовые мгновенно компенсировать небалансы мощности в ЭЭС. Это относится и к дополнительно устанавливаемым для обеспечения резерва мощности и энергии энергоагрегатам, то есть они также подвержены отказам и плановым ремонтам, как и все остальные. Отсюда составляющие $G_{ав}$ и $G_{пл}$ случайной величины φ (4.6) непосредственно зависят от величины резерва R . При этом оптимальное решение (4.3) в общем случае не соответствует критерию (4.1).

Погрешность решения в основном зависит от вида функции распределения $\mathcal{F}_\varphi(x)$. Представление системы генерации в виде полной свертки биномиальных распределений обеспечивает достаточно точное соблюдение критерия, в то время как при аппроксимации $\mathcal{F}_\varphi(x)$ нормальным распределением погрешность критерия (несогласованность левой и правой части (4.1)) может достигать недопустимо большую величину [9]. Дополнительно следует отметить не учитываемую в целевой функции большую неопределенность параметров s, y_0 [10–13]. Отсюда критерий (4.1) в практических расчетах может рассматриваться только как оценка надежности ЭЭС при определении необходимого резерва мощности и не может служить основанием для отказа от оптимизационной процедуры (4.3). Данный вывод распространяется и на интервальную вероятность $\mathcal{F}_{def,T}(R_{опт})$, которую часто предлагается использовать в качестве норматива надежности [14].

Наличие дисперсионной составляющей в формуле определения МО ДМ (4.9) предопределяет необходимость более детального рассмотрения влияния системы допущений и ограничений на результирующий оптимальный резерв мощности.

Основным математическим аппаратом определения МО и дефицита мощности в ЭЭС является метод Монте-Карло (ММК) [9, 14–16]. Это объясняется возможностями метода моделировать трудно формализуемые вероятностные свойства элементов и подсистем ЭЭС. Однако известен основной недостаток ММК – недопустимо большие (необходимые для получения требуемой точности решения) затраты компьютерного

времени, в частности, при использовании ММК в качестве вложенной процедуры при вариантных расчетах, как это имеет место в задаче оценки вариантов развития ЭЭС. При оценке МО и дефицита мощности число обращений к процедуре статистического моделирования ММК определяется числом интервалов времени неизменности вероятностных параметров генерации и нагрузки (8760 ч при годовом расчетном периоде [14, п. 7.2]). Отсюда актуальной представляется замена ММК при определенных допущениях приемлемыми аналитическими процедурами.

4.2 Непрерывная случайная нагрузка и детерминированная генерация

Пусть $x \in \mathbb{R}^m$ – случайный вектор, который объединяет все вероятностные входные переменные L_i, G_i и др. В простейшем случае, когда учитываются только располагаемая генерация и нагрузка и не учитываются случайные состояния элементов системы, температуры окружающей среды и др., $x = \{L_i, G_i, i = 1, \dots, n\}$, где i – номер узла электрической сети. С целью концентрации внимания на механизмах идентификации редких событий, связанных с отказами функционирования ЭЭС множество случайных, вероятностно определенных величин в данной работе ограничено только нагрузкой и располагаемой генерацией.

Определение МО недоотпуска электроэнергии $\Delta \mathcal{E} = T m_{def,T}(G_{уст})$ является не только самостоятельной задачей при оценке показателей балансовой надежности (БН) ЭЭС, но и подзадачей в ряде оптимизационных или статистических процедур, например, при определении: оптимального резерва мощности в ЭЭС; оптимального плана ремонтов основного оборудования; оптимального распределения ДМ и др. С целью сокращения числа повторяющихся расчетов в качестве подынтервалов дискретности T целесообразно рассматривать интервалы неизменного состава генерирующих агрегатов и неизменных параметров нагрузки (m_L, σ_L) . На таких укрупненных интервалах МО дефицита мощности неизменно, $m_{def,t}(L_t, G_{вкл,t}) = idem$.

Неизменность состава генерирующих агрегатов $G_{вкл,t} = const$ наблюдается, например, при условии, что вывод в плановый ремонт энергоблоков осуществляется детерминировано в определенное время, например, в начале суток. Отсюда можно считать, что при условии детерминированности G на таком подынтервале случайной является только нагрузка, как правило, имеющая нормальное (Гауссовское) распределение, $L_t \sim N(m_{L,t}, \sigma_{L,t})$. При этом вероятность дефицита мощности

$$\mathcal{P}_{def} = \mathcal{P}(L > G) = \mathcal{F}_L(G) = 1 - F_L(G).$$

МО дефицита мощности

$$m_{def} = \int_G^{\infty} (x - G)dF_L(x) = \int_G^{\infty} x dF_L(x) - G\mathcal{F}_L(G).$$

В свою очередь, согласно [17], для нормально распределенной нагрузки

$$\int_G^{\infty} x dF_L(x) = m_L \mathcal{F}_L(G) + \sigma_L^2 f_L(G).$$

В результате

$$m_{def} = (m_L - G)\mathcal{F}_L(G) + \sigma_L^2 f_L(G). \quad (4.10)$$

Данная формула может быть использована как основная при аналитических расчетах МО дефицита мощности. Как правило, $m_L - G \ll 0$. Отсюда может сложиться впечатление, что согласно (4.10) МО дефицита примет отрицательное значение. Однако положительная дисперсионная составляющая делает $m_{def} > 0$. Это определяет значимость дисперсионной составляющей нагрузки.

Аналогичными математическими преобразованиями можно получить дисперсию ДМ:

$$D_{def} = G^2 F(G) - m_{def}^2 + (m_L^2 + \sigma_L^2) \bar{F}_L(G) + \sigma_L^2 [(m_L + G)f_L(G)].$$

Графики нагрузок. Являющаяся функцией времени нагрузка $L(t)$ представляет случайный процесс [3, 6–8, 12, 18, 19], где присутствуют суточные (ΔL_d), недельные (ΔL_w), сезонные (месячные, ΔL_m) периодические циклы отклонения ΔL нагрузки от максимальной на рассматриваемом периоде T мощности L_{max} . В практических расчетах принимается допущение, что данные отклонения являются детерминированными и пропорциональными L_{max} . При этом зависящие от времени графики нагрузки представляются в относительных (отнесенных к L_{max}) единицах. В частности, годовой график нагрузки может быть представлен 52-недельными максимумами; недельный – 7-суточными максимумами; суточный – 24-часовыми нагрузками:

$$\Gamma^Y = \{k_w^Y = L_w^{max}/L_{Y,max}, w = 1, \dots, 52\};$$

$$\Gamma^w = \{k_d^w = L_{w,d}^{max}/L_w^{max}, d = 1, \dots, 7\};$$

$$\Gamma^{wd} = \{k_h^{wd} = L_{w,d,h}/L_{w,d}^{max}, d = 1, \dots, 24\};$$

$$L_{max} = \max_{\forall w}(L_w^{max}); \quad L_w^{max} = \max_{\forall d}(L_{w,d}^{max}); \quad L_{w,d}^{max} = \max_{\forall h}(L_{w,d,h}).$$

При этом результирующий годовой (почасовой) график нагрузки ($52 \cdot 7 \cdot 24$ ч), МВт представляется коэффициентами нагрузки $\{k_t\}$:

$$L = \{L_t = k_t L_{max}, t = 1, \dots, T\} = L_{max} \cup_{w=1}^{52} \cup_{d=1}^7 \cup_{h=1}^{24} (\Gamma^Y \Gamma^w \Gamma^{wd}). \quad (4.11)$$

Однако реально представленный принцип пропорциональности не соблюдается для СКО часовой нагрузки ($\sigma_{L_t} = k_t \sigma_{L_{max}}$). Дело в том, что изменение нагрузки ЭЭС определяется не тем, что все электроприемники пропорционально снижают свою мощность, а тем, что происходит отключение части электроприемников. В результате неравномерности отключаемой номинальной мощности электроприемников относительный разброс по номинальной мощности включенных электроприемников становится не меньше, а, как правило, больше. По существу, это требует индивидуального задания СКО нагрузки $\{\sigma_{L_t}\}$ для каждого момента(или интервала неизменности статистических параметров) времени.

Другим фактором, требующим дополнительного обоснования применимости принципа пропорциональности СКО является природа погрешности δL , определяющей СКО $\sigma_{L_{max}}$ годового максимума нагрузки. Основной причиной погрешности δL , как правило, является метеорологический фактор (например, отклонение среднегодовой температуры [14, П. 7.9.4]), который распространяется на все периоды года. Отсюда условно можно считать, что СКО нагрузки остается неизменным в течение всего расчетного периода, а на каждом интервале постоянства нагрузки и состава генерации нагрузка описывается нормальным Гауссовским распределением с параметрами $m_{L_t} = k_t m_{L_{max}}; \sigma_{L_t} = \sigma_{L_{max}}$.

График плановых ремонтов. Имеющая детерминированный характер плановая составляющая отключенной мощности $G_{пл}(t)$ является одним из основных факторов,

заставляющих рассматривать случайное изменение нагрузки и генерации как зависимый случайный процесс [3, 6–8, 12, 18, 19], поскольку, во-первых, выведенный в ремонт энергоблок не может быть введен в эксплуатацию до окончания ремонтных работ, то есть определяет состав генерирующей системы на последующий период τ_k , а во-вторых, $G_{пл}(t)$ определяется в зависимости от графика нагрузки (ремонтные работы планируются на период минимальных нагрузок). Хронологическая зависимость плановых ремонтов генерирующих агрегатов от годового графика нагрузки определяет зависимость от времени доступной генерации: $G_{вкл}(t) = G_{уст} - G_{пл}(t)$. Отсюда вероятность ДМ $\mathcal{F}_{def}(R_{опт})$ в (4.1) должна быть определена на множестве случайных процессов, результатом чего является приоритет статистического моделирования по отношению к аналитическим методам. Следует заметить, что стандарт «Методические указания по проведению расчетов балансовой надежности» [14, п. 7.1] предусматривает применение нехронологического метода математического моделирования, что позволяет оперировать со случайными величинами, а не со случайными процессами. Данное требование определяет необходимость адаптации математической модели при переходе от случайных процессов к случайным величинам.

Переход к случайным величинам возможен, если функция распределения $F(x, m, \sigma)$ обладает свойством $F(x + z, m, \sigma) = F(x, m + z, \sigma)$ (а присущее нагрузке нормальное распределение таким свойством обладает). С этой целью мощность $G_{пл}(t)$ следует рассматривать как дополнительную детерминированную нагрузку, согласованную с основным графиком нагрузки. При этом расчетная (суммарная) нагрузка $\tilde{L}(t) = L(t) + G_{пл}(t)$ имеет МО $m_{\tilde{L}}(t) = m_L(t) + G_{пл}(t)$ и неизменное СКО $\sigma_{\tilde{L}}(t) = \sigma_L(t)$. Новая случайная величина учитывает функциональную связь двух случайных процессов, но при определении вероятности и МО дефицита мощности хронологическая взаимосвязь исчезает. При дискретизации расчетного интервала времени нагрузка $\tilde{L}(t)$, а следовательно, и $\Delta\tilde{L}(t) = L_{max} - \tilde{L}(t)$ могут рассматриваться как совокупности независимых случайных величин $\{\tilde{L}(t), t = 1, \dots, T\}$, $\{\Delta\tilde{L}(t) = L_{max} - \tilde{L}_t, t = 1, \dots, T\}$. В результате переменные $\{G_{ав}(t), \delta L(t), \Delta\tilde{L}(t)\}$ можно рассматривать как независимые случайные величины и перейти от анализа случайных процессов к анализу случайных величин.

Представление $G_{пл}(t)$ как детерминированной величины, определяющей небаланс, а следовательно, и дефицит мощности вынуждает рассматривать расчетный период детально, без какого-либо эквивалентирования на всех интервалах неизменности $G_{пл}(t)$.

4.3 Аналитические методы определения вероятности и МО дефицита мощности

Для каждого момента времени считаются известными параметры функций распределения системы генерации и нагрузки. Система генерации представляет собой совокупность групп однотипных генераторов с заданными числом n_i , мощностью $G_{a,i}$ и вероятностью $q_i, i=1, \dots, n_{gr}$ отказа одного генератора. Принимается, что число аварийно-отключенных (или работоспособных) генераторов в группе описывается биномиальным распределением с параметром q_i (или $p_i = 1 - q_i$), а нагрузка описывается нормальным распределением. Наличие конечного числа влияющих на результат случайных величин предполагает необходимость свертки вероятностных распределений [2, 18]. Поскольку непрерывной случайной величиной является только одна нагрузка $L \sim N(x, m_L, \sigma_L)$, то для определения МО ДМ при свертке уместно использование (4.10). С этой целью свертка выполняется только для системы генерации (совокупность дискретных случайных величин), в результате чего формируется вероятностный ряд (ВР) рабочей генерации $\{G_j, p_j, j = 1, \dots, N_c\}$. При этом

$$\mathcal{P}_{def} = \sum_{j=1}^{N_c} p_j \cdot \mathcal{F}_L(G_j, m_L, \sigma_L); \quad (4.12)$$

$$m_{def} = \sum_{j=1}^{N_c} p_j \cdot \left((m_L - G_j) \mathcal{F}_L(G_j) + \sigma_L^2 f_L(G_j) \right). \quad (4.13)$$

Известно, что число N_c чрезвычайно быстро возрастает по мере увеличения числа групп. В пределе, при числе групп, равном числу n_r генераторов $N_c = 2^{n_r}$ [1, 18]. Возникает задача сжатия ВР. Это реализуется путем объединения членов ВР с одинаковой мощностью генерации, интервального объединения членов ВР и исключения маловероятных событий [1, 20]. Однако при интервальном объединении и исключении маловероятных событий неизбежна погрешность моделирования. Отсюда в качестве альтернативы полной вероятностной свертке групп генераторов могут рассматриваться иные приближенные методы моделирования системы генерации, к числу которых можно отнести: описание системы генерации нормальным распределением; эквивалентирование однотипными генераторами; Грам–Шарлье эквивалентирование и др. При этом для повышения точности моделирования возможно и желательно выделение одной или

нескольких групп наиболее мощных генераторов с эквивалентированием остальной системы генерации.

Представление функции распределения системы генерации нормальным распределением является наиболее простым и часто применяемым методом эквивалентирования. Оно основано на том, что НР является асимптотически предельным для биномиального распределения. Отсюда ожидается, что при достаточно большом числе генераторов погрешность эквивалентирования не будет существенной. Критериальным соотношением здесь является равенство МО и дисперсии суммарной мощности работоспособных генераторов

$$m_{G,\Sigma} = \sum n_j G_j p_j; \quad \sigma_{G,\Sigma}^2 = \sum n_j G_j^2 p_j q_j.$$

Учитывая, что нагрузка также описывается НР, следует, что и функция дефицитности $\psi = L - G$ описывается НР с параметрами

$$m_\psi = m_L - m_{G,\Sigma}; \quad \sigma_\psi^2 = \sigma_L^2 + \sigma_{G,\Sigma}^2.$$

Принимая во внимание, что ДМ соответствует условию $\psi > 0$, определяются вероятность и МО ДМ

$$\mathcal{P}_{def} = \mathcal{F}_\psi(0, m_\psi, \sigma_\psi);$$

$$m_{def} = m_\psi \mathcal{F}_\psi(0) + \sigma_\psi^2 f_\psi(0).$$

Эквивалентирование системы генерации группой однотипных агрегатов мощностью G_e и коэффициентом неготовности q_e выполняется исходя из условий равенства располагаемой мощности $G_\Sigma = n_e G_e$, МО и дисперсии отключенной генераторной мощности [8, 9, 21]. При этом

$$q_e = \left(\sum n_j G_j q_j \right) / \left(\sum n_j G_j \right);$$

$$G_e = \left(\sum n_j G_j^2 p_j q_j \right) / \left(p_e \sum n_j G_j q_j \right);$$

$$n_e = \frac{1}{G_e} \sum n_j G_j.$$

При представлении биномиального распределения эквивалентной системы в виде ВР вероятность и МО ДМ определяются по формулам (4.12), (4.13).

Применение рядов Грама–Шарлье. Как отмечено в [22] существенное повышение точности оценки показателей БН при описании функции распределения суммы разнотипных (в том числе совокупности непрерывных и дискретных) случайных переменных, наблюдается при применении рядов Грама–Шарлье (Gram–Charlier expansions) [23, 24]:

$$F(x) = \Phi(x) + \sum_{i=3}^r \frac{c_i}{i!} \varphi^{(i-1)}(x), \quad (4.14)$$

где

$\Phi(x)$, $\varphi^{(i)}(x)$ – соответственно функция и i -я производная плотности эталонного (как правило, стандартного нормального) распределения;

$\{c_i\}$ – коэффициенты ряда Грама–Шарлье;

r – максимальный порядок ряда Грама–Шарлье (обычно $r = 4$ или 6).

Коэффициенты ряда Грама–Шарлье определяются через центральные моменты $\{\mu_i\}$ или семиинварианты (кумулянты) $\{k_i\}$ результирующего вероятностного распределения

$$c_0 = 1; \quad c_1 = c_2 = 0; \quad c_3 = -\frac{\mu_3}{\sigma^3} = -\frac{k_3}{\sigma^3}; \quad c_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 = \frac{k_4}{\sigma^4}. \quad (4.15)$$

Деление семиинварианта k_i на σ^i связано с нормированием случайной величины.

Четыре первые кумулянты биномиального распределения (группы генераторов)

$$k_1 = np; \quad k_2 = np(1-p); \quad k_3 = np(p-1)(2p-1); \\ k_4 = -np(p-1)(6p^2-6p+1).$$

Для нормального распределения (нагрузка) $k_1 = m$; $k_2 = \sigma^2$; $k_i = 0 | i > 2$.

Замена нормального распределения при описании функции НМ рядами Грама–Шарлье существенно улучшает расчеты показателей БН. Однако, как это отмечается многими исследователями, в области малых вероятностей относительная погрешность остается достаточно большой.

Выделение группы (или групп) наиболее значимых (наиболее мощных) генераторов с эквивалентированием оставшейся части генерирующей системы частично позволяет учесть дискретность генерирующей системы. Как показывает практика это приводит к снижению погрешности вероятностного эквивалентирования.

На рисунке 4.1 представлены результаты сравнения описанных выше методов эквивалентирования. В тестовом примере рассматривалась концентрированная генерирующая система, состоящая из 3 групп генераторов: $2 \times 300 + 5 \times 100 + 10 \times 25$ МВт, с коэффициентами неготовности соответственно: 0.05; 0.04; 0.03. МО нагрузки $m_{L_{max}} = 0.8 * G_{расп}$; СКО нагрузки $\sigma_{L_{max}} = 0.05 * m_{L_{max}}$. В качестве эталонного рассматривался метод полной свертки генерирующей системы (М1), который обеспечивал одинаковое с ММК решение. Наилучшим по точности эквивалентирования является метод М2 – Грам–Шарлье с выделением группы наиболее мощных генераторов. При полном эквивалентировании (без выделения особой группы генераторов) погрешность эквивалентирования возрастает (методы М3, М5). Результаты расчета вероятности и МО ДМ по методам М4–М6 значительно хуже методов Грам–Шарлье, что следует иметь в виду в практических расчетах.

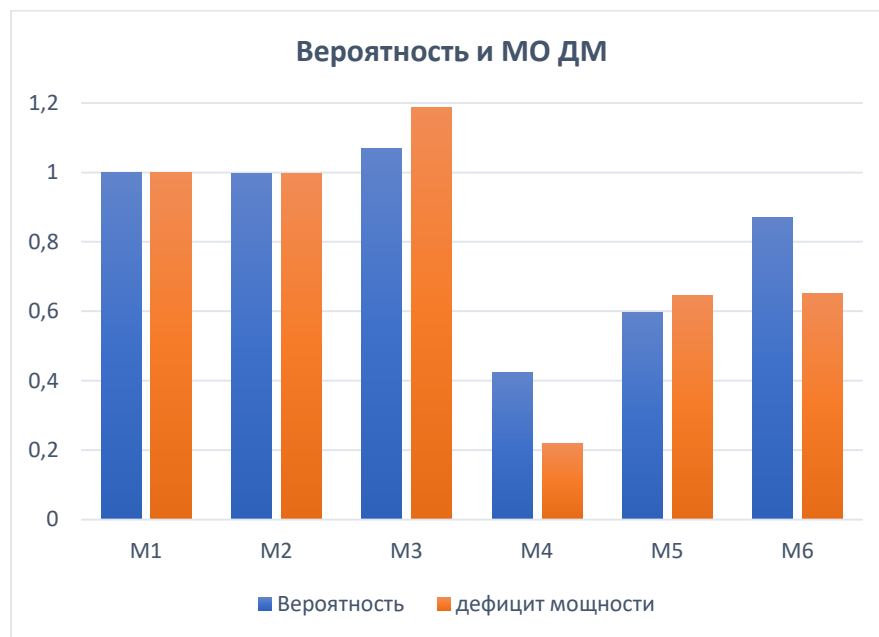


Рисунок 4.1 – Вероятность и МО дефицита мощности по отношению к методу М1: М1 – полная свертка ВР генерации; М2 – метод Грам–Шарлье с выделением одной группы; М2 – метод Грам–Шарлье с выделением одной группы; М3 – метод Грам–Шарлье для всех групп генераторов; М4 – эквивалентирование суточного графика нагрузки нормальным распределением; М5 – эквивалентирование группой эквивалентных генераторов; М6 – эквивалентирование с выделением наиболее мощных генераторов

4.4 Выделение суточной неравномерности нагрузки

Как отмечалось выше представление суточного графика нагрузки в виде случайной величины с нормальным распределением приводит к существенной погрешности расчетов суммарных на суточном интервале вероятности и МО дефицита мощности. Более точным является представление суточной неравномерности нагрузки в виде дополнительной генерации, с вероятностным рядом $\{\Delta G_s^{wd} = L_{w,d}^{max}(1 - k_s^{wd}), p_s^{wd}\}$, $p_s^{wd} = \tau_s^{wd}/24$, где $s = 1, \dots, S$ – номер интервала неизменности нагрузки на суточном графике.

Нетрудно получить центральные моменты ΔG :

$$m_{\Delta G}^{wd} = \sum \Delta G_s^{wd} p_s^{wd}; \quad \mu_r = \sum (\Delta G_s^{wd} - m_{\Delta G}^{wd})^r p_s^{wd}; \quad r = 1, \dots, 4,$$

а, следовательно, и кумулянты $\{k_{\Delta G,1} - k_{\Delta G,4}\}$. Это позволяет приплюсовать полученные величины к кумулянтам основной (или дополнительной) генерации, после чего согласно (15) получить новые коэффициенты $\{c_1 - c_4\}$ ряда Грама-Шарлье.

Расчетная практика показывает, что не менее эффективным инструментарием является свертка ВР суточной неравномерности нагрузки $\{\Delta G_s^{wd}, p_s^{wd}\}$ с ВР выделенной группы или полной совокупности генерирующих агрегатов.

4.5 Взаимосвязь интервальных и точечных оценок вероятности и МО ДМ

Конфигурация суточного графика и сезонная неравномерность нагрузки имеют относительно устойчивый характер. При этом искомые ПБН, в основном, зависят от резерва мощности $R = G_{уст} - L_{max}$, причем увеличение R распространяется на все периоды времени года. Отсюда возникает предположение о функциональной зависимости интервальных и точечных оценок вероятности и МО ДМ. Расчетные эксперименты показали, что несмотря на существенную нелинейность функций $\mathcal{F}_{def,T}(R)$ и $m_{def,T}(R)$ между оценками этих функций, полученных для всего расчетного интервала (для всех часов годового периода) и оценками для периода максимальной нагрузки наблюдается практически линейная зависимость (рисунки 4.2, 4.3), где пары соответствующих величин получены при относительно широком (но близком к наблюдаемому на практике)

диапазоне R . Наличие сильной корреляционной связи между рассматриваемыми величинами позволяет учесть данный фактор и существенно сократить расчеты, ограничиваясь только одним часовым периодом максимальной нагрузки ЭЭС. При этом

$$\mathcal{F}_{def,T}(R) = k_{T/h}^{\mathcal{F}/\mathcal{F}} \mathcal{F}_{def,h}(R, L_{max})$$

$$M(\Delta\mathcal{E}(R)) = 8760 k_{T/h}^{m/m} m_{def,h}(R, L_{max}),$$

где

$k_{T/h}^{\mathcal{F}/\mathcal{F}}$ – коэффициент пропорциональности полученного на основании небольшого числа предварительных расчетов тренда функциональных зависимостей $\mathcal{F}_{def,T}(\mathcal{F}_{def,h})$.

Коэффициент дефицита мощности $k_{T/h}^{m/m}$ по своей сущности подобен (но не совпадает) с коэффициентом заполнения графика нагрузки.

Более точные результаты наблюдаются, если в качестве базового (для перехода при оптимизации к другим показателям) расчета принять не час, а сутки, в которых наблюдается годовой максимум нагрузки. Однако коэффициент дефицита мощности $k_{T/d}^{m/m}$ здесь будет иным

$$M(\Delta\mathcal{E}(R)) = 365 k_{d/T}^{m/m} m_{def,d}(R, L_{max}).$$

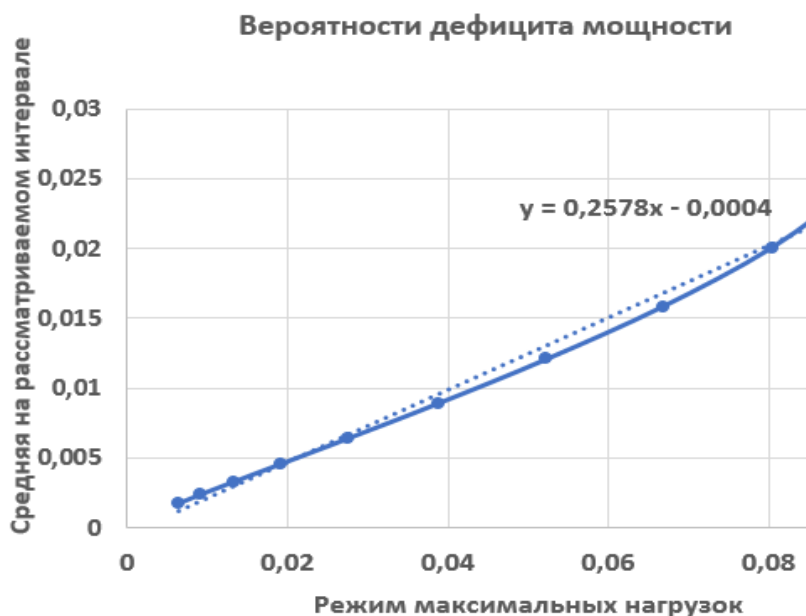


Рисунок 4.1 – Зависимость средней на интервале вероятности от вероятности ДМ при максимальной нагрузке

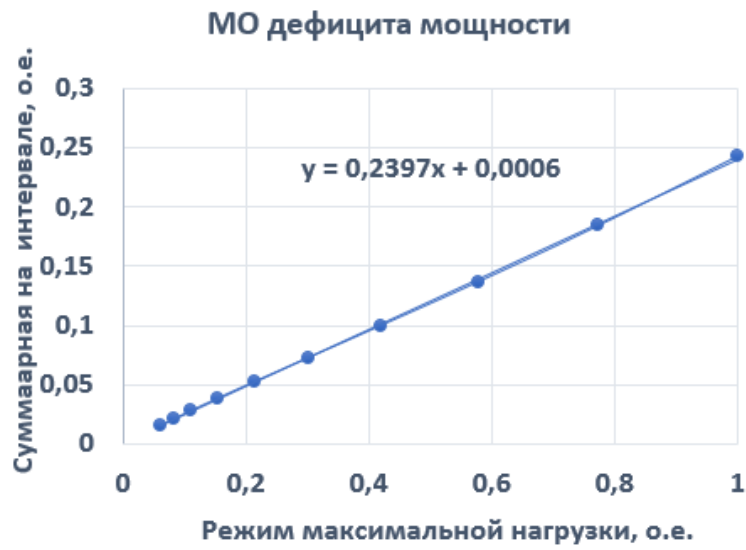


Рисунок 4.2 – Зависимость МО суммарного на интервале дефицита энергии от МО дефицита энергии при максимальной нагрузке

Линейная зависимость наблюдается не только для однотипных переменных, но и между МО дефицита мощности $m_{def,T}(R)$ и интервальной на расчетном периоде вероятностью $\mathcal{F}_{def,T}(R)$ (рисунок 4.4)

$$m_{def,T}(R) = k_{T/h}^{m/\mathcal{F}} \mathcal{F}_{def}(R).$$

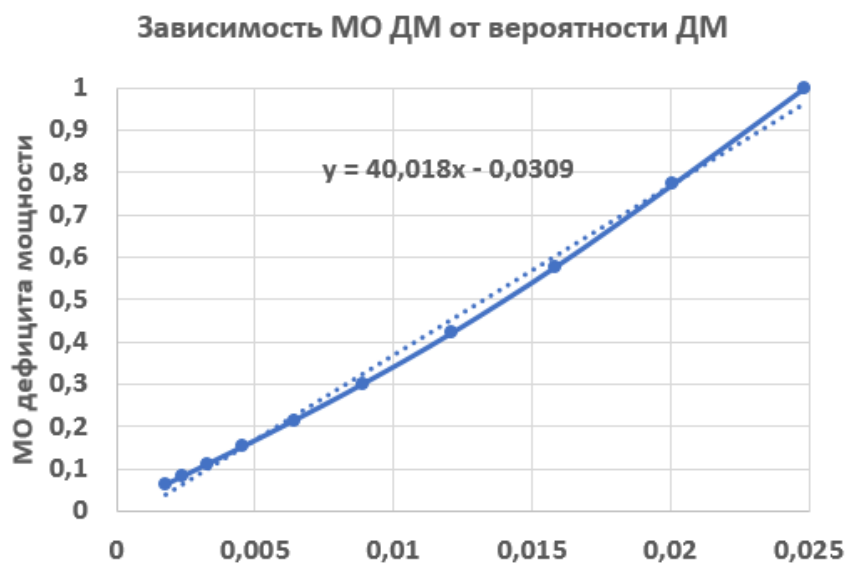


Рисунок 4.4 – Зависимость МО ДМ от интервальной на расчетном периоде вероятности дефицита мощности

В результате многократные расчеты ПБН (например, при выборе оптимального варианта развития ЭЭС) сводятся к предварительному определению взаимных коэффициентов пропорциональности между ПБН (это относится к вероятностям и МО ДМ) и расчету ПБН для режима максимальных нагрузок при разных внешних условиях (R, L_{max}).

Данный вывод распространяется и на связанные с вероятностью и МО ДМ зарубежные ПБН: *LOLP* (Loss of Load Probability); *LOLE* (Loss of load expectation) и *LOLH* (Loss of load hours), *EUE* (Expected Unserved Energy) [7, 13, 22, 23].

Попарно линейная функциональная связь между вероятностью и МО ДМ позволяет перейти от оптимизационной задачи (4.2), где существенную неопределенность имеют параметры c, y_0 , к назначению норматива интервальной вероятности \mathcal{F}_{def}^{norm} [14] и проверке условия

$$\mathcal{F}_{def}(R) \leq \mathcal{F}_{def}^{norm}.$$

Безусловно, определение норматива возможно исходя из критерия Марковича (4.1), но, что более важно, этот норматив может быть изменен в большую или меньшую сторону исходя из опыта эксплуатации ЭЭС применительно к климатическим, социальным и другим внешним условиям. Вывод о значимости нормативов распространяется и на ПБН *LOLP, LOLE, LOLH*. Переход от одного норматива к другому не представляет проблем [22].

4.6 Заключение к разделу 4

Из результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1) Описанные методы идентификации редких в электроэнергетике событий относятся к тем событиям, для которых можно определить критериальную функцию, меняющую свою величину в зависимости от специфики искомых событий. К таким функциям (и событиям) в электроэнергетике можно отнести дефицит мощности, положительный при наличии дефицита и отрицательный при наличии резерва генерирующей мощности.

2) Критерий Марковича в практических расчетах может рассматриваться только как приближенная оценка оптимальной надежности ЭЭС.

3) Допущение о нормальном распределении нагрузки при детерминированности генерации позволяет получить аналитическое представление вероятности и МО дефицита мощности в ЭЭС без преобразования непрерывного распределения в дискретное с последующей целочисленной сверткой вероятностных рядов.

4) Наилучшим методом для оценки вероятностных параметров дефицита мощности в концентрированной ЭЭС является отдельный учет генерации и нагрузки, плюс полная свертка вероятностных рядов генерирующей мощности.

5) Допущение о нормальном законе распределения генерации приводит к недопустимо большой погрешности результирующих вероятностных параметров дефицита мощности.

6) Коррекция функции распределения небаланса мощности рядом Грама–Шарлье позволяет получить достаточно точное решение и может быть рекомендована для практического использования при большой разнотипности генерирующих устройств, а также при наличии генерации на возобновляемых источниках энергии, где функции вероятностных распределений отличаются от нормального или биномиального распределения генерирующей мощности.

7) Между вероятностями и МО дефицита мощности для отличающихся по длительности интервалов годового графика нагрузки существует практически линейная функциональная взаимосвязь. Это позволяет перейти от задачи определения оптимального резерва мощности в ЭЭС к оценке норматива интервальной вероятности и проверке условия: вероятность ДМ на рассматриваемом интервале времени не превышает нормативное значение.

5 Вероятностно-энтропийная модель многомерного риска как инструментарий в задачах мониторинга состояния систем критических инфраструктур

5.1 Введение

Системы критических инфраструктур являются сложными системами. Они могут быть отнесены к классу сетевых структур. Как поведение элементов, так и взаимодействие между ними в таких системах обладает стохастичностью, которую необходимо учитывать при оценивании риска. В данном разделе развивается векторное энтропийное моделирование применительно к сетевому представлению систем критических инфраструктур, а также описано практическое использование вероятностно-энтропийной модели многомерного риска применительно к задачам мониторинга состояния сложных систем.

5.2 Энтропийное моделирование сетевых структур

В настоящее время довольно часто используется энтропия для описания сложных систем в различных областях. Рассмотрены вопросы использования дифференциальной энтропии для сетевых структур, представленных в виде связанных графов с корреляционными связями. Известно, что энтропию непрерывного случайного вектора можно разложить на две составляющие: энтропию случайности и энтропию самоорганизации. Для сетевых структур наряду с оценкой самой энтропии предложены другие полезные характеристики – энтропийная мера взаимосвязи между несколькими подсистемами и энтропия системы в отдельной вершине, которые расширяют возможности энтропийного моделирования для исследования сетевых структур: позволят оценить взаимосвязанность разных участков между собой и определить, как изменяется энтропия внутри таких систем. Рассмотрены примеры на модельных данных.

5.2.1 Введение

Структура – это совокупность устойчивых связей между элементами системы, обеспечивающих воспроизводимость при изменяющихся условиях [1]. В холистическом понимании структура вместе с элементами образует систему.

Сетевая структура рассматривается как децентрализованный комплекс взаимосвязанных элементов, способный расширяться путем включения новых звеньев, что придает сети гибкость и динамичность [2]. В сетевых структурах потенциально могут существовать связи между всеми элементами, причем эти связи могут быть разнонаправленными, т.е. могут быть и двойное подчинение, и межуровневое взаимодействие [3]. Также в системе могут быть подсистемы, что тоже должно отражаться в сетевой структуре как взаимосвязи на уровне подсистем. Поведение реальных систем часто обладает стохастичностью, а связи между их элементами можно адекватно описывать как корреляционные. Модели таких систем обычно акцентируют внимание на явном количественном описании вероятностных характеристик тех или иных ситуаций в жизненном цикле системы [4–7]. Однако такие модели не позволяют учесть системные характеристики сетевых структур, что может ограничить возможности выработки эффективных управленческих решений.

Энтропия является универсальным параметром, позволяющим объединять различные проявления физического мира в единое целое, т.е. может служить системной характеристикой. В настоящее время достаточно распространено использование энтропии для описания поведения открытых стохастических систем в различных областях [8–11]. Общим в этих работах является использование введенной К. Шенноном информационной энтропии [12]

$$H(\mathbf{D}) = -\sum_{i=1}^L p_i \ln p_i, \quad (5.1)$$

где

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

Согласно формуле (5.1) модель системы представляется как функция от множества ее состояний \mathbf{D} . Однако использование информационной энтропии в качестве модели такой системы имеет существенные недостатки:

- требуется оценить вероятности p_i ; это требует больших выборок, для некоторых состояний статистику получить практически невозможно,
- некоторые состояния систем заранее могут быть вообще не известны,
- затруднено моделирование взаимосвязей между элементами многомерных систем,
- не учитывается изменение дисперсии,

- основные системные закономерности не учитываются,
- адекватные энтропийные модели разработаны только для частных задач.

Поэтому актуальна задача поиска более информативных энтропийных характеристик, описывающих поведение сетевых структур.

5.2.2 Постановка задачи энтропийного моделирования сетевых структур

Структура – это совокупность устойчивых связей между элементами системы, обеспечивающих воспроизводимость при изменяющихся условиях [1]. В холистическом понимании структура вместе с элементами образует систему.

Более адекватным подходом к описанию стохастических систем является выделение не отдельных состояний, а ее элементов, которые всегда можно задать для конкретной системы. Представим систему в виде непрерывного случайного вектора $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_m)$ с взаимосвязанными компонентами. Плотность вероятности $p_{\mathbf{Y}}(x_1, \dots, x_m)$ полностью описывает распределение вероятностей многомерной случайной величины \mathbf{Y} . Поэтому вместо информационной энтропии будем использовать дифференциальную энтропию [12], являющуюся функционалом от плотности вероятности случайного вектора \mathbf{Y} ,

$$H(\mathbf{Y}) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\mathbf{Y}}(x_1, \dots, x_m) \ln p_{\mathbf{Y}}(x_1, \dots, x_m) dx_1 \dots dx_m. \quad (5.2)$$

Формула (5.2) была предложена К. Шенноном как формальный аналог понятия информационной энтропии (энтропия непрерывного распределения) для m -мерного непрерывного случайного вектора \mathbf{Y} . Эта величина впоследствии А.Н. Колмогоровым совместно с И.М. Гельфандом и А.М. Ягломом была исследована и названа дифференциальной энтропией [13].

В [14] доказано, что если все компоненты Y_i имеют дисперсии $\sigma_{Y_i}^2$, то дифференциальная энтропия (далее, энтропия) $H(\mathbf{Y})$ случайного вектора \mathbf{Y} равна

$$H(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k|Y_1 \dots Y_{k-1}}^2), \quad (5.3)$$

где

κ_i – дифференциальные энтропии по плотностям с единичными дисперсиями,

$$\kappa_i = H(Y_i / \sigma_{Y_i}) = H(\hat{Y}_i) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\hat{Y}_i}(x) \ln p_{\hat{Y}_i}(x) dx;$$

$$R_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2 = \frac{\sigma_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2}{\sigma_{Y_k}^2} \text{ – индекс детерминации в общем случае нелинейной}$$

регрессионной зависимости случайной величины Y_k , от случайных величин Y_1, \dots, Y_{k-1} , (доля дисперсии Y_k , объясняемая изменением переменных Y_1, \dots, Y_{k-1}). При неизвестном виде зависимости для определения $R_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2$ можно воспользоваться методами непараметрического регрессионного анализа [15].

Первые два слагаемых $H_V(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i = \sum_{i=1}^m H(Y_i)$ равны сумме энтропий элементов $H(Y_i)$, что соответствует случаю, когда элементы Y_i системы \mathbf{Y} взаимно независимы. Величина $H_V(\mathbf{Y})$ равна предельной энтропии, соответствующей взаимной независимости элементов системы, и характеризует рассмотрение целостного объекта как состоящего из частей (аддитивность системы). Поэтому $H_V(\mathbf{Y})$ назовем «энтропией хаотичности».

Возьмем третье слагаемое в выражении (5.3) со знаком «←»:

$$- G_R(\mathbf{Y}) = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2), \text{ т.е. } G_R(\mathbf{Y}) = - \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2). \text{ Назовем}$$

$G_R(\mathbf{Y})$ энтропийной «мерой самоорганизации». Она отражает степень взаимосвязи между элементами системы \mathbf{Y} , характеризуя свойства системы как целого (целостность системы): при полной взаимной независимости между элементами системы $G_R(\mathbf{Y}) = 0$; при строгой функциональной зависимости между хотя бы двумя элементами системы $G_R(\mathbf{Y}) \rightarrow +\infty$. Отметим, что в случае двухкомпонентного вектора $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2)$ величина $G_R(\mathbf{Y})$ определяется средней взаимной информацией между Y_1 и Y_2 , которая всегда неотрицательна [16].

Если \mathbf{Y}° – гауссов случайный вектор, тогда

$$H_V(\mathbf{Y}^\circ) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + m \ln \sqrt{2\pi e}, \quad G_R(\mathbf{Y}^\circ) = - \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_Y|, \quad (5.4)$$

где

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

В рамках энтропийного моделирования сетевыми структурами будем называть системы, каждый из элементов которой связан хотя бы с одним из других элементов системы. Они могут быть представлены в виде связных графов, в которых связь между элементами (вершинами) задается в виде тесноты корреляционной связи.

Физические компоненты инфраструктуры моделируются как связный граф, где узлы представляют собой такие компоненты, как районы, развязки автодорог, железнодорожные депо, генераторы, телефонные коммутаторы, резервуары воды и т.д. Дуги графа характеризуют взаимосвязи между элементами. В рамках энтропийного моделирования эти взаимосвязи будем описывать теснотой корреляционной связи между элементами системы (узлами графа). Для сетевых структур недостаточно ограничиться только моделью (5.2)–(5.3), так как наряду с оценкой самой энтропии (5.2) и ее составляющими $H_V(\mathbf{Y})$ и $G_R(\mathbf{Y})$ необходимо оценивать энтропийные характеристики как взаимодействие между собой подсистем, так и для каждого элемента сетевой структуры.

Цель статьи – предложить дополнительный инструментарий, который бы позволил в рамках энтропийного моделирования учесть системные свойства сетевых структур для задач принятия решений.

5.2.3 Энтропийная мера взаимосвязи между несколькими подсистемами сетевой структуры

Пусть заданы n подсистем $\mathbf{Y}^{(j)}$ системы $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_m)$, таких что $\mathbf{Y}^{(j)} = (Y_{j,1}, \dots, Y_{j,m_j}) \subset \mathbf{Y}$, $j = 1, \dots, n$, $n \in \{2, 3, \dots, m\}$, любая компонента Y_i входит в состав только одной подсистемы (случайного вектора) $\mathbf{Y}^{(j)}$. Также считаем, что все компоненты Y_i имеют дисперсии. Определим «энтропийную меру взаимосвязи» между подсистемами (случайными векторами) $\mathbf{Y}^{(1)}, \dots, \mathbf{Y}^{(n)}$ как разность между суммой энтропий подсистем и энтропией системы (объединения подсистем) $\mathbf{Y} = \bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)} = (Y_1, \dots, Y_m)$

$$G(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}) = \sum_{j=1}^n H(\mathbf{Y}^{(j)}) - H(\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}). \quad (5.5)$$

Теорема. Энтропийная мера взаимосвязи между несколькими подсистемами $\mathbf{Y}^{(1)}, \dots, \mathbf{Y}^{(n)}$ сетевой структуры $\mathbf{Y} = \bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}$ равна [17]

$$G\left(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}\right) = -\frac{1}{2} \ln \frac{1 - d_e\left(\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}\right)}{\prod_{j=1}^n (1 - d_e(\mathbf{Y}^{(j)}))}, \quad (5.6)$$

где

$$d_e(\mathbf{Y}) = 1 - \prod_{k=2}^m (1 - R_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2), \quad d_e(\mathbf{Y}^{(j)}) = 1 - \prod_{k=2}^{m_j} (1 - R_{Y_{j,k} | Y_{j,1} \dots Y_{j,k-1}}^2) \quad -$$

коэффициенты тесноты корреляционной связи между компонентами случайных векторов \mathbf{Y} , $\mathbf{Y}^{(j)}$ соответственно.

Доказательство теоремы.

Зададим n непрерывных случайных векторов произвольных размерностей, у которых нет совпадающих компонент. Обозначим их как $\mathbf{Y}^{(1)} = (Y_1^{(1)}, \dots, Y_{m_1}^{(1)})$, $\mathbf{Y}^{(2)} = (Y_1^{(2)}, \dots, Y_{m_2}^{(2)})$, \dots , $\mathbf{Y}^{(n)} = (Y_1^{(n)}, \dots, Y_{m_n}^{(n)})$. Компоненты в любом из случайных векторов $\mathbf{Y}^{(l)}$ могут быть корреляционно взаимно зависимыми. Для этого множества случайных векторов введем их объединение в виде вектора

$$\mathbf{Y} = \bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)} = \underbrace{(Y_1, \dots, Y_{m_1})}_{\mathbf{Y}^{(1)}}, \underbrace{(Y_{m_1+1}, \dots, Y_{m_1+m_2})}_{\mathbf{Y}^{(2)}}, \dots, \underbrace{(Y_{m_1+\dots+m_{n-1}+1}, \dots, Y_{m_1+\dots+m_n})}_{\mathbf{Y}^{(n)}}. \quad (5.7)$$

Поскольку $H(\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}) = H(\mathbf{Y})$, то

$$\sum_{j=1}^n H_V(\mathbf{Y}^{(j)}) = H_V(\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}) = H_V(\mathbf{Y}), \quad \text{поэтому формула (5.5) с учетом (5.3)}$$

примет вид

$$G\left(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}\right) = G_R(\mathbf{Y}) - \sum_{j=1}^n G_R(\mathbf{Y}^{(j)}). \quad (5.8)$$

Пусть $M_j = \sum_{k=1}^j m_k$, $j = 1, \dots, n$, $M_0 = 0$, $M_n = m_1 + \dots + m_n = m$. В [18]

показано, что

$$G_R(\mathbf{Y}^{(j)}) = -\frac{1}{2} \sum_{k=2}^{m_j} \ln(1 - R_{Y_k^{(j)} | Y_1^{(j)} \dots Y_{k-1}^{(j)}}^2), \quad (5.9)$$

$$G_R(\mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \sum_{k=2}^{M_n} \ln(1 - R_{Y_k|Y_1 \dots Y_{k-1}}^2). \quad (5.10)$$

Очевидно, что если $m_j = 1$, то $G_R(\mathbf{Y}^{(j)}) = 0$. С учетом выражений (5.7)–(5.10)

имеем

$$\begin{aligned} e^{2G(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)})} &= \frac{e^{-2\sum_{j=1}^n G_R(\mathbf{Y}^{(j)})}}{e^{-2G_R(\mathbf{Y})}} = \frac{\prod_{j=1}^n \prod_{k=M_{j-1}+2}^{M_j} (1 - R_{Y_k^{(j)}|Y_1^{(j)} \dots Y_{k-1}^{(j)}}^2)}{\prod_{k=2}^{M_n} (1 - R_{Y_k|Y_1 \dots Y_{k-1}}^2)} = \\ &= \prod_{j=1}^{n-1} \left((1 - R_{Y_{M_{j+1}}|Y_1 \dots Y_{M_j}}^2) \prod_{k=M_j+2}^{M_{j+1}} \frac{1 - R_{Y_k|Y_1 \dots Y_{k-1}}^2}{1 - R_{Y_k|Y_{M_{j+1}} Y_{M_{j+2}} \dots Y_{k-1}}^2} \right). \end{aligned}$$

Далее умножим слева и справа последнее выражение на

$$\prod_{j=1}^{n-1} \prod_{k=M_j+2}^{M_{j+1}} (1 - R_{Y_k|Y_{M_{j+1}} Y_{M_{j+2}} \dots Y_{k-1}}^2) \quad \text{и} \quad \text{учтем,} \quad \text{что} \quad \forall j$$

$$1 - d_e(\mathbf{Y}^{(j)}) = \prod_{k=M_{j-1}+2}^{M_j} (1 - R_{Y_k|Y_{M_{j-1}+1} Y_{M_{j-1}+2} \dots Y_{k-1}}^2):$$

$$e^{2G(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)})} \prod_{j=2}^n (1 - d_e(\mathbf{Y}^{(j)})) = \prod_{j=1}^{n-1} (1 - R_{Y_{M_{j+1}}|Y_1 \dots Y_{M_j}}^2) \prod_{k=M_j+2}^{M_{j+1}} (1 - R_{Y_k|Y_{M_j+1} Y_{M_j+2} \dots Y_{k-1}}^2).$$

Умножив и разделив последнее выражение справа на $\prod_{k=2}^{M_1} (1 - R_{Y_k|Y_1 \dots Y_{k-1}}^2)$,

учитывая, что $1 - d_e(\mathbf{Y}^{(1)}) = \prod_{k=2}^{M_1} (1 - R_{Y_k|Y_1 \dots Y_{k-1}}^2)$, получим

$$e^{2G(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)})} \prod_{j=1}^n (1 - d_e(\mathbf{Y}^{(j)})) = \prod_{k=1}^m (1 - R_{Y_k|Y_1 \dots Y_{k-1}}^2) = 1 - d_e(\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}).$$

Следовательно, $G\left(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}\right) = -\frac{1}{2} \ln \frac{1 - d_e\left(\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}\right)}{\prod_{j=1}^n (1 - d_e(\mathbf{Y}^{(j)}))}$, что и требовалось

доказать.

Замечание 1. Энтропийная мера взаимосвязи (5.6), как видно из (5.5), не содержит компоненты, характеризующей хаотичность подсистем. Если все элементы подсистем между собой взаимно независимы, то $G\left(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}\right) = 0$. В случае, когда хотя бы два элемента разных подсистем между собой строго функционально зависимы, то $G\left(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)}\right) \rightarrow +\infty$.

Замечание 2. Рассмотрим частные случаи:

$$1) \quad \text{Для } n = 2 \quad G(\mathbf{Y}^{(1)} \cap \mathbf{Y}^{(2)}) = -\frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{1 - d_e(\mathbf{Y}^{(1)} \cup \mathbf{Y}^{(2)})}{(1 - d_e(\mathbf{Y}^{(1)}))(1 - d_e(\mathbf{Y}^{(2)}))} \right).$$

2) Пусть U и V – непрерывные случайные величины, у которых существуют дисперсии. Пусть \mathbf{X} – случайный вектор, у всех компонент которого существуют дисперсии. Тогда энтропийные меры взаимосвязи между \mathbf{X} и U и между U и V равны

$$G(\mathbf{X} \cap U) = 1 - \frac{1 - d_e(\mathbf{X} \cup U)}{1 - d_e(\mathbf{X})}; \quad (5.11)$$

$$G(U \cap V) = -\frac{1}{2} \ln(1 - R_{V|U}^2) = -\frac{1}{2} \ln(1 - R_{U|V}^2), \quad (5.12)$$

где

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

3) Если \mathbf{Y}° – гауссов случайный вектор, то

$$G\left(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)\circ}\right) = -\frac{1}{2} \ln \frac{\left| \mathbf{R}_{\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)\circ}} \right|}{\prod_{j=1}^n \left| \mathbf{R}_{\mathbf{Y}^{(j)\circ}} \right|}. \quad (5.13)$$

Если все $m_j = 1$, т.е. $\mathbf{Y}^{(j)} = Y_j, j = 1, \dots, N$, то формула (5.13) примет вид

$$G\left(\bigcap_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)\circ}\right) = G(\mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \ln \left| \mathbf{R}_{\bigcup_{j=1}^n \mathbf{Y}^{(j)\circ}} \right| = -\frac{1}{2} \ln \left| \mathbf{R}_{\mathbf{Y}^\circ} \right|. \quad (5.14)$$

Энтропийный показатель взаимосвязи между гауссовой случайной величиной Z и гауссовым случайным вектором \mathbf{Y}° равен

$$G(Z \cap \mathbf{Y}^\circ) = -\frac{1}{2} \ln \frac{\left| \mathbf{R}_{Z \cup \mathbf{Y}^\circ} \right|}{\left| \mathbf{R}_{\mathbf{Y}^\circ} \right|}. \quad (5.15)$$

5.2.4 Энтропия в отдельном узле сетевой структуры

Пусть $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_m)$ – сетевая структура. Определим «энтропию сетевой структуры в узле Y_l » как разницу между энтропией всей \mathbf{Y} системы и энтропией системы без элемента Y_l

$$H(Y_l(\mathbf{Y})) = H(\mathbf{Y}) - H(\mathbf{Y} \setminus Y_l). \quad (5.16)$$

Поскольку нумерация элементов в системе не влияет на ее энтропию, то без потери общности считаем, что $l = m$. Тогда выражение (5.16) примет вид

$$\begin{aligned} H(\mathbf{Y}) - H(\mathbf{Y} \setminus Y_m) &= \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2) - \\ &- \sum_{i=1}^{m-1} \ln \sigma_{Y_i} - \sum_{i=1}^{m-1} \kappa_i - \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{m-1} \ln(1 - R_{Y_k | Y_1 \dots Y_{k-1}}^2) = \underbrace{\ln \sigma_{Y_m} + \kappa_m}_{H(Y_m)} + \frac{1}{2} \ln(1 - R_{Y_m | Y_1 \dots Y_{m-1}}^2). \end{aligned}$$

Поэтому для произвольного номера l элемента в сетевой структуре имеем

$$H(Y_l(\mathbf{Y})) = H(Y_l) + \frac{1}{2} \ln(1 - R_{Y_l | Y_1 \dots Y_{l-1} Y_{l+1} \dots Y_m}^2). \quad (5.17)$$

С учетом (5.17) можно указать на теоретико-информационную интерпретацию формулы (5.16) как энтропию в узле сети в виде условной энтропии $H(\mathbf{Y}) - I(Y_l; \mathbf{Y} \setminus Y_l)$, где

$I(Y_l; \mathbf{Y} \setminus Y_l)$ – неотрицательная средняя взаимная информация между вершиной Y_l и сетью $\mathbf{Y} \setminus Y_l$, выраженная через коэффициенты корреляции. Таким образом, справедлива следующая лемма.

Лемма 1. Энтропия сетевой структуры $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_m)$ в узле Y_l определяется по формуле (5.11).

Замечание 3. Энтропию сетевой структуры в узле $H(Y_l(\mathbf{Y}))$ можно разложить на «энтропию хаотичности» $H(Y_l(\mathbf{Y}))_R$ и «энтропийную меру самоорганизации» $H(Y_l(\mathbf{Y}))_V$ в узле Y_l как

$$H(Y_l(\mathbf{Y})) = H_V(Y_l(\mathbf{Y})) - G_R(Y_l(\mathbf{Y})), \quad (5.18)$$

где

$H_V(Y_l(\mathbf{Y})) = H(Y_l) = \ln \sigma_{Y_l} + \kappa_l$ – дифференциальная энтропия элемента (случайной величины) Y_l ;

$G_R(Y_l(\mathbf{Y})) = -\frac{1}{2} \ln(1 - R_{Y_l Y_1 \dots Y_{l-1} Y_{l+1} \dots Y_m}^2)$ – энтропийная мера взаимосвязи между случайной величиной Y_l и случайным вектором $\mathbf{Y} \setminus Y_l$ (при отсутствии корреляционной связи между Y_l и случайным вектором $\mathbf{Y} \setminus Y_l$ $G_R(Y_l(\mathbf{Y})) = 0$, при строгой функциональной зависимости между Y_l и хотя бы двумя элементами случайного вектора $\mathbf{Y} \setminus Y_l$ $G_R(Y_l(\mathbf{Y})) \rightarrow +\infty$).

Замечание 4. Если \mathbf{Y}° – гауссов случайный вектор, то

$$H(Y_l^\circ(\mathbf{Y}^\circ)) = \ln \sigma_{Y_l^\circ} + \ln \sqrt{2\pi e} + \frac{1}{2} \ln \frac{|\mathbf{R}_{\mathbf{Y}^\circ}|}{|\mathbf{R}_{\mathbf{Y}^\circ \setminus Y_l^\circ}|}. \quad (5.19)$$

Выражения (5.5), (5.6), (5.11)–(5.15) позволяют исследовать сетевые структуры: оценивать взаимосвязанность между собой различных участков, а также оценивать, как меняется энтропия внутри таких систем. Для упрощения интерпретации результатов рассмотрим гауссовы сетевые структуры.

Пример 1. Пусть дана гауссова система \mathbf{X} , ее граф приведен на рисунке 5.1. Она состоит из двух подсистем $\mathbf{X}^{(1)} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ и $\mathbf{X}^{(2)} = (X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10})$.

В таблицах 5.1, 5.2 приведены значения среднеквадратических отклонений и корреляционной матрицы случайного вектора \mathbf{X} .

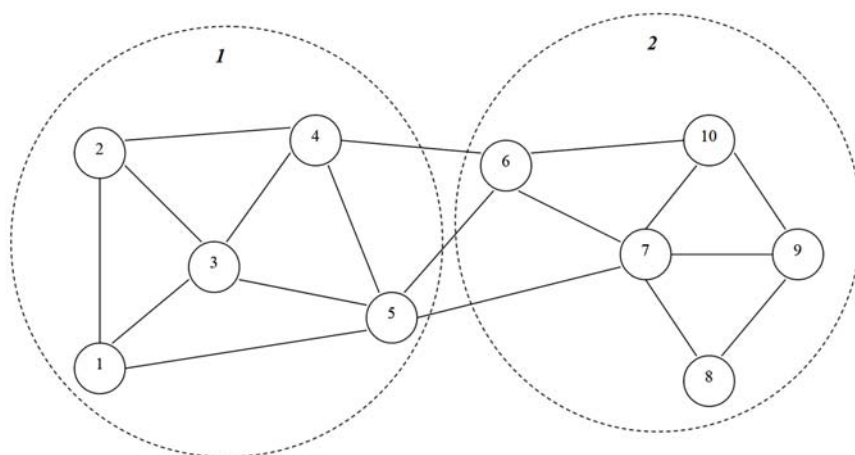


Рисунок 5.1 – Граф сетевой структуры \mathbf{X} , состоящей из двух подсистем

Таблица 5.1 – Среднеквадратические отклонения элементов вектора \mathbf{X}

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
1,53	1,08	2,00	1,23	1,21	1,84	1,34	1,78	1,00	1,54

Таблица 5.2 – Корреляционная матрица вектора \mathbf{X}

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
1	1,00	0,41	-0,13	0,21	0,04	0,05	-0,01	-0,04	-0,05	0,07
2	0,41	1,00	0,08	0,35	0,00	-0,04	-0,01	0,03	0,00	-0,01
3	-0,13	0,08	1,00	0,60	0,41	0,23	-0,12	0,04	0,00	-0,01
4	0,21	0,35	0,60	1,00	0,46	0,58	0,02	0,05	0,01	0,14
5	0,04	0,00	0,41	0,46	1,00	0,40	-0,34	0,01	0,02	-0,02
6	0,05	-0,04	0,23	0,58	0,40	1,00	0,59	0,18	0,02	0,63
7	-0,01	-0,01	-0,12	0,02	-0,34	0,59	1,00	0,59	0,33	0,45
8	-0,04	0,03	0,04	0,05	0,01	0,18	0,59	1,00	0,74	-0,28

Продолжение таблицы 5.2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X_9	-0,05	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,33	0,74	1,00	-0,58
X_{10}	0,07	-0,01	-0,01	0,14	-0,02	0,63	0,45	-0,28	-0,58	1,00

Выполним вспомогательные расчеты: $|\mathbf{R}_{\mathbf{X}^{(1)}}| = 0,30920$, $|\mathbf{R}_{\mathbf{X}^{(2)}}| = 0,017723$,
 $|\mathbf{R}_{\mathbf{X}^{(1)} \cup \mathbf{X}^{(2)}}| = |\mathbf{R}_{\mathbf{X}}| = 2,6472 \cdot 10^{-6}$. Отсюда энтропийная мера взаимосвязи
 $H(\mathbf{X}^{(1)} \cap \mathbf{X}^{(2)}) = 3,82$.

Выполнив расчеты по формулам (5.18), (5.19), получим значения энтропий в узлах сетевой структуры \mathbf{X} , которые приведены в таблице 5.3. Видим, что наибольшие значения энтропийной меры самоорганизации находятся в вершинах X_5 , X_6 , X_7 , которые расположены на границе между подсистемами. Самые высокие значения энтропии хаотичности наблюдаются в вершинах, имеющих наибольшие дисперсии.

Таблица 5.3 – Значения энтропий в вершинах сетевой структуры \mathbf{X}

X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
$H(X_i(\mathbf{X}))$	1,17	-0,35	0,21	-1,34	-1,72	-1,74	-2,18	-1,02	-0,11	0,08
$H_V(X_i(\mathbf{X}))$	1,84	1,50	2,11	1,63	1,61	2,03	1,71	2,00	1,42	1,85
$G_R(X_i(\mathbf{X}))$	0,67	1,85	1,90	2,97	3,33	3,76	3,89	3,02	1,53	1,77

Пример 2. Имеем гауссову систему \mathbf{V} , состоящую из подсистем $\mathbf{X} = (X_1, X_2)$, $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2)$, $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2)$, т.е. $\mathbf{V} = \mathbf{X} \cup \mathbf{Y} \cup \mathbf{Z} = (X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2)$. Граф системы приведен на рисунке 5.2.

Зададим дисперсии всех шести элементов равными 1. Корреляционная матрица системы \mathbf{V} приведена в таблице 5.4.

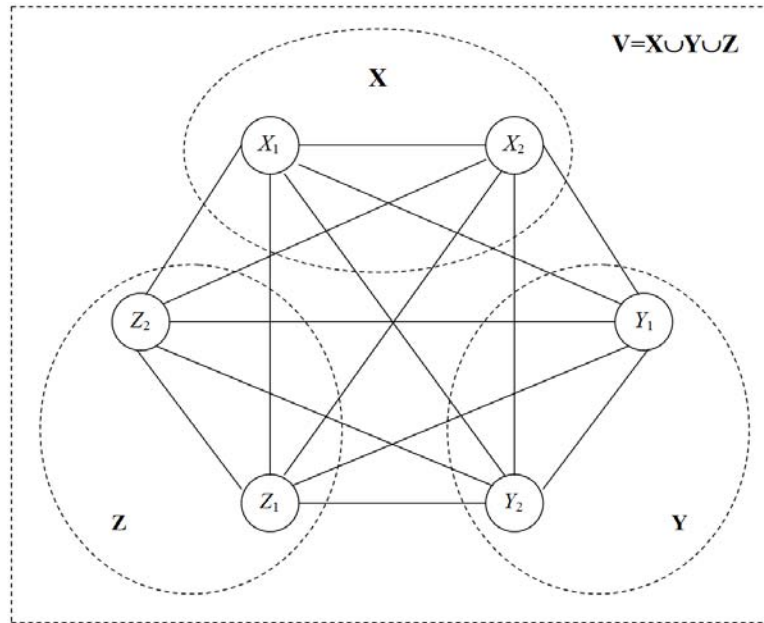


Рисунок 5.2 – Граф гауссовой системы V , состоящей из трех подсистем

Таблица 5.4 – Исходная корреляционная матрица

Элемент	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Z_1	Z_2
X_1	1	0,5	0,5	0,7	0,3	0,5
X_2	0,5	1	0,5	0,5	0,2	-0,3
Y_1	0,5	0,5	1	0,7	0,6	0,3
Y_2	0,7	0,5	0,7	1	0,5	0,5
Z_1	0,3	0,2	0,6	0,5	1	0,5
Z_2	0,5	-0,3	0,3	0,5	0,5	1

Найдем по формулам (5.18), (5.19) энтропию во всех шести узлах системы. Результаты расчетов приведены в таблице 5.5. Самая высокая энтропия наблюдается в узлах Y_1 и Z_1 , а самая низкая – в вершинах X_2 и Z_2 .

Таблица 5.5 – Значения энтропии в вершинах системы V

Вершина	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Z_1	Z_2
Энтропия в узле	0,66	0,47	0,95	0,72	0,97	0,40

Изменим значения парных корреляций.

Случай 1. Коэффициенты парной линейной корреляции приведены в таблице 5.4.

Случай 2. Значение коэффициента парной линейной корреляции между элементами Y_1 и Z_2 изменим с 0,3 на 0,45.

Случай 3. Значение коэффициента парной линейной корреляции между элементами Z_1 и Z_2 изменим с 0,5 на 0,1.

Результаты расчета энтропийной меры взаимосвязи между подсистемами X , Y , Z для трех случаев приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Энтропийные меры взаимосвязи между подсистемами X , Y , Z

Случаи	1	2	3
Энтропия взаимосвязи	1,52	1,76	1,68

Результаты в таблице 5.6 говорят о следующем:

- увеличение тесноты корреляции между элементами разных подсистем приводит к росту тесноты взаимосвязи в целом между подсистемами,
- уменьшение тесноты корреляции между элементами в отдельной подсистеме приводит к росту тесноты взаимосвязи в целом между подсистемами.

5.2.5 Риск каскадных сбоев в сетевых структурах

Можно говорить о наличии следующих тенденций, характеризующих развитие современных сетей.

Во-первых, наблюдается тенденция увеличения, как числа элементов, так и подсетей в современных сетях.

Во-вторых, они становятся все более зависимыми друг от друга. Мы наблюдаем, как несколько сетей объединяются в одну взаимозависимую сетевую структуру. Например, современные инфраструктуры, такие как электростанции, водоснабжение, транспорт, связь, топливо и др. тесно взаимодействуют между собой [19–21].

В-третьих, отказ узлов в одной сети может привести к отказу зависимых узлов в других сетях и катастрофическим каскадным сбоям в таких взаимосвязанных сетевых структурах [22].

Это делает актуальной проблему безопасного функционирования связанных сетевых структур.

Исследуем на модельных данных влияние коррелированности между элементами взаимосвязанных сетей на риск каскадных сбоев и определим возможные индикаторы

критического уровня риска. В качестве структуры будем рассматривать две взаимосвязанных сети.

Рассмотрим на нескольких усложняющихся примерах особенности риск-анализа таких систем. На данном первом этапе исследований для снижения трудоемкости в качестве сетевой структуры будем рассматривать систему, состоящую из двух взаимосвязанных гауссовых подсистем. В качестве количественной меры корреляционной взаимосвязи будем использовать показатели (13)–(15). В этом случае отказ можно интерпретировать как выход за некоторый диапазон допустимых значений. Будем считать, что все элементы сетей функционируют в одинаковых условиях риска. Это можно трактовать как постоянство дисперсий у всех элементов. Для удобства без потери общности будем считать, что математические ожидания всех элементов равны нулю. Тогда функция плотности вероятности для сетевой структуры с непрерывным гауссовым случайным вектором $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_m)$ будет равна

$$p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}|^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{x}\right\},$$

где

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{X}} = \{\sigma_{X_i X_j}\}_{m \times m} - \text{ковариационная матрица, } \sigma_{X_i X_i} = \sigma^2.$$

Считаем отказом каждого элемента X_i событие B_i – попадание значения вне области допустимых значений $(-A, A)$, $A > 0$. Если элемент $X_i \in \mathbf{X}$ не зависит от остальных элементов вектора \mathbf{X} , то вероятность его стабильной работы и отказа равны соответственно

$$P(\overline{B}_i) = P(-A \leq X_i \leq A) = \int_{-A}^A p_{X_i}(t) dt;$$

$$P(B_i) = P(X_i \notin [-A, A]) = \int_{-\infty}^{-A} p_{X_i}(t) dt + \int_A^{+\infty} p_{X_i}(t) dt;$$

$$p_X(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2}.$$

В свою очередь для \mathbf{X} с коррелированными элементами вероятность отказа любого элемента, например X_1 , вычисляется по формуле

$$P(B_1) = \int_{-\infty}^{-A+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} + \int_{A-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}.$$

Вероятность одновременного отказа нескольких элементов $X_k : k \in T \subseteq \{1, \dots, m\}$

$$P(\bigcup B_k : k \in T \subseteq \{1, \dots, m\}) = \prod_{k \in T} P(B_k).$$

Вычисление определенных интегралов будем выполнять с помощью разложения подынтегральных функций в ряды [20] для $m \leq 4$ или с помощью метода Монте-Карло [21].

Пример 3.

Рассмотрим сетевую структуру в виде двух взаимосвязанных элементов X и Y . Пусть они могут быть представлены стандартными гауссовыми случайными величинами с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Введем между ними коэффициент корреляции ρ . Схематично покажем такую структуру (систему) на рисунке 5.3.

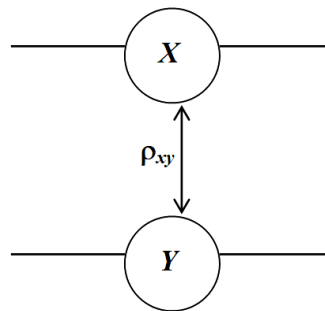


Рисунок 5.3 – Сетевая структура, состоящая из двух взаимосвязанных элементов X и Y

Зададим условия для отказа каждого элемента: $B = \{x : x \notin (-A; A)\}$ – отказ элемента X , $C = \{y : y \notin (-A; A)\}$ – отказ элемента Y .

На рисунке 5.4 приведены зависимости $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от коэффициента корреляции для разных значений порогового уровня A , найденные с помощью численного интегрирования. Из графиков на рисунке 5.2 видим, что с ростом коэффициента корреляции наблюдается тенденция увеличения условной вероятности отказа $P(B|C)$ относительно вероятности отказа $P(B)$, причем она более выражена для больших значений порогового уровня A . Это означает, что вероятность $P(BC)$ быстро увеличивается при росте тесноты корреляции между элементами X и Y .

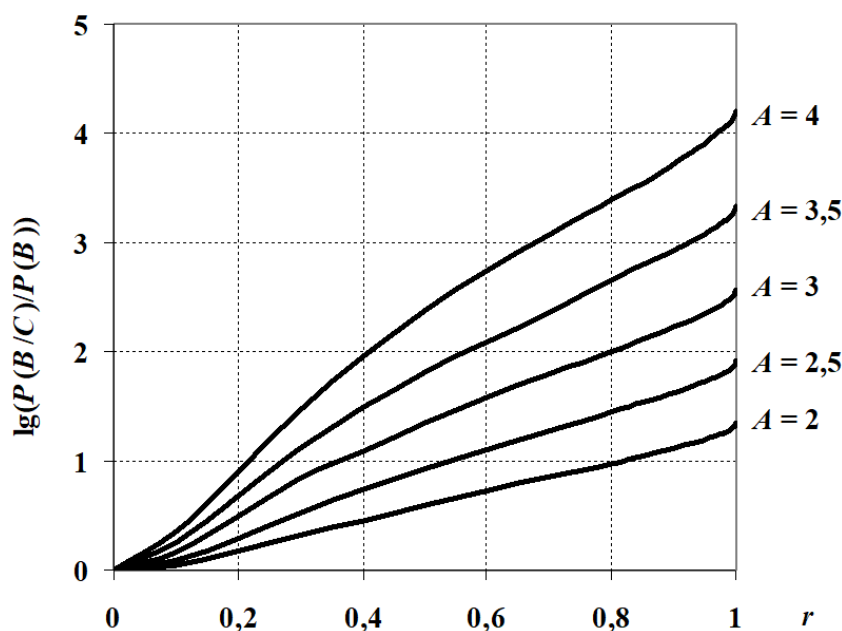


Рисунок 5.4 – Зависимости $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от коэффициента корреляции для разных значений A

Рассмотренный пример 3 показал, что рост взаимосвязи между подсистемами приводит к значительному росту риска каскадного сбоя (в данном случае одновременный отказ X и Y) при функционировании сетевых структур. Причем чем выше опасность ситуации (в данном случае величина A), тем больше растет риск. Это свидетельствует об актуальности задачи оценивания риска сетевой структуры в условиях наличия корреляционной связи между ее подсистемами. Поэтому рассмотрим далее примеры более сложного вида подсистем и наличия корреляционной связи между элементами этих подсистем.

Пример 4.

Рассмотрим сетевую структуру \mathbf{S} в виде двух взаимосвязанных подсистем \mathbf{X} и \mathbf{Y} . Каждая из этих подсистем представляет собой последовательное или параллельное соединение двух элементов (X_1, X_2 для подсистемы \mathbf{X} и Y_1, Y_2 для подсистемы \mathbf{Y}). Таким образом, отказ каждой из подсистем происходит при отказе хотя бы одного из двух ее последовательно соединенных элементов. Под взаимосвязью между подсистемами \mathbf{X} и \mathbf{Y} понимаем корреляционные связи между элементами этих подсистем. Пусть элементы X_1, X_2, Y_1, Y_2 этих подсистем могут быть представлены стандартными гауссовыми случайными величинами с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Введем между ними коэффициенты парной линейной корреляции $\rho_{X_i Y_j}$. Рассмотрим ситуацию, когда отказы у элементов в каждой из подсистем возникают независимо друг от друга, т.е. $\rho_{X_1 X_2} = \rho_{Y_1 Y_2} = 0$. Считаем отказом каждого элемента подсистем \mathbf{X} и \mathbf{Y} попадание значения вне интервала $(-A, A)$, $A > 0$. Пусть для определенности $A = 3$.

Зададим условия для отказа каждого элемента: $B_i = \{x_i \notin (-A; A)\}$ – отказ элемента X_i подсистемы \mathbf{X} , $C_i = \{y_i \notin (-A; A)\}$ – отказ элемента Y_i подсистемы \mathbf{Y} . В данном примере под каскадным сбоем понимаем одновременный отказ подсистем \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Оценку тесноты корреляционной взаимосвязи между элементами системы \mathbf{S} и подсистемами \mathbf{X} и \mathbf{Y} выполним по формулам (5.14) и (5.13), которые здесь примут вид

$$G(X_1 \cap X_2 \cap Y_1 \cap Y_2) = G(\mathbf{S}) = -\frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}| = -\frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_{\mathbf{S}}|; \quad (5.20)$$

$$G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \ln \frac{|\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}|}{|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}| \cdot |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}|}; \quad (5.21)$$

где

$$|\mathbf{R}_{\mathbf{S}}| = |\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \rho_{X_1 Y_1} & \rho_{X_1 Y_2} \\ 0 & 1 & \rho_{X_2 Y_1} & \rho_{X_2 Y_2} \\ \rho_{X_1 Y_1} & \rho_{X_2 Y_1} & 1 & 0 \\ \rho_{X_1 Y_2} & \rho_{X_2 Y_2} & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad |\mathbf{R}_{\mathbf{X}}| = |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}| = 1.$$

Случай 1. Пусть элементы в подсистемах \mathbf{X} и \mathbf{Y} соединены последовательно (рисунок 5.5).

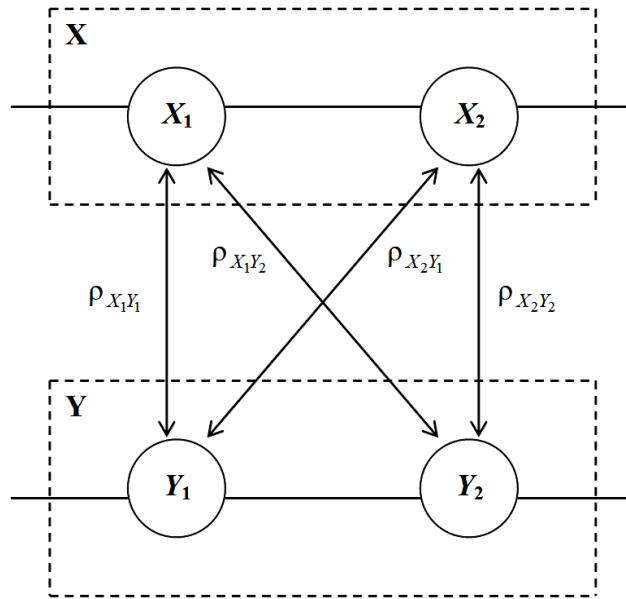


Рисунок 5.5 – Сетевая структура, состоящая из двух взаимосвязанных подсистем X и Y

Условия отказа подсистем выглядят так: $B = B_1 \cup B_2$ – отказ подсистемы X, $C = C_1 \cup C_2$ – отказ подсистемы Y, $B \cdot C = (B_1 + B_2)(C_1 + C_2)$ – одновременный отказ подсистем X и Y, это событие будем считать отказом системы S. Рассмотрим два различных варианта корреляционных связей между элементами разных подсистем.

Вариант 1: Все коэффициенты корреляции между элементами подсистем равны между собой: $\rho_{X_1Y_1} = \rho_{X_1Y_2} = \rho_{X_2Y_1} = \rho_{X_2Y_2}$.

Вариант 2: Коррелированно функционируют между собой только один элемент подсистемы X и один элемент подсистемы Y. Пусть для определенности $\rho_{X_1Y_1} = \rho_{X_2Y_2} \neq 0$, $\rho_{X_1Y_2} = \rho_{X_2Y_1} = 0$.

На рисунках 5.6, 5.7 приведены зависимости $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от показателя $G(X \cap Y)$ для вариантов 1 и 2. Отметим, что для обоих вариантов $\frac{P(B|C)}{P(B)} = \frac{P(C|B)}{P(C)}$.

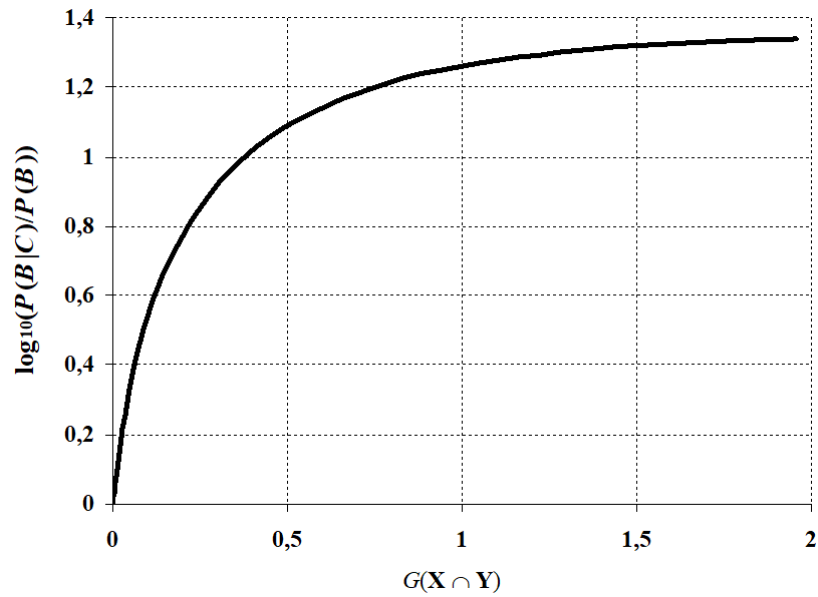


Рисунок 5.6 – Зависимость $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от показателя $G(X \cap Y)$ для варианта 1

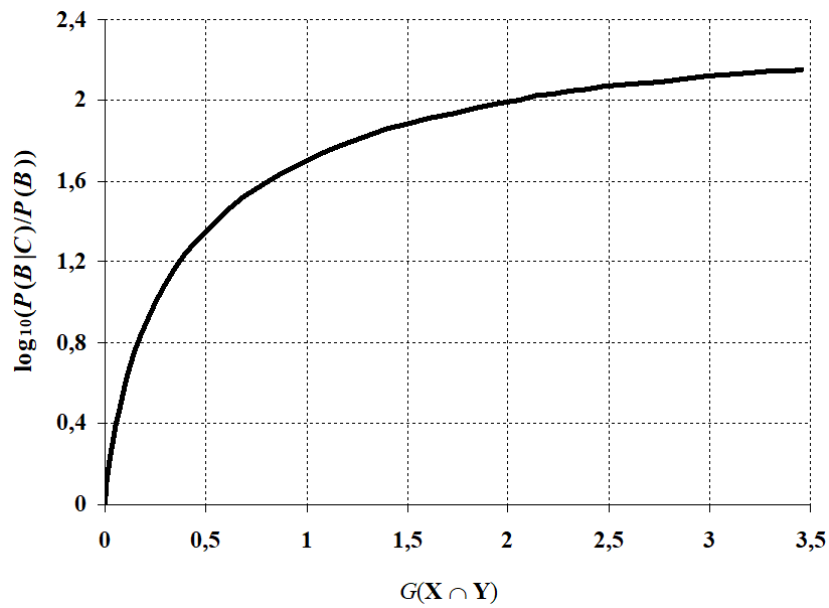


Рисунок 5.7 – Зависимость $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от показателя $G(X \cap Y)$ для варианта 2

Случай 2. Пусть элементы в подсистемах X и Y соединены параллельно (рисунок 5.7).

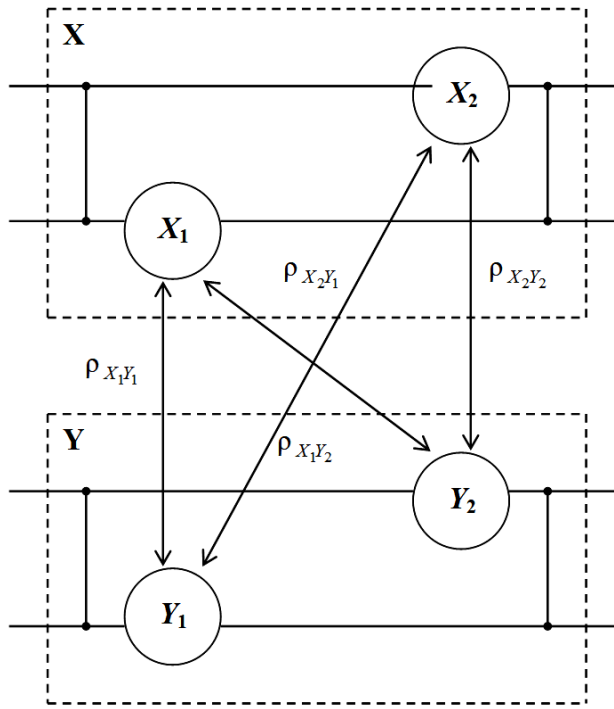


Рисунок 5.7 – Сетевая структура, состоящая из двух взаимосвязанных подсистем **X** и **Y**

Условия отказа подсистем здесь примут вид: $B = B_1 \cap B_2$ – отказ подсистемы **X**, $C = C_1 \cap C_2$ – отказ подсистемы **Y**. Рассмотрим два различных варианта корреляционных связей между элементами разных подсистем.

Вариант 1: Все коэффициенты корреляции между элементами подсистем равны между собой: $\rho_{X_1Y_1} = \rho_{X_1Y_2} = \rho_{X_2Y_1} = \rho_{X_2Y_2}$.

Вариант 2: Коррелированно функционируют между собой только один элемент подсистемы **X** и один элемент подсистемы **Y**. Пусть для определенности $\rho_{X_1Y_1} = \rho_{X_2Y_2} \neq 0$, $\rho_{X_1Y_2} = \rho_{X_2Y_1} = 0$.

На рисунках 5.8, 5.9 приведены зависимости $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от показателя $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$ для вариантов 1 и 2. В обоих вариантах $\frac{P(B|C)}{P(B)} = \frac{P(C|B)}{P(C)}$.

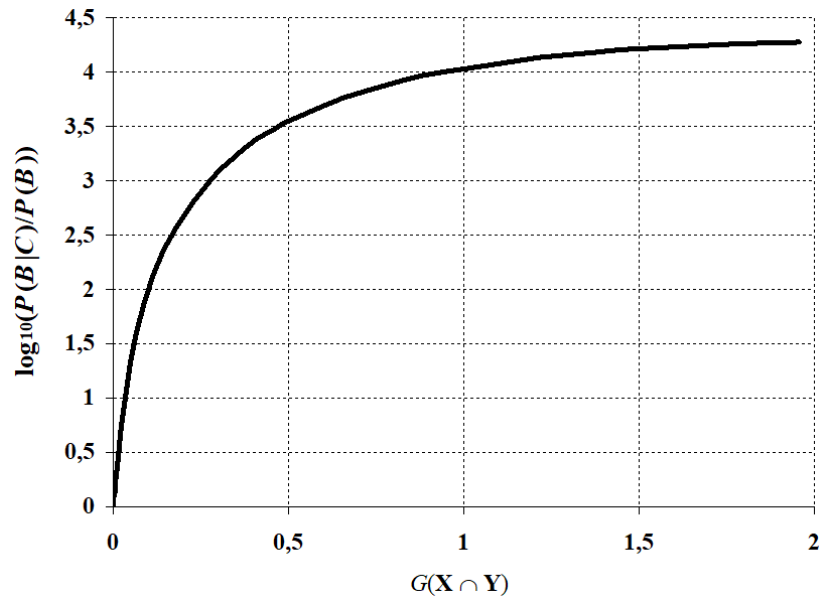


Рисунок 5.8 – Зависимость $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от показателя $G(X \cap Y)$ для варианта 1

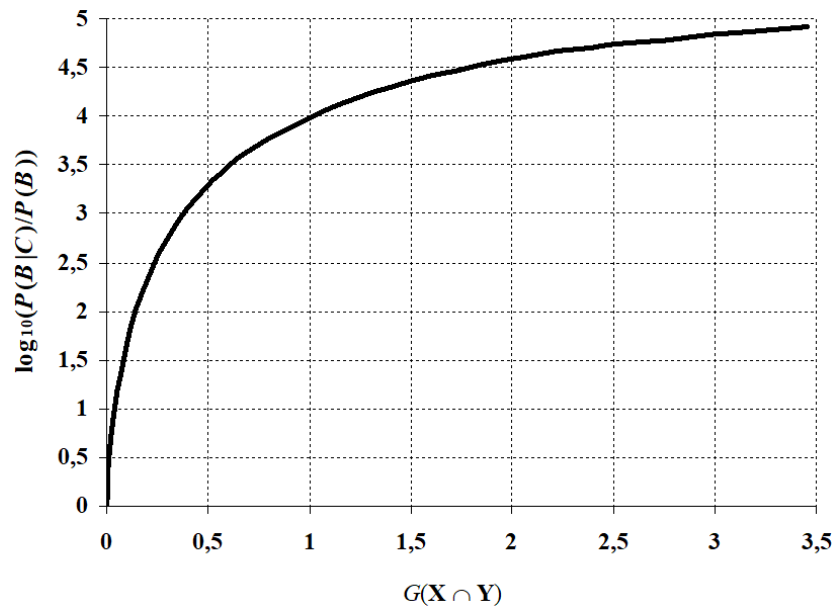


Рисунок 5.9 – Зависимость $\log_{10} \frac{P(B|C)}{P(B)}$ от показателя $G(X \cap Y)$ для варианта 2

Рассмотренные примеры 1, 2 показали следующее. Во-первых, рост тесноты корреляционной взаимосвязи между подсистемами приводит к значительному росту риска при функционировании сетевых структур. При этом условная вероятность отказа любой

из подсистем при отказе другой подсистемы с увеличением $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$ монотонно возрастает и стремится к бесконечности, если $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) \rightarrow \infty$). На основе полученных результатов можно считать, что в условиях тесной корреляционной взаимосвязи между подсистемами в сетевой структуре риск ее отказа значительно растет при отказе других систем, входящих в эту структуру.

Во-вторых, риск отказа любой системы зависит от характеристик надежности элементов системы, а также от тесноты корреляционной взаимосвязи между подсистемами сетевой структуры. В случае отсутствия или слабой корреляционной связи между элементами подсистем в качестве индикатора риска функционирования сетевой структуры может быть энтропийный показатель взаимосвязи между этими подсистемами.

Выше был рассмотрена ситуация, когда отказы у элементов в каждой из подсистем возникают независимо друг от друга. Пусть теперь $\rho_{X_1 X_2} = \rho_{Y_1 Y_2} > 0$. Для ряда различных значений показателей $G(\mathbf{S})$, $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$, $G(\mathbf{X})$ и $G(\mathbf{Y})$ определим вероятности $P(B \cdot C)$. В таблицах 5.7, 5.8 приведены некоторые результаты, отражающие имеющуюся закономерность зависимости риска от тесноты взаимосвязи между подсистемами \mathbf{X} и \mathbf{Y} . Были исследованы ситуации, когда фиксировался один из двух показателей $G(\mathbf{S})$ или $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$, а другой изменялся путем варьирования коэффициентов парной линейной корреляции между элементами системы \mathbf{S} . Видим, что показатель $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$ характеризует величину риска системы и при фиксированных значениях $G(\mathbf{S})$ его увеличение приводит к росту риска. Отметим, что показатель $G(\mathbf{S})$ не подходит в качестве индикатора риска, например:

- для случая 1 и варианта 2 при $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = 0,867$ имеем: 1) $G(\mathbf{S}) = 0,899$ и $P(B \cdot C) = 0,00091$, 2) $G(\mathbf{S}) = 0,974$ и $P(B \cdot C) = 0,00056$;
- для случая 2 и варианта 2 при $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = 1,567$ имеем: 1) $G(\mathbf{S}) = 1,577$ и $P(B \cdot C) = 9,4 \cdot 10^{-7}$, 2) $G(\mathbf{S}) = 1,595$ и $P(B \cdot C) = 4,8 \cdot 10^{-7}$.

Также можно говорить о том, что показатели $G(\mathbf{X})$ и $G(\mathbf{Y})$ влияют на риск системы \mathbf{S} разнонаправлено.

Таблица 5.7 – Случай 1. Вероятности $P(B \cdot C)$ в зависимости от показателей $G(\mathbf{S})$ и $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$

Вариант	$G(\mathbf{S})$	$G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$	$G(\mathbf{X}) = G(\mathbf{Y})$	$P(B \cdot C)$
1	2	3	4	5
1	0,185	0,045	0,0697	0,00009
	0,185	0,144	0,0204	0,00019

Продолжение таблицы 5.7

1	2	3	4	5
	0,454	0,117	0,1688	0,00026
	0,454	0,413	0,0204	0,00049
	0,554	0,144	0,2050	0,00035
	0,612	0,137	0,2374	0,00035
	0,612	0,571	0,0204	0,00062
2	0,342	0,167	0,0872	0,00011
	0,342	0,247	0,0472	0,00020
	0,899	0,867	0,0163	0,00091
	0,974	0,867	0,0538	0,00056
	0,974	0,933	0,0204	0,00090
	1,577	1,528	0,0248	0,00117
	1,577	1,567	0,0050	0,00189

Таблица 5.8 – Случай 2. Вероятности $P(B \cdot C)$ в зависимости от показателей $G(S)$ и $G(X \cap Y)$

Вариант	$G(S)$	$G(X \cap Y)$	$G(X) = G(Y)$	$P(B \cdot C)$
1	0,454	0,117	0,1688	1,1E-07
	0,454	0,413	0,0204	4,3E-07
	0,579	0,571	0,0041	3,4E-07
	0,612	0,137	0,2374	2,1E-07
	0,612	0,571	0,0204	8,3E-07
	0,867	0,162	0,3526	2,8E-07
	0,867	0,857	0,0050	9,6E-07
2	1,344	1,276	0,0341	1,1E-07
	1,344	1,303	0,0204	1,9E-07
	1,577	1,528	0,0248	3,4E-07
	1,577	1,567	0,0050	9,4E-07
	1,595	1,567	0,0138	4,8E-07
	2,415	2,395	0,0102	9,8E-07
	2,415	2,415	0,0002	2,5E-06

Пример 5.

Рассмотрим сетевую структуру S в виде двух взаимосвязанных гауссовых подсистем X и Y , каждая из которых состоит из четырех элементов, являющихся

стандартными гауссовыми случайными величинами. Корреляционная матрица системы S приведена в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Корреляционная матрица сетевой структуры из двух подсистем

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	1	0,7	0,6	0,4	0,8	0,75	0,2	0,2
X_2	0,7	1	0,1	0,5	0,7	0,8	0,2	0,4
X_3	0,6	0,1	1	0,3	0,5	0,5	0,1	0,1
X_4	0,4	0,5	0,3	1	0,4	0,3	0,2	0,2
Y_1	0,8	0,7	0,5	0,4	1	0,6	0,2	0,4
Y_2	0,75	0,8	0,5	0,3	0,6	1	0,1	0,25
Y_3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	1	0,4
Y_4	0,2	0,4	0,1	0,2	0,4	0,25	0,4	1

Определим, насколько уменьшатся энтропийные показатели взаимосвязи $G(S)$ и $G(X \cap Y)$ в результате удаления одного из элементов. Результаты приведены в таблице 5.10. Видим, что наибольшее уменьшение показателей в обоих случаях будет при удалении из системы элементов X_2 и Y_2 .

Таблица 5.10 – Уменьшение энтропийных показателей взаимосвязи $G(X \cap Y)$ и $G(S)$ в результате удаления из системы одного из элементов

Удаляемый элемент	Уменьшение коэффициента взаимосвязи	
	$\Delta G(S)$	$\Delta G(X \cap Y)$
1	2	3
X_1	0,96	0,20
X_2	2,11	1,46
X_3	1,61	1,13
X_4	0,89	0,68
Y_1	1,16	0,88
Y_2	1,76	1,54
Y_3	0,12	0,03
Y_4	0,32	0,16

Далее для всех 28 случаев были определены изменения (уменьшения) показателей $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$ и $G(\mathbf{S})$ при уменьшении одного из парных коэффициентов корреляции между элементами системы на одну и ту же величину, равную, например, 0,03. Результаты для наибольших изменений приведены в таблице 5.11. Отметим, что $\Delta G(\mathbf{S})$ и $\Delta G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$, как видно из (5.20) и (5.21), при варьировании коэффициента корреляции между элементами из разных подсистем изменяются одинаково.

Таблица 5.11 – Уменьшение показателей $G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$, $G(\mathbf{S})$ и вероятности отказа системы $P(D)$ при уменьшении одного из парных коэффициентов корреляции на 0,03

Уменьшение показателя	Уменьшаемый коэффициент корреляции					
	$\rho_{X_2 Y_2}$	$\rho_{X_3 Y_2}$	$\rho_{X_2 Y_1}$	$\rho_{X_2 X_4}$	$\rho_{X_3 Y_1}$	$\rho_{X_3 X_4}$
$\Delta G(\mathbf{S})$	0,643	0,466	0,363	0,344	0,257	0,234
$\Delta G(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$	0,643	0,466	0,363	0,314	0,257	0,215
$\Delta P(D)$	4,6 %	2,4 %	2,1 %	1, %	0,7 %	1,0 %

Продолжим рассмотрение этих 28 случаев. Считаем отказом каждого элемента попадание значения вне интервала $(-A, A)$, $A = 2,5$. В качестве отказа сетевой структуры (каскадного сбоя) будем считать ситуации, когда одновременно отказали хотя бы 3 элемента одной подсистемы и хотя бы два элемента другой подсистемы. Данная ситуация достаточно адекватно моделирует наступление каскадного сбоя. Вероятность отказа для системы \mathbf{S} $P(D) = 0,000545$. Оценим для всех 28 случаев, насколько она изменится при уменьшении одного из парных коэффициентов корреляции на 0,03. Результаты приведены в последней строке таблицы 5.11.

Таким образом, установили, что на риск отказа сетевой структуры в виде каскадного сбоя в первую очередь влияет высокая корреляция между элементами X_2 и Y_2 . Например, уменьшение коэффициента корреляции ρ_{X_2, Y_2} до 0,25 позволит снизить вероятность каскадного сбоя в системе \mathbf{S} на 63,3%, или в 2,72 раза. Отметим, что одновременно у критических элементов присутствует возможность снижения коэффициента парной корреляции между ними (определитель корреляционной матрицы остается положительным).

Следовательно, можно сформулировать следующую гипотезу: *В качестве индикатора риска возникновения каскадных сбоев в сетевой структуре может быть использован энтропийный показатель взаимосвязи между ее подсистемами. Для*

снижения риска возникновения каскадных сбоев в сетевой структуре следует уменьшать тесноту корреляции между наиболее взаимосвязанными элементами подсистем..

5.2.6 Выводы

В рамках векторной энтропийной модели введены новые энтропийные характеристики – энтропийная мера взаимосвязи между несколькими подсистемами и энтропия системы в отдельном узле. Эти характеристики расширяют возможности исследования сетевых структур: позволят оценивать взаимосвязанность между собой различных участков, а также определять, как меняется энтропия внутри таких систем.

Предложенный подход рассчитан на сетевые структуры, представимые в виде корреляционных графов. Например, он может применяться для исследования городских систем, транспортных систем, систем связи, систем промышленной безопасности и т.д. Представляет интерес связать векторное энтропийное моделирование с методами риск-анализа. Рассмотрен частный случай гауссовой сетевой структуры. Для него определение введенных энтропийных характеристик сводится к определению средних квадратических отклонений компонент системы и определителей корреляционных матриц подсистем и всей системы (сетевой структуры).

Предложенный энтропийный показатель может использоваться для исследования сетевых структур, состоящих из множества подсистем. В частности, он может применяться в качестве индикатора критического уровня риска каскадных сбоев во взаимозависимых сетях. Показано, что для снижения риска возникновения каскадных сбоев следует уменьшать тесноту корреляции между наиболее взаимосвязанными элементами подсистем.

5.3 Энтропийно-вероятностный мониторинг сложных систем

Ранее [23] был предложен энтропийный метод распознавания и анализа динамической информации о состоянии сложных региональных систем. Он использовал две стохастические модели – модель многомерного риска и энтропийную модель стохастических систем. Целью данного исследования является практическая реализация метода для мониторинга состояния реальной сложной системы. В качестве такой задачи рассмотрим индивидуальный энтропийно-вероятностный мониторинг функционирования сердечно-сосудистой системы [24].

5.3.1 Введение

И.П. Павлов отмечал, что «животный организм представляет крайне сложную систему, состоящую из почти бесконечного ряда частей, связанных как друг с другом, так и в виде единого комплекса с окружающей природой и находящихся с ней в равновесии» [25, с. 106]. Комплексная оценка здоровья одновременно по нескольким факторам риска, является одной из актуальных и недостаточно изученных проблем в медицине. Часто применяемые в таких случаях экспертные оценки нельзя считать в полной мере объективными [26].

Одним из направлений для комплексного оценивания здоровья может быть использование энтропии, являющейся одной из наиболее универсальных характеристик сложных систем [27, 28]. Такие системы обычно обладают неопределенным (стохастическим) характером поведения и состоят из множества сложным образом взаимосвязанных между собой элементов. При этом все компоненты связаны между собой некоторым образом. Важно указать на то, что имеет место неоднозначность выбора элементов в сложной системе [29, 30]. В этой ситуации ее часто представляют в виде случайного вектора (с.в.) $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, в котором каждая компонента Y_i является одномерной случайной величиной, характеризующей функционирование соответствующего элемента системы [31].

Представляет интерес вопрос использования энтропии для мониторинга систем. В [32] предложено использование энтропийного анализа для мониторинга популяционного здоровья. В его основе является векторное представление дифференциальной энтропии (далее, энтропии). Использование энтропийного анализа позволило понять основные системные причины ухудшения популяционного здоровья, а для формирования рекомендаций по улучшению здоровья, также необходима количественная оценка вклада в его ухудшение каждого из факторов риска [33]. Отметим, что энтропийно-вероятностный (ЭВ) подход, объединяющий энтропийный и риск-анализ, предложен и апробирован для исследования популяций [34]. Поэтому представляет интерес рассмотреть возможности ЭВ моделирования для мониторинга индивидуального состояния здоровья.

Цель исследования – разработать методику энтропийно-вероятностного мониторинга индивидуального состояния здоровья на примере сердечно-сосудистой системы.

5.3.2 Материал и методы

Имеем два множества (случайных вектора): $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)$ – множество входных показателей, $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3)$ – множество факторов риска (выходных показателей) (таблица 5.12). Выбор выходных показателей объясняется следующими причинами. Во-первых, они являются обобщенными показателями, как состояния человеческого здоровья и качества работы сердечнососудистой системы в частности [35, 36]. Во-вторых, эти показатели доступны для измерения. В-третьих, ставилась цель показать возможности предлагаемой методики в целом. Для более глубокого исследования состояния здоровья понадобится большее число наблюдаемых показателей и наблюдение в медицинском учреждении, что в настоящее время осложнено из-за ковидных ограничений. Выбор входных показателей \mathbf{X} обусловлен наличием метеозависимости, проявляющейся в избыточном реагировании человека на изменения условий окружающей среды [37].

Таблица 5.12 – Анализируемые показатели

Обозначение	Показатель
X_1	Атмосферное давление, мм рт. ст.
X_2	Влажность воздуха, %
X_3	Суточное время, % от 24 часов
Y_1	Систолическое артериальное давление (САД), мм рт. ст.
Y_2	Диастолическое артериальное давление (ДАД), мм рт. ст.
Y_3	Частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин

Энтропийный анализ включает в себя следующее. Общая энтропия непрерывного с.в. $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$ определяется по формуле [32]

$$H(\mathbf{Z}) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Z_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Z_k / Z_1 Z_2 \dots Z_{k-1}}^2), \quad (5.22)$$

где

$H(\mathbf{Z})_V = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Z_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i$, $H(\mathbf{Z})_R = 0,5 \cdot \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Z_k / Z_1 Z_2 \dots Z_{k-1}}^2)$ – энтропия хаотичности (энтропия с.в. с взаимно независимыми компонентами) и энтропия самоорганизации (показывает взаимодействие между подсистемами – чем меньше

коэффициент, тем больше корреляционная взаимосвязь между компонентами системы, тем меньше общая энтропия; при наличии функциональной связи между хотя бы двумя компонентами $H(\mathbf{Z})_R = -\infty$, при взаимной независимости всех компонент $H(\mathbf{Z})_R = 0$,

σ_{Z_i} – стандартное отклонение;

$\kappa_i = H(Z_i / \sigma_{Z_i})$ – энтропийный показатель типа закона распределения случайной величины Z_i ;

$R_{Z_k / Z_1 Z_2 \dots Z_{k-1}}^2$ – индексы детерминации регрессионных зависимостей. Разделим энтропию хаотичности на две составляющие

$$H(\mathbf{Z})_V = H(\mathbf{Z})_\sigma + H(\mathbf{Z})_\kappa, \quad (5.23)$$

где

$H(\mathbf{Z})_\sigma = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Z_i}$ – «хаотичности энтропия рассеяния» (характеризует вклад в энтропию хаотичности степени рассеяния всех элементов системы \mathbf{Z}), $H(\mathbf{Z})_\kappa = \sum_{i=1}^m \kappa_i$ – «хаотичности энтропия распределения» (определяет вклад в энтропию хаотичности форм распределения компонент многомерной с.в. \mathbf{Z}), $H(\mathbf{Y})_{\text{comp}} = H(\mathbf{Y})_R + H(\mathbf{Y})_\sigma$ – «энтропия сравнения» (если $H(\mathbf{Y})_\kappa$ неизменна, то $H(\mathbf{Y})_{\text{comp}}$ облегчает восприятие изменения энтропии).

Анализ распределений компонент случайных векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} подтвердил вывод [31] о близости распределений к нормальному закону. Поэтому вместо (5.22) и (5.23) имеем

$$H(\mathbf{X})_\sigma = \sum_{i=1}^3 \ln \sigma_{X_i}; \quad H(\mathbf{X})_\kappa = 3 \ln \sqrt{2\pi e} = 4,257; \quad H(\mathbf{X})_R = \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_X|. \quad (5.24)$$

$$H(\mathbf{Y})_\sigma = \sum_{i=1}^3 \ln \sigma_{Y_i}; \quad H(\mathbf{Y})_\kappa = 3 \ln \sqrt{2\pi e} = 4,257; \quad H(\mathbf{Y})_R = \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_Y|. \quad (5.25)$$

Отметим, что между энтропией самоорганизации и теснотой корреляционной связи между компонентами с.в. \mathbf{X} и \mathbf{Y} существует взаимно однозначная функциональная связь.

Энтропия взаимосвязи $H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$ между векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} позволит количественно оценивать влияние метеорологических факторов на состояние сердечно-сосудистой системы. Она изменяется от 0 (соответствует независимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y}) до $+\infty$ (в

случае, когда хотя бы один из показателей Y_j функционально связан с хотя бы одним показателем X_i). Для гауссовых случайных векторов [34]

$$H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \ln \frac{|\mathbf{R}_{\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}}|}{|\mathbf{R}_{\mathbf{X}}| \cdot |\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}|}. \quad (5.26)$$

Вероятность неблагоприятного исхода $P(D)$ (вероятность перехода испытуемого в «риск-зону» по факторам риска Y_1, Y_2, Y_3 относительно пороговых уровней) как [33]

$$P(D) = P(\mathbf{Y} \in D), \quad D = \left\{ \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m) : \sum_{j=1}^m \frac{(y_j - \theta_j)^2}{b_j^2} \geq 1 \right\}. \quad (5.27)$$

Абсолютное и относительное изменение риска за счет добавления фактора Y_k равно

$$\Delta P(Y_k) = P(\mathbf{Y} \in D) - P(\mathbf{Y}_k^- \in D), \quad \delta P(Y_k) = \Delta P(Y_k) / P(\mathbf{Y}_k^- \in D), \quad (5.28)$$

где

$$\mathbf{Y}_k^- = (Y_1, \dots, Y_{k-1}, Y_{k+1}, \dots, Y_m).$$

5.3.3 Результаты исследования и их обсуждение

В качестве исходных данных использовались ежедневные показания двух человек (испытуемый 1 – мужчина, 47 лет; испытуемый 2 – мужчина, 60 лет), давших согласие на участие в экспериментах. Поскольку мы рассматриваем не популяционный, а индивидуальный мониторинг, то число испытуемых не существенно (у каждого испытуемого могут быть свои индивидуальные особенности в зависимости от возраста и т.п., а значит и разные исследуемые показатели). С учетом того, что ставилась задача описания методики в целом, такого числа испытуемых достаточно. Измерения артериального давления и пульса проводили в соответствии с клиническими рекомендациями [38] с помощью тонометра Sanitas SBC 23: погрешность измерения давления ± 3 мм рт. ст.; погрешность измерения пульса ± 5 %. Погодные условия фиксировались с сайта <https://www.gismeteo.ru/>. Результаты наблюдений и состояние здоровья испытуемых контролировались квалифицированным врачом-терапевтом.

Количество наблюдений для испытуемых составило 87 и 285 измерений (в среднем более 50 измерений в месяц) достаточно для имеющейся погрешности тонометра. Анализ проводился с помощью программы [39].

ЭВ мониторинг показателей сердечно-сосудистой системы для испытуемого 1.

В таблице 5.13 представлены средние уровни САД, ДАД, ЧСС, энтропийные коэффициенты, показатели риск-анализа в различное время дня (утро, день, вечер) и в период до и после 21.02.22. Проведение анализа до и после 21.02.22 обусловлено тем, что по данным анамнеза после 21.02.22 произошло существенное изменение в состоянии здоровья испытуемого 1 вследствие стресса. У испытуемого 1 не было медицинских оснований учитывать влияние на сердечно-сосудистую систему климатических условий, поэтому энтропийный анализ взаимосвязи между входными показателями X и факторами риска Y не проводился.

Таблица 5.13 – Результаты ЭВ мониторинга показателей сердечно-сосудистой системы испытуемого 1 в различные временные периоды

Показатель	31.01.22– 20.03.22	31.01.22– 21.02.22	22.02.22– 20.03.22	Утро	День	Вечер
1	2	3	4	5	6	7
n	84	47	37	39	21	24
Y_1	153,1±0,9	149,95±0,97	157,0±1,4*	153,8±1,2	152,05±1,89	152,8±1,9
$M±m$ (σ)	(8,28)	(6,65)	(8,52)	(7,53)	(8,64)	(9,3)
Y_2	94,1±0,76	92,1±0,76	96,6±1,32**	97,2±0,91	90,7±1,48*	92,0±1,43^^
$M±m$ (σ)	(6,96)	(5,21)	(8,04)	(5,7)	(6,78)	(6,99)
Y_3	72,7±0,81	71,4±0,87	74,2±1,46	72,8±1,41	73,2±1,43	71,9±1,19
$M±m$ (σ)	(7,45)	(5,97)	(8,85)	(8,81)	(6,55)	(5,85)
$H(Y)_R$	-0,35	-0,23	-0,44	-0,31	-0,63	-0,45
$H(Y)_\sigma$	6,04	5,30	6,37	5,896	5,88	5,88
$H(Y)_\kappa$	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26
$H(Y)_v$	10,30	9,56	10,62	10,15	10,13	10,13
$H(Y)$	9,95	9,32	10,18	9,85	9,5	9,68
$H(Y)_{comp}$	5,7	5,07	5,92	5,59	5,24	5,425
$P(D)$	0,397	0,171	0,631*	0,503	0,275	0,305
$\delta P(Y_1), \%$	24,5	25,0	20,2	13,2	48,7	58,1
$\delta P(Y_2), \%$	22,05	23,5	13,9	37,7	6,8	11,5

Продолжение таблицы 5.13

1	2	3	4	5	6	7
$\delta P(Y_3), \%$	68,4	136,0	55,6	62,5	82,4	49,7
<p>Примечание. M – средняя (арифметическая) величина; m – средняя ошибка средней величины; σ – стандартное отклонение; n – количество значений САД, ДАД, ЧСС; ** – $p < 0,01$ при сравнении представленной группы с предыдущей по временному периоду (анализ проводился для САД, ДАД, ЧСС, $P(D)$); * – $p < 0,001$; ^^ – $p < 0,01$ при сравнении между группами «Утро» / «Вечер» для САД, ДАД, ЧСС; n – количество измерений.</p>						

Уровни для риск-анализа определим так: оптимальный – среднее арифметическое из всех измерений, пороговые уровни (верхний/нижний) – $\pm\sigma$ (σ – стандартное отклонение), критические уровни (верхний/нижний) – $\pm 2\sigma$. Использование уровней для риск-анализа на основании клинических рекомендаций (например, оптимальный уровень артериального давления 120/80 мм рт.ст., верхние пороговые и критические уровни, соответствующие 1 и 3 степеням артериальной гипертензии и т.д.) в данном случае не удобно, т.к. из-за высоких значений артериального давления у испытуемого вероятность $P(D)$, например, за весь период будет равна 0,998, что затрудняет проведение анализа.

Анализ по средним величинам показывает, что утром выше средний уровень ДАД в сравнении с дневным (на 7,2 %) и вечерним (на 5,6 %) временем при неизменных САД и ЧСС. При этом риск-анализ фиксирует существенное снижение $P(D)$ с 50,3 % до 27,5 %. Изменение энтропии аналогично – $H(Y)_{\text{comp}}$ уменьшилась с 5,59 до 5,24 при существенном снижении энтропии самоорганизации (с –0,31 до –0,63), что свидетельствует об усилении внутренних взаимосвязей и стабилизации функционирования сердечно-сосудистой системы в дневное время. Более существенное изменение показателей риск-анализа в сравнении с анализом по отдельным подсистемам позволяет выявить более «тонкие» изменения, особенно при недостатке данных (малом числе наблюдений).

После 21.02.22 достоверно увеличились уровни САД (на 4,7 %), ДАД (на 4,9 %). При этом $H(Y)_{\text{comp}}$ возросла с 5,07 до 5,92 (на 16,7 %) с уменьшением $H(Y)_R$ с –0,23 до –0,44 (стабилизация на более «негативном» уровне). Риск возрос еще больше: $P(D)$ увеличилась с 17,1 % до 63,1 % ($p < 0,001$). Дату 21.02.22, после которой произошло существенное ухудшение показателей сердечно-сосудистой системы, мы знали из данных анамнеза.

Применим далее ЭВ мониторинг для периодов с равным количеством измерений ($n = 30$) и «перекрытием» смежных групп, т.е. группы с номерами измерений 1–30, 16–45, 31–60, 46–75, 61–84. Результаты представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14. Результаты ЭВ мониторинга показателей сердечно-сосудистой системы испытуемого 1 для периодов с равным количеством измерений

Показатель	Период 1	Период 2	Период 3	Период 4	Период 5
Интервал	31.01- 13.02.22	08.02- 20.02.22	14.02- 02.03.22	21.02- 15.03.22	03.03- 20.03.22
n	1-30	16-45	31-60	46-75	61-84
Y_1 $M \pm m$ (σ)	148,25±1,29 (7,05)	150,4±1,33 (7,3)	152,5±1,31 (7,16)	155,5±1,59 (8,72)	159,9±1,3*** (6,37)
Y_2 $M \pm m$ (σ)	91,1±1,04 (5,68)	91,75±0,79 (4,35)	94,05±1,22 (6,71)	96,1±1,59 (8,73)	97,9±1,44 (7,08)
Y_3 $M \pm m$ (σ)	71,9±1,23 (6,74)	72,0±1,15 (6,28)	74,3±1,35 (7,39)	74,75±1,6 (8,78)	71,5±1,69 (8,28)
$H(Y)_R$	-0,28	-0,21	-0,23	-0,5	-0,58
$H(Y)_\sigma$	5,55	5,24	5,82	6,45	5,86
$H(Y)_\kappa$	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26
$H(Y)_v$	9,8	9,5	10,08	10,71	10,12
$H(Y)$	9,52	9,29	9,85	10,21	9,54
$H(Y)_{\text{comp}}$	5,27	5,04	5,59	5,95	5,28
$P(D)$	0,204	0,198	0,395	0,61	0,599

Примечание.

M – средняя (арифметическая) величина;

m – средняя ошибка средней величины;

σ – стандартное отклонение;

n – номера измерений САД, ДАД, ЧСС;

*** – $p < 0,05$ при сравнении представленной группы с предыдущей (анализ проводился для САД, ДАД, ЧСС).

При однофакторном анализе (по одному показателю в отдельности) обнаружено только достоверное увеличение САД на 2,8 % в группе № 5 относительно периода № 4. Определить момент, когда произошло резкое изменение в системе при анализе по одному показателю в отдельности не представляется возможным. При динамическом энтропийно-

вероятностном анализе в периоде 3 зафиксирован рост $H(Y)_{\text{comp}}$ на 10,9 % с 5,04 до 5,59. Показатели риск-анализа фиксируют еще более выраженные изменения при переходе из периода № 2 в № 3 – рост $P(D)$ с 19,8 % до 39,5 %. Уменьшение $H(Y)_R$ с $-0,23$ в периоде № 3 до $-0,5$ в периоде № 4 при одновременном росте остальных энтропийных коэффициентов и риска $P(D)$ показывает стабилизацию системы на более «негативном» уровне. Таким образом, метод ЭВ мониторинга в отличие от однофакторного анализа позволяет выявить момент, когда в системе произошел качественный сдвиг (резкое ухудшение) – это середина интервала 14.02.22–02.03.22, что совпадает, в том числе с данными анамнеза (22.02.2022) (см. таблицу 5.13).

ЭВ мониторинг показателей сердечно-сосудистой системы для испытуемого 2.

У испытуемого 2 были основания учитывать влияние климатических условий на факторы риска. Поэтому показатели X_i фиксировались, и проводился энтропийный анализ взаимосвязи между входными показателями X и факторами риска Y . Вместо таблиц, аналогичных таблицам 5.13, 5.14, для наглядности представим результаты мониторинга состояния его здоровья в графическом виде (рисунки 5.10–5.12). Весь диапазон был разбит на 8 интервалов: $k = 1$ (01.11.21–20.11.21), $k = 2$ (21.11.21–10.12.21), $k = 3$ (11.12.21–31.12.21), $k = 4$ (01.01.22–20.01.22), $k = 5$ (21.01.22–10.02.22), $k = 6$ (11.02.22–28.02.22), $k = 7$ (01.03.22–20.03.22), $k = 8$ (21.03.22–10.04.22). Следует отметить, что испытуемому 2 в начале февраля была сделана операция, не связанная с сердечно-сосудистой системой.

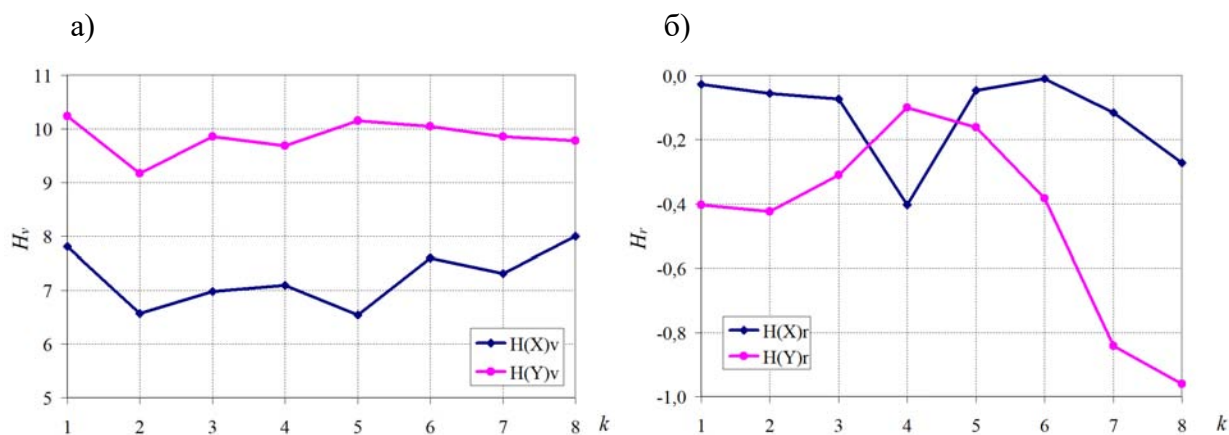
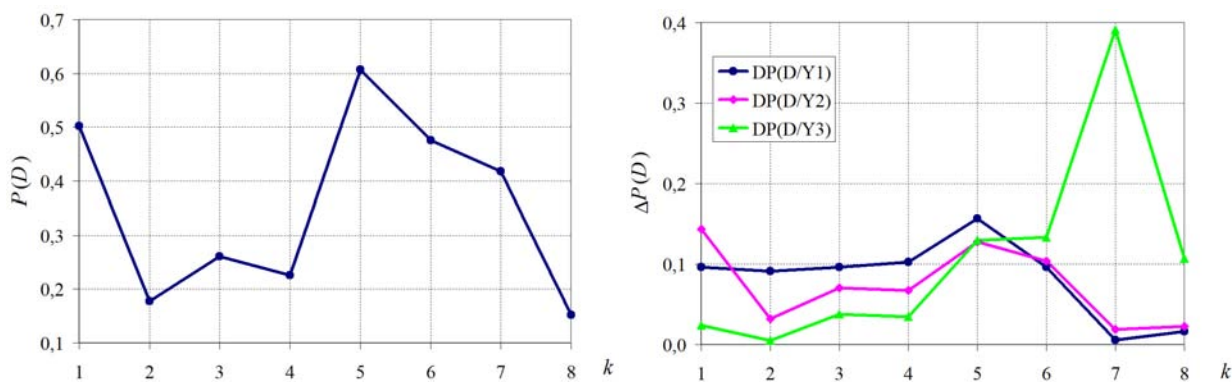


Рисунок 5.10 – Значения энтропий для множеств показателей X и Y : а) энтропии хаотичности $H(X)_V$ и $H(Y)_V$; б) энтропий самоорганизации $H(X)_R$ и $H(Y)_R$

Из рисунка 5.10, а видно, что энтропии хаотичности, как входных показателей, так и факторов риска, ведут себя достаточно стабильно. Энтропия самоорганизации (см. рисунок 5.10, б) входных показателей близка к нулю (соответствует их независимости),

однако в начале года было некоторое уменьшение, вызванное случайным появлением корреляции между влажностью воздуха и суточным временем фиксации данных (эту корреляцию можно считать нонсенс-корреляцией, обусловленной фактором случайности). Энтропия самоорганизации вначале растет до конца января, а затем начинает стабильно уменьшаться (все три фактора риска становятся взаимно более коррелированными), что может быть охарактеризовано как их более согласованное поведение. А одновременное снижение риска (рисунок 5.11, а) позволяет утверждать об улучшении функционирования сердечно-сосудистой системы. Влияние САД и ДАД на вероятность $P(D)$ с февраля стала стабильно уменьшаться (рисунок 5.11, б). Скачок роста $\Delta P(Y_3)$ из-за ЧСС вызван увеличением физической нагрузки и к концу анализируемого периода он существенно уменьшился.



а) б)

Рисунок 5.11 – Риск-анализ сердечно-сосудистой системы по показателям Y : а) значения риска $P(D)$; б) абсолютные изменения риска $\Delta P(Y_k)$ за счет каждого из факторов риска Y_k

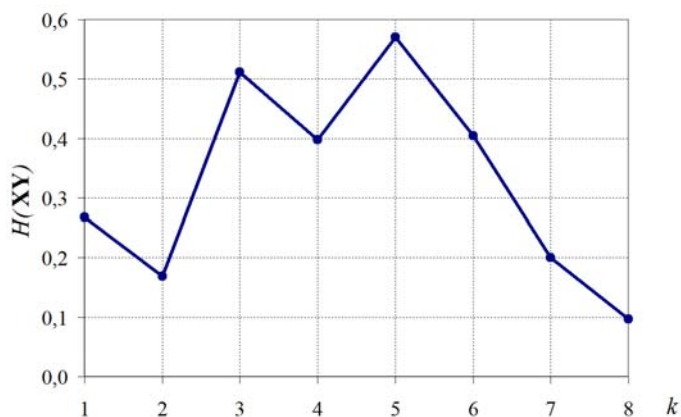


Рисунок 5.12 – Значения энтропии взаимосвязи $H(X \cap Y)$

Как видно из рисунка 5.12, энтропия взаимосвязи между атмосферным давлением, влажностью воздуха и суточным временем и факторами риска в декабре – январе увеличилась, а с середины февраля стала монотонно уменьшаться (факторы риска в меньшей степени стали зависеть от климатических условий), что также можно характеризовать как улучшение работы сердечно-сосудистой системы.

5.3.4 Выводы

1) Индивидуальный энтропийно-вероятностный мониторинг позволяет обнаружить момент существенного изменения функционирования сердечно-сосудистой системы и определить, какие из множества факторов на это повлияли (через анализ энтропии взаимосвязи). Полагаем, что индивидуальный энтропийно-вероятностный мониторинг обладает универсальностью и может использоваться в других областях клинической медицины, особенно в тех, где постоянно с использованием информационных технологий фиксируется большое количество параметров функционирования разных систем, например, в функциональной диагностике, в реанимационной практике и др.

2) Наряду с риск-анализом и энтропийным анализом имеется возможность совместного анализа различных исследуемых показателей с множеством входных показателей, оказывающих влияние на состояние здоровья конкретного человека.

3) Методика апробирована на примере сердечно-сосудистой системы. Результаты энтропийно-вероятностного мониторинга согласуются с данными о фактическом состоянии здоровья испытуемых.

5.4 Заключение к разделу 5

Целью данного раздела являлись развитие теории векторного энтропийного моделирования применительно к сетевому представлению систем критичных инфраструктур, а также практическая апробация вероятностно-энтропийной модели многомерного риска применительно к задачам мониторинга состояния сложных систем.

В результате исследования в рамках данного этапа работ получены следующие новые научные результаты.

1) Введены новые энтропийные характеристики – энтропийная мера взаимосвязи между несколькими подсистемами и энтропия системы в отдельном узле. Эти характеристики расширяют возможности исследования сетевых структур: позволяют

оценивать взаимосвязанность между собой различных участков, а также определять, как меняется энтропия внутри таких систем.

2) Рассмотрен частный случай гауссовой сетевой структуры. Для него определение введенных энтропийных характеристик сводится к определению средних квадратических отклонений компонент системы и определителей корреляционных матриц подсистем и всей системы (сетевой структуры).

3) Предложенный энтропийный показатель может использоваться для исследования сетевых структур, состоящих из множества подсистем. В частности, он может применяться в качестве индикатора критического уровня риска каскадных сбоев во взаимозависимых сетях.

4) Вероятностно-энтропийная модель многомерного риска апробирована на примере индивидуального энтропийно-вероятностного мониторинга функционирования сердечно-сосудистой системы.

6 Разработка методологии прогнозирования ресурса узлов трения машин на основе моделирования изнашивания

Аннотация. Представлен обзор методов, которыми могут быть определены свойства граничных слоёв смазочных материалов.

Рассмотрен этап физического моделирования получением диаграмм Герси–Штрибека для ПС. В результате определен диапазон значений характеристики режима работы подшипника, в котором происходит смена режимов смазки в подшипнике при использовании вполне конкретных смазочных и конструкционных материалов, необходимый для верификации результатов математического моделирования.

Представлены результаты ускоренных испытаний с измерением износа деталей цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма двигателей ЗМЗ-53

Показано, что при постановке задачи по оценке ресурса сложнонагруженных ПС на ранних этапах проектирования машин вероятностный характер процессов изнашивания может быть учтён путём использования универсального метода определения плотности распределения ресурса – метода статистического моделирования (метод Монте–Карло), при применении которого случайные величины начального износа (приведённого к началу эксплуатации после приработки), скорости изнашивания, моменты концов реализаций износа подчиняются своим законам распределения.

6.1. Введение

Разработанная методология, в отличие от известных [13], основана на углублённых экспериментальных исследованиях вязкостно-температурных, реологических и противоизносных свойств СМ, микрогеометрии поверхностей трения, а также на физическом и математическом моделировании узлов трения машин (в частности, подшипников скольжения, далее ПС) (рисунок 6.1).



Рисунок 6.1 – Концепция оценки ресурса динамически нагруженных сопряжений поршневых и роторных машин

6.2. Исследование свойств смазочного материала

При проектировании машин одной из важнейших задач является обоснование выбора СМ прежде всего по вязкостно-температурным свойствам. Однако, как было показано ранее, уровень противоизносных свойств СМ также требует обоснованного выбора.

Вязкостно-температурным и реологическим свойствам СМ, а именно моторных масел, посвящены наши отдельные исследования [25, 19]. Отметим здесь, что важным является определение свойств СМ в широком диапазоне скоростей сдвига и температур. В своих исследованиях мы использовали ротационный вискозиметр Rheotest RN 4.1 для исследования вязкостно-температурных свойств масел при скоростях сдвига до 10^4 с^{-1} , а также имитатор конического подшипника Tannas TBS для определения НТНС вязкости моторных масел [8].

Общий вид вискозиметра Rheotest RN 4.1 представлен на рисунке 6.2.



Рисунок 6.2 – Ротационный вискозиметр Rheotest RN 4.1:
1 – вискозиметр; 2 – блок управления; 3 – измерительные системы; 4 – криостат; 5 – термостатирующие сосуды

Наибольшую техническую сложность представляет определение зависимости вязкости СМ от давления при различных температурах. Для этого требуется специальные вискозиметры [1–3, 5].

В открытой литературе начали появляться работы, посвящённые экспериментальным исследованиям зависимости вязкости современных моторных масел одновременно от температуры, давления и скорости сдвига (рисунок 6.3) [3].

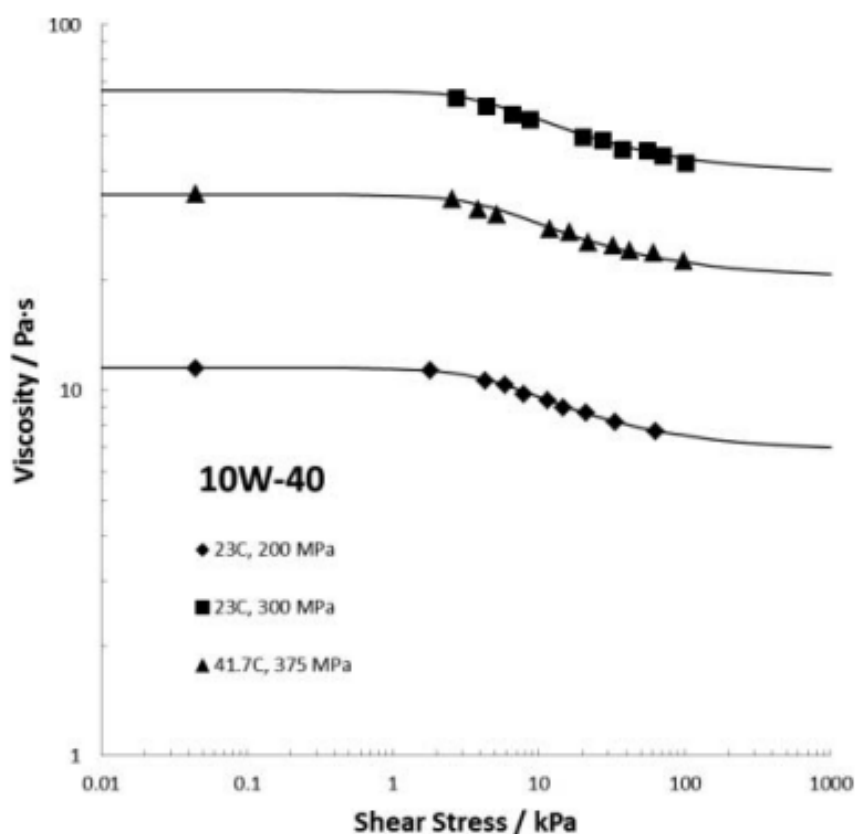


Рисунок 6.3 – Зависимость вязкости моторного масла от скорости сдвига и давления по данным работы [3]

Важнейшим этапом является определение параметров адсорбционного граничного слоя СМ. Обзор методов, которыми могут быть определены свойства граничных слоёв СМ, представлен в работе Ахматова А.С. [11]. Для ряда моторных масел класса вязкости SAE 10W-40 нами были определены значения параметра l_h (таблица 6.1) методом, описанным в [30].

Таблица 6.1 – Значения параметра l_h , для некоторых моторных масел

№	Смазочный материал	$l_h, 10^{-9}$ м
1	Моторное масло Shell Rimula R3X	52
2	Моторное масло ТНК RevolutD2	43
3	Моторное масло Mobil Delvac XHP	30

Перспективным для определения параметров адсорбционного граничного слоя следует считать метод, основанный на принципе регистрации светопропускания лазерного излучения слоем СМ, который был предложен А.Г. Железновым и др. [18, 12]. Ряд

экспериментальных установок для исследования тонких слоёв СМ был предложен Алтойзом Б.А. [10].

6.3. Физическое моделирование подшипника скольжения

Физическое моделирование ПС является, по нашему мнению, залогом успешного решения задач по оценке их ресурса, необходимо для обоснования исходных данных, принимаемых для дальнейшего математического моделирования.

Одним из первых этапов физического моделирования является получение диаграмм Герси–Штрибека для ПС. В результате определяется диапазон значений характеристики режима работы подшипника, в котором происходит смена режимов смазки в подшипнике при использовании вполне конкретных смазочных и конструкционных материалов. Эта информация необходима для верификации результатов математического моделирования.

В результате получения диаграмм Герси–Штрибека происходит приработка поверхностей трения ПС и формируется равновесная шероховатость, обусловленная свойствами конструкционных и смазочных материалов, условиями нагружения. Статистическая обработка результатов измерений шероховатостей поверхностей шейки вала и вкладыша после экспериментов позволяет обосновать значение предельно допустимой (критической) толщины смазочного слоя для данного ПС. Могут быть проведены дополнительные исследования влияния предполагаемых в эксплуатации СМ на шероховатость поверхностей трения ПС. Подобные исследования были выполнены в лаборатории «Триботехника» ЮУрГУ А.А. Дойкиным [17] и являются весьма ценными с точки зрения обоснования критической толщины смазочного слоя ПС. Исследования показали, что равновесная шероховатость зависит от применяемого смазочного материала (таблица 6.2). На рисунке 6.4 представлены снятые в одном масштабе и совмещенные профилограммы поверхностей диска и колодки после эксперимента.

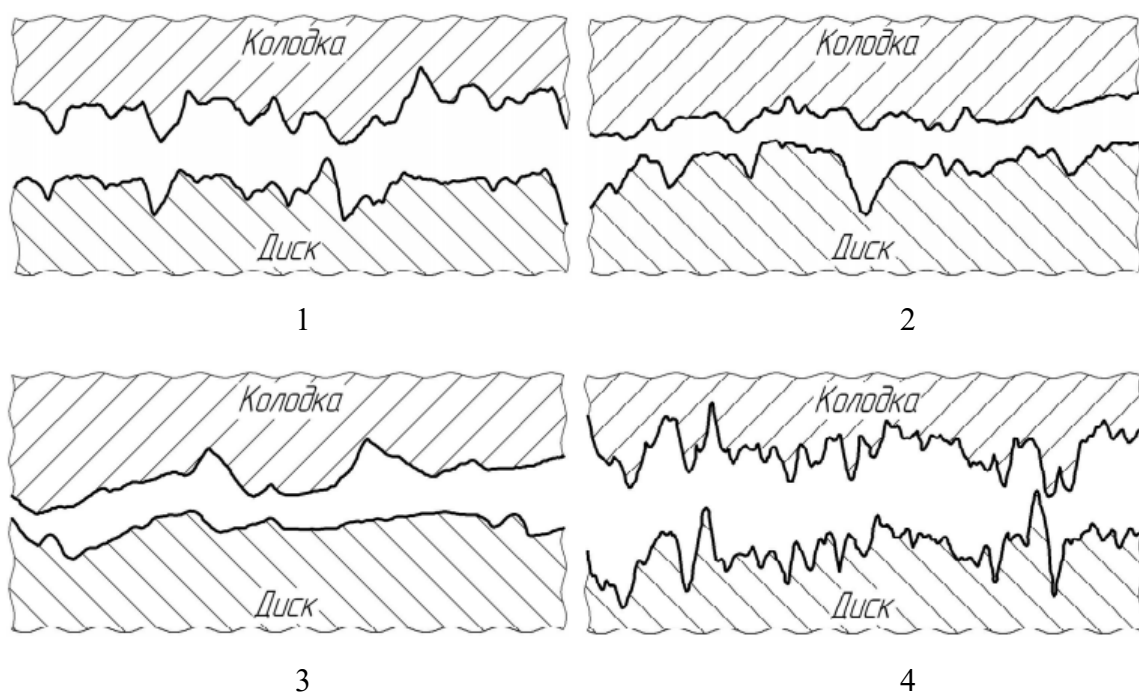


Рисунок 6.4 – Влияние смазочного материала на формирование равновесной шероховатости в процессе трения:

1 – после работы на моторном масле М-10ДМ при начальном значении параметра шероховатости $R_a = 1,29$ мкм; 2 – после работы на моторном масле М-10ДМ при начальном значении параметра шероховатости $R_a = 0,22$ мкм; 3 – после работы на моторном масле Shell Rimula R3X при начальном значении параметра шероховатости $R_a = 0,93$ мкм; 3 – после работы на моторном масле Mobil Delvac XHP при начальном значении параметра шероховатости $R_a = 1,27$ мкм

Таблица 6.2 – Результаты экспериментов [17]

№ эксп.	Марка масла	I_h	f	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм	S_m , мкм
1	2	3	4	5	6	7	8
1	М-10ДМ	$2,248 \cdot 10^{-10}$	0,071	1,29 ¹⁾	6,67	9,68	125,77
				2,58 ²⁾	17,04	21,28	78,52
2	М-10ДМ	$0,409 \cdot 10^{-10}$	0,136	0,22	2,16	4,10	39,44
				2,91	19,36	25,46	83,92
3	Shell Rimula R3X	$1,363 \cdot 10^{-10}$	0,108	0,93	6,69	9,09	65,46
				3,67	17,84	24,75	168,47

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8
4	Mobil Delvac	$3,788 \cdot 10^{-10}$	0,116	1,27	8,00	10,60	69,25
	ХНР			2,61	17,55	25,25	86,48
<p>Примечание.</p> <p>1) – значение параметра до эксперимента;</p> <p>2) – значение параметра после эксперимента.</p>							

Из рисунка 6.4 видно, что «независимо от начальной шероховатости приработанные поверхности диска и колодки комплементарны» [17]. Под комплементарностью поверхностей трения понимается «взаимодополнение» профилей диска и колодки, когда напротив выступа на поверхности диска находится соответствующая впадина на поверхности колодки, а напротив впадины – соответствующий выступ. Отдельной задачей при физическом моделировании является оценка интенсивности изнашивания поверхностей трения, которая также определяется применяемым смазочным материалом, как видно из таблицы 6.2.

Для полноты исследования влияния свойств СМ на режимы смазки сопряжений машин необходимо также оценить значение критической температуры предполагаемых СМ в результате проведения триботехнических испытаний [6].

Конечно, сказанное выше не исчерпывает всего объёма исследований при физическом моделировании ПС для решения задач оценки ресурса. В каждом конкретном случае объём исследований может дополняться в зависимости от преследуемых целей.

6.4. Математическое моделирование изнашивания подшипника скольжения

Математическое моделирование процессов изнашивания ПС на ранних этапах проектирования машин позволяет решать широкий круг задач – выбрать и обосновать оптимальные (с применением соответствующих методов оптимизации) конструктивные параметры деталей ПС, обеспечивающие минимальную скорость изнашивания поверхностей трения; подобрать износостойкие материалы и методы упрочнения; обосновать требования к физико-механическим свойствам конструкционных и смазочных материалов сопряжения; установить предельные износы шейки вала и втулки; определить неблагоприятные режимы эксплуатации ПС и оптимальные режимы технического обслуживания и контроля их состояния; сформулировать требования к системе

фильтрации смазочного материала; провести сравнительную оценку ресурса ПС различного конструктивного исполнения [21, 24]. Решение этих задач позволяет заложить основы будущей износостойкости машины.

Результатом процессов изнашивания в ПС является износ шейки вала и втулки, который выражается в изменении их геометрических размеров или появлении на поверхностях трения дефектов. Поскольку ПС являются опорными узлами машин, вращательными кинематическими парами (низшими), связывающими звенья механизмов машин в кинематические цепи, то техническое состояние ПС во многом определяет стабильность работы машины, её энергоэффективность и безопасность.

В связи с этим, под ресурсом ПС понимается время его работы до достижения предельного состояния, то есть состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация нецелесообразна или невозможна по причинам опасности, экономическим или экологическим.

Исходя из анализа условий работоспособности и долговечности сопряжений, первоочередной задачей при оценке ресурса ПС является обоснование значений предельного и допустимого износа с учётом особенностей конкретной машины.

6.4.1. Обоснование предельного износа подшипника

Как правило, предельное состояние подшипников характеризуется увеличением зазора свыше допустимого значения в результате износа. В поршневых машинах, таких как ДВС, это проявляется в виде стуков и ударных нагрузок на подшипники, снижения давления в системе смазывания. В роторных машинах, таких как турбокомпрессоры, турбогенераторы это проявляется в повышении амплитуды колебаний ротора на смазочном слое, что также приводит к выходу из строя машины в целом.

Учитывая, что износ подшипников проявляется в изменении их геометрических размеров и ухудшении условий для возникновения гидродинамического режима смазки, на ранних стадиях проектирования новых машин предельный износ предлагается определять путём сравнения ГМХ подшипника, рассчитанных для одного или нескольких характерных режимов работы при варьировании радиального зазора, с допустимыми значениями – с допустимой минимальной (критической) толщиной смазочного слоя и с допустимыми гидродинамическими давлениями. При необходимости могут быть выполнены расчёты оценки влияния противоизносных свойств смазочного материала на предельный зазор в ПС.

Для автотракторных ДВС предельно допустимые параметры ПС коленчатого вала были обоснованы Ю.В. Рождественским [28] (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Предельно допустимые параметры нагруженности опор скольжения коленчатого вала автотракторных ДВС [28]

Группы двигателей	Параметры нагруженности											
	Максимальная удельная нагрузка f_{\max} , МПа				Приведенная к диаметру шейки минимальная толщина смазочного слоя, мкм/100 мм				Наибольшее гидродинамическое давление в смазочном слое $\sup p_{\max}$, МПа			
	Тип подшипника											
	Шатунный		Коренной		Шатунный		Коренной		Шатунный		Коренной	
	Антифрикционный материал: СБ – сталебронзовые вкладыши с покрытием из свинцовистой бронзы; СА – сталеалюминиевые вкладыши с покрытием из алюминиевого сплава АМО 1-20											
	СБ	СА	СБ	СА	СБ	СА	СБ	СА	СБ	СА	СБ	СА
Высокофорсированные	55	49	41	37	2,0		1,2		448	397	336	305
Среднефорсированные	52	46	34	30,5	2,3		1,5		420	377	275	245
Малофорсированные	45	39,5	31	27	2,5		1,9		367	326	255	225

При этом предельным зазором сложнонагруженного подшипника при моделировании (критерием предельного состояния) предлагается считать величину радиального зазора, при которой выполняется одно из условий (или их сочетание) (рисунок 6.5):

- продолжительность граничного режима смазки (когда минимальная толщина смазочного слоя меньше критического значения) составляет более 25 % [29];
- величина максимальных гидродинамических давлений за цикл нагружения превышает предельно допустимые для данного материала втулки значения;
- величина максимальных контактных напряжений превышает предельно допустимые для данного материала втулки значения.

За предельный износ подшипника принимается разность между предельным радиальным зазором C_{lim} и начальным установочным C [23]

$$\Delta h_{lim} = C_{lim} - C. \quad (6.1)$$

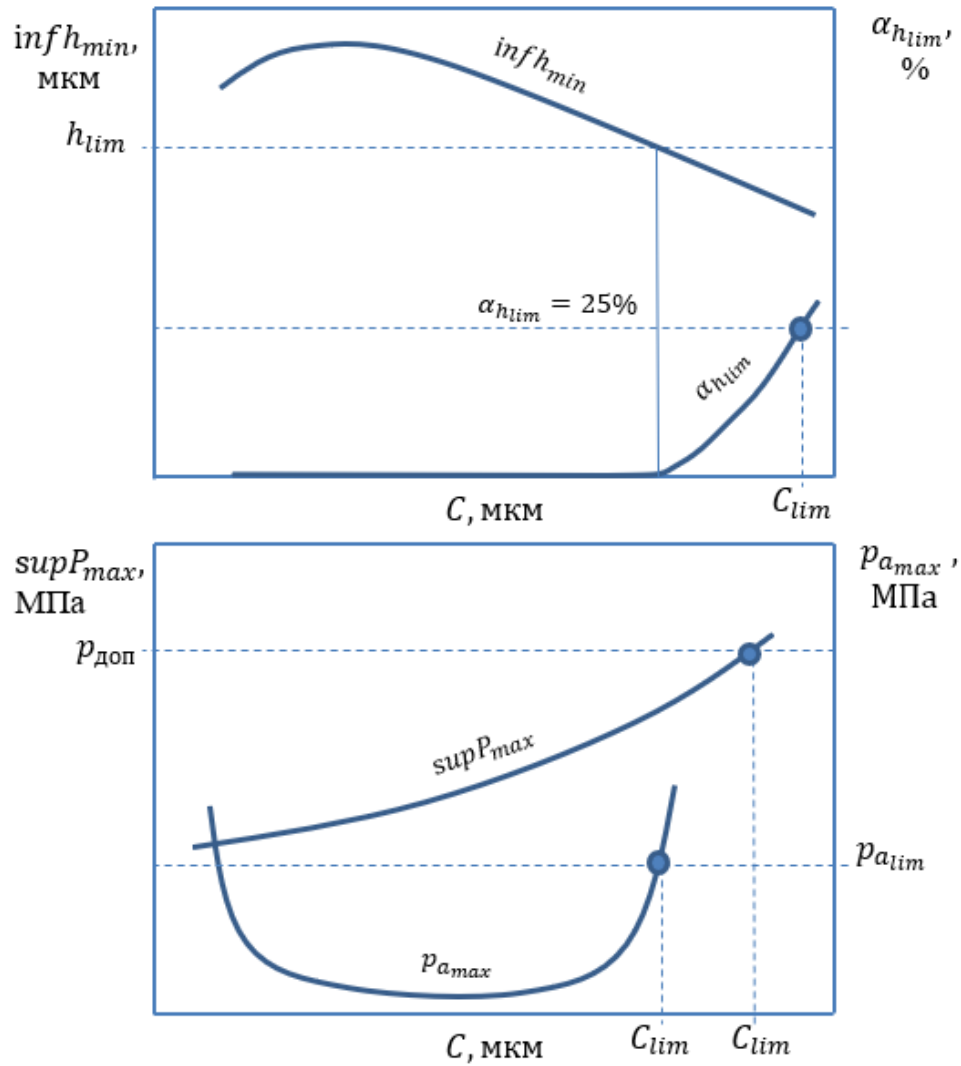


Рисунок 6.5 – К определению предельного зазора в сложнагруженном ПС

В результате моделирования определяется диапазон вероятных значений предельного радиального зазора, а значит и предельного износа.

Величину предельных значений контактных давлений будем определять в соответствии с рекомендациями к программному комплексу AVL Excite Power Unit [7] по формуле

$$p_{a_{lim}} \approx \frac{HB}{0,102}, \quad (6.2)$$

где

HB – твердость поверхности вкладыша по Бринеллю, МПа.

Таким образом, после обоснования предельного значения зазора и износа сложнонагруженного ПС следующим этапом является определение скоростей изнашивания его поверхностей трения и оценка ресурса. При этом необходимо выбрать определённые расчётные режимы работы ПС, которые, очевидно определяются режимами работы тех машин и механизмов, в состав которых входят ПС.

Конечно, видится, что для полноты оценки влияния принятых конструктивных решений на ресурс подшипника и скорость изнашивания необходимо проводить расчёты для всех возможных режимов эксплуатации машин. Однако это требует анализа статистических данных из эксплуатации, подготовки соответствующих исходных данных, и в целом значительно увеличивает время на проведение расчётных исследований. Как правило, расчёты выполняются на характерных режимах. Для ДВС такими характерными расчётными режимами являются установившиеся режимы максимальной (номинальной) мощности и максимального крутящего момента.

Хотя известно, что неустановившиеся режимы работы подшипников коленчатого вала ДВС являются более нагруженными [29, 22], и скорость изнашивания на них может отличаться в несколько раз по сравнению с установившимися режимами, всё-таки для решения задач оценки ресурса ПС различного конструктивного исполнения и принятия технических решений для повышения износостойкости на ранних этапах проектирования следует считать обоснованным расчёты на характерных установившихся режимах при их определённом чередовании в виде циклов [31,16].

6.4.2. Моделирование стендовых испытаний

Для оценки влияния принятых технических решений на ресурс сложнонагруженных ПС предлагается проводить цикл расчётов, который можно рассматривать как виртуальные стендовые испытания.

Например, стендовые испытания ДВС на безотказность в соответствии с ГОСТ 14846-2020 предполагают проведение микрометража ресурсопределяющих деталей до и после испытаний на определённых режимах, составленных в циклы с учетом встречающихся в эксплуатации.

Испытания на безотказность

Одним из возможных вариантов циклов нагружения ПС в процессе виртуальных испытаний на безотказность является цикл, предложенный Григорьевым М.А. и др. [15, 32] (рисунок 6.6).

Частота вращения КВ, мин ⁻¹	Нагрузка, в % от номинальной	Время работы на режиме, с
$n_{хх\min}$	0	120
$n_{\text{Неном}}$	100	180
$1.1n_{\text{Неном}}$	100	30
$n_{\text{Мкр max}}$	50	240
$n_{хх\min} + 200$	15	180
$n_{\text{Мкр max}}$	100	180
$1.15n_{\text{Неном}}$	100	30
$0.35n_{\text{Неном}}$	100	240
$0.45n_{\text{Неном}}$	20	180
$1.15n_{\text{Неном}}$	0	60
$0.80n_{\text{Неном}}$	50	360

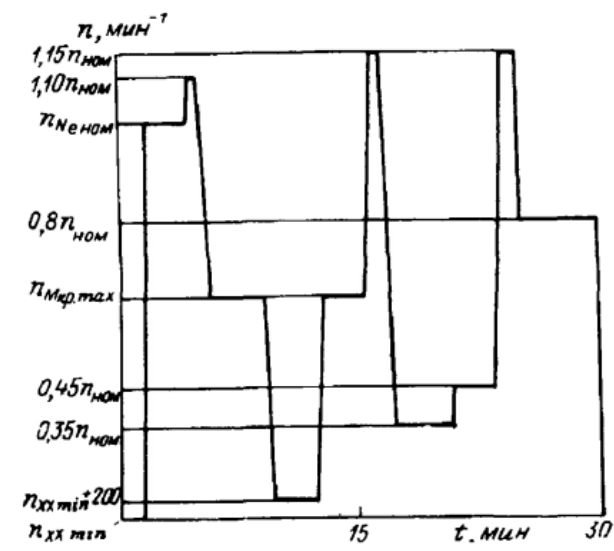


Рисунок 6.6 – Цикл к моделированию на безотказность ПС в составе ДВС

Из рисунка 6.6 видно, что в качестве основных режимов выбираются режимы максимального крутящего момента и номинальной мощности ДВС и другие точки на внешней скоростной характеристики двигателя. При этом в цикл также включены и частичные режимы работы, на которых нагрузка составляет менее 100 %.

Алгоритм расчёта сводится к тому, что в результате расчёта ПС на каждом конкретном нагрузочном режиме ДВС определяется его скорость изнашивания в мкм/ч. А затем найденное значение скорости изнашивания умножается на продолжительность данного режима и определяется суммарный износ ПС при работе на одном режиме. После суммирования износов на всех режимах цикла определяется общий износ ПС коленчатого вала за цикл. С предельным значением износа сравнивается суммарное расчётное значение, полученное за заданное количество циклов в течение заданного времени работы (в зависимости от типа и литража ДВС от 250 ч до 1000 ч). В случае, если износ подшипника за время виртуального моделирования превышает предельное значение, считается, что ПС не прошёл испытание на безотказность и требуется принятие решений о повышении его износостойкости.

Для оценки продолжительности абразивного изнашивания за цикл нагружения подшипника предлагается по аналогии с продолжительностью режима граничной смазки использовать критерий $\alpha_{d_{cp}}$ (рисунок 6.7), показывающий продолжительность цикла нагружения по углу поворота коленчатого вала, на которой минимальная толщина смазочного слоя меньше чем заданный средний диаметр абразивных частиц d_{cp} , находящихся в зазоре.

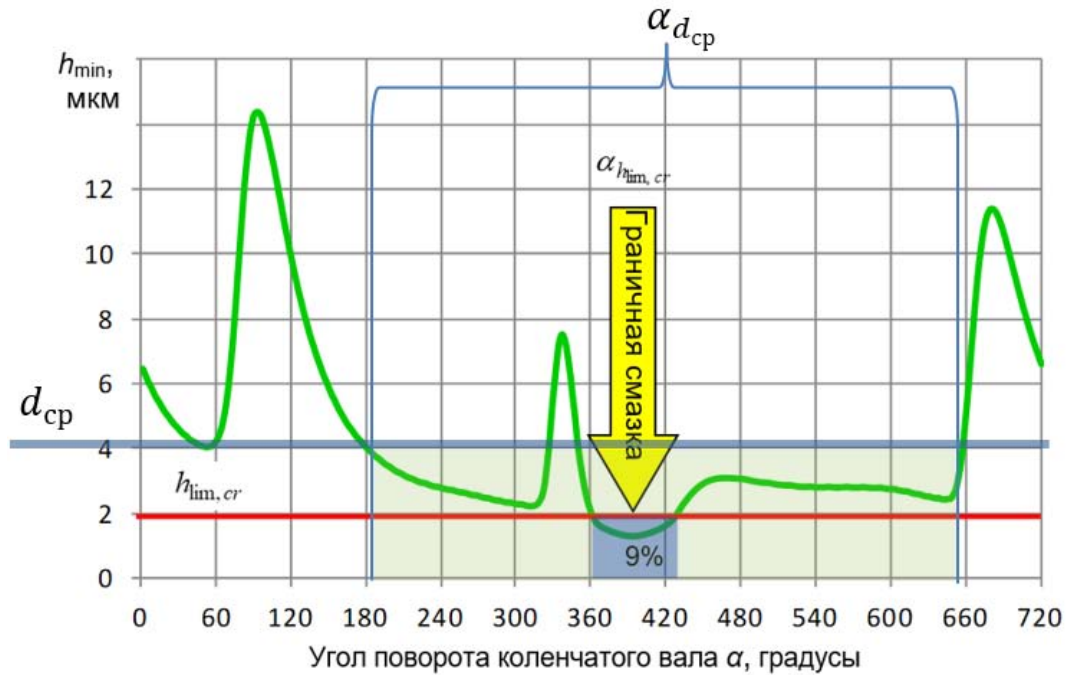


Рисунок 6.7 – Зависимость минимальной толщины смазочного слоя в шатунном подшипнике (с указанием зон граничного режима смазки и абразивного изнашивания)

Для оценки продолжительности и «глубины» граничного режима смазки дополнительно предлагается анализировать расчётную зависимость характеристики режима работы подшипника $\lambda' = \mu \cdot \omega / p$ от угла поворота коленчатого вала. Под «глубиной» граничного режима смазки в данном случае понимается коэффициент надёжности подшипника [27], как степень сближения поверхностей трения, характеризуемая отношением текущего значения λ' к её критическому значению $\lambda'_{кр}$, которое определяется из расчётной диаграммы Герси-Штрибека для рассматриваемого подшипника.

Подобный подход был использован Ю.В. Рождественским при анализе влияния некруглостей шипа и подшипника на работоспособность подшипника путём оценки изменения числа Зоммерфельда по углу поворота вала [29].

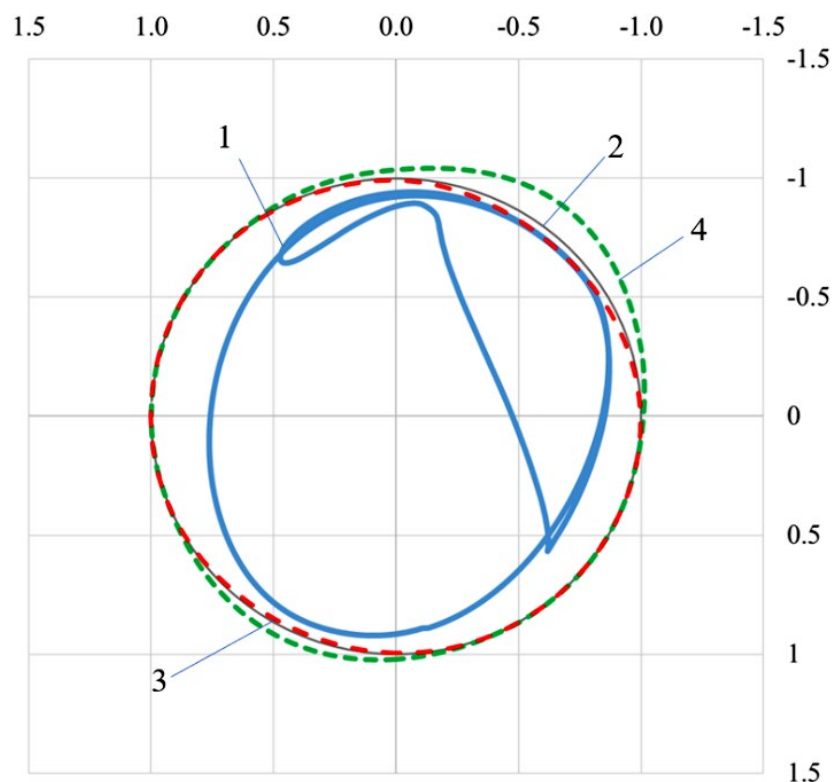


Рисунок 6.8 – Траектория движения шейки вала в подшипнике и диаграммы (эпюры) износа шейки вала и вкладышей:

1 – траектория движения центра шатунной шейки вала в подшипнике; 2 – единичная окружность; 3 – диаграмма износа шатунной шейки; 4 – диаграмма износа вкладышей

Ускоренные испытания.

Другим возможным вариантом расчёта при комбинации характерных режимов нагружения ДВС является режим ускоренных испытаний, предложенный И.Б. Гурвичем и др. [16]. Для проведения стендовых ускоренных испытаний ДВС ими был предложен режим, состоящий из 5-часовых циклов включая:

- 2 ч на режиме максимального крутящего момента;
- 2 ч на режиме максимальной мощности;
- холостой ход при минимальной устойчивой частоте вращения коленчатого вала

каждые 15 мин.

Общая продолжительность испытаний составляла 50 ч. Дополнительно методика проведения испытаний предусматривала подачу пыли в впускной трубопровод и картер двигателя. В результате измеряли износы деталей цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма двигателей ЗМЗ-53. И.Б. Гурвичем было показано, что такие 50-ти часовые испытания соответствуют эквивалентному пробегу двигателей 75–80

тыс. км, находящихся во второй категории условий эксплуатации. Средняя скорость изнашивания шатунных подшипников при этом составила 3–3,4 мкм/ч.

При проведении описанных выше расчётов важно принимать во внимание, что в процессе изнашивания сложнонагруженного подшипника изменяются его геометрические размеры. В частности, как показали исследования Ф.Н. Авдонькина [9], увеличивается эллипсность шатунных и коренных шеек коленчатого вала ДВС. Очевидно, что изменение геометрии подшипника в процессе изнашивания будет оказывать влияние на его гидромеханические характеристики, продолжительность зоны контактного взаимодействия элементов, скорость изнашивания и ресурс.

Подходы к учёту изменения геометрических параметров подшипника в процессе моделирования изнашивания известны (рисунок 6.9) [4, 14]. При этом необходимо отметить, что искажение геометрических параметров подшипника при его работе происходит не только в результате износа, но и в результате упругих деформаций корпуса или прогиба вала, обусловленных механическими и тепловыми нагрузками, учёт которых требует применения других подходов, связанных с решением сопряжённых задач [31].

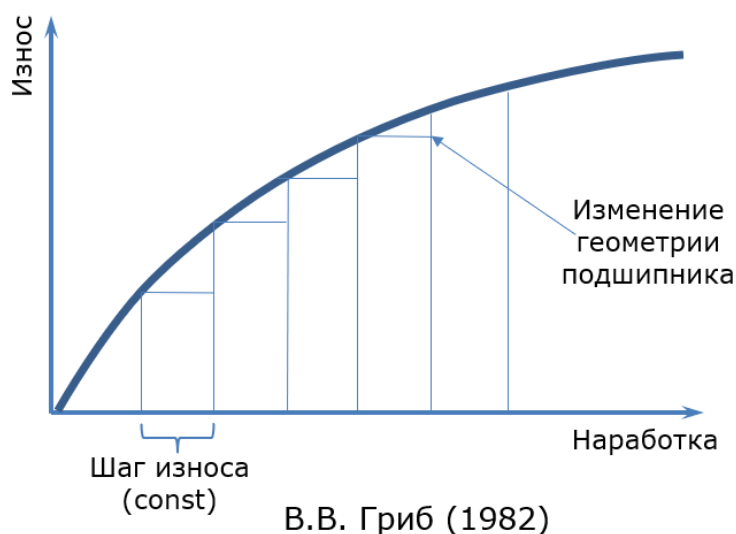


Рисунок 6.9 – К построению кривой изнашивания сложнонагруженного ПС с учётом изменения геометрических параметров

Для того, чтобы на ранних этапах проектирования учесть влияние изменения геометрии подшипника в результате изнашивания на его ГМХ и контактные параметры, предлагается описывать это изменение в виде некруглостей правильной формы (овальностями вала и вкладыша). При этом величина разности полуосей эллипсов принимается равной величине максимального износа в зоне контакта за определённое

число циклов нагружения (шаг износа, рисунок 6.9). Использование такого подхода позволяет уточнить требования к предельному состоянию сложнонагруженных подшипников уже на ранних стадиях проектирования машины.

6.4.3. Построение карты скоростей изнашивания подшипника

Среди составляющих математического моделирования на ранних этапах проектирования машин следует отметить многовариантные расчёты для обоснования наиболее рациональных технических решений, удовлетворяющих заданным требованиям.

В практике проектирования гидродинамических ПС широко используется параметр, представляющий собой отношение ширины подшипника к его диаметру – относительная ширина подшипника $a = B/D$. Как показано в работе [33] значения параметра a могут быть изменены за счёт ширины подшипника B и за счёт его диаметра D . В первом случае изменяется расход масла, вытекающего в торцы подшипника, и гидродинамическая реакция смазочного слоя. Во втором случае вместе с незначительным изменением расхода, происходит изменение линейной скорости поверхности вала. При этом увеличение относительной ширины подшипника за счёт B приводит к заметному увеличению h_{min} , однако, увеличение a за счёт уменьшения диаметра шейки вала приводит к некоторому снижению h_{min} . Авторы работы [33] показали, что зависимость h_{min} от a носит линейный характер. Однако наш опыт по расчёту сложнонагруженных ПС показал, что эта зависимость имеет нелинейный характер. И если построить ряд таких зависимостей для различных сочетаний геометрических параметров подшипника при определенных условиях нагружения, то полученное поле можно использовать для анализа работоспособности ПС при всех возможных вариантах его диаметра и ширины [19, 20]. Такая диаграмма-поле является удобным инструментом для конструктора и позволяет анализировать влияние геометрических параметров подшипника на минимальную толщину смазочного слоя и определить наиболее рациональные пути её повышения при данных условиях нагружения.

В развитии этого подхода при моделировании изнашивания подобная диаграмма может быть построена для скоростей изнашивания подшипника и его отдельных элементов. В качестве примера, был выполнен такой расчёт с целью оценки характера изменения скорости изнашивания сложнонагруженного подшипника в зависимости от относительной ширины подшипника (рисунок 6.10).

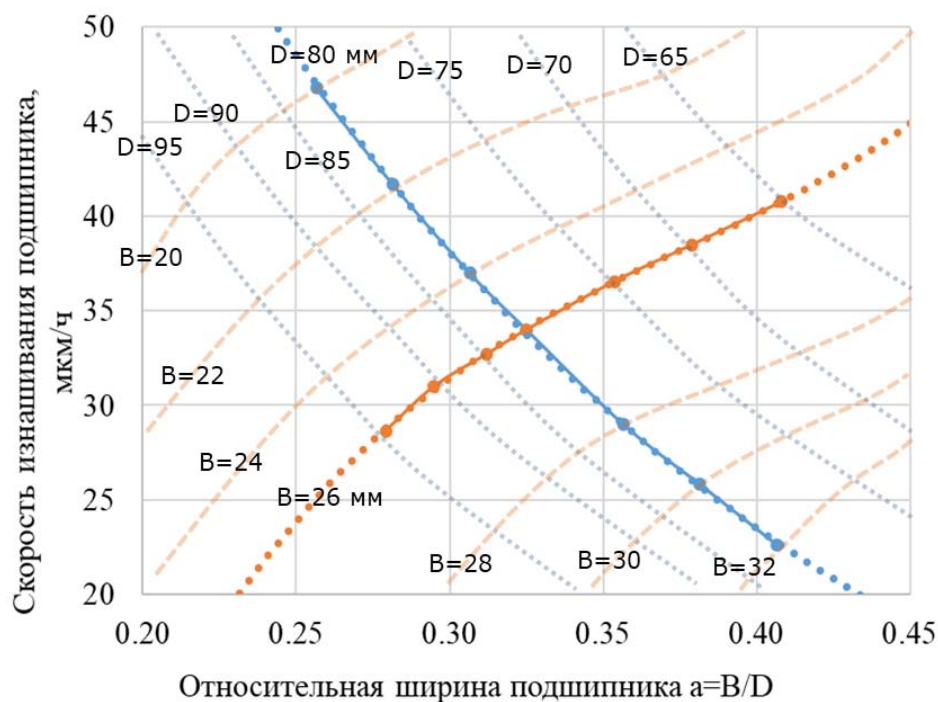


Рисунок 6.10 – Карта скоростей изнашивания подшипника

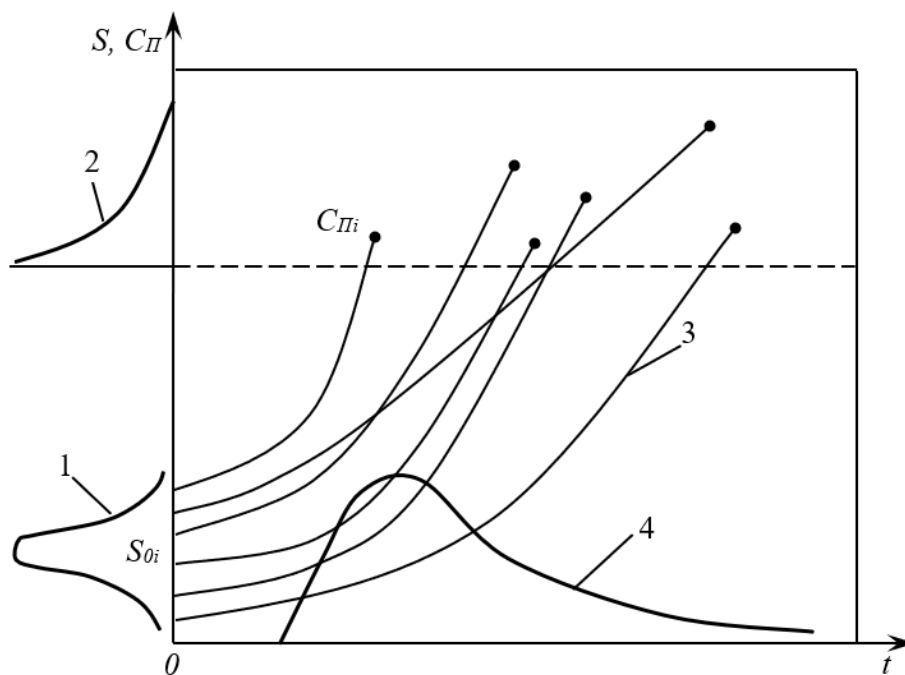
6.4.4. Статистическое моделирование ресурса ПС

Следует подчеркнуть, что задачи оценки ресурса в общем носят вероятностный характер. В свою очередь, расчётные оценки ресурса сложнагруженных ПС осложняются тем, что скорость изнашивания и предельный износ являются случайными величинами. Так, скорость изнашивания v_w зависит от множества факторов (нагрузка, скорость скольжения, температура, твердость поверхностей, предел прочности материалов, условия эксплуатации и т.п.) и может изменяться в широких пределах. Предельный износ Δh_{lim} (то есть износ, при котором наступает отказ) через установочный радиальный зазор C зависит от точности изготовления элементов подшипника (наличие отклонений формы и поверхности, например, овальность, седлообразность, бочкообразность), точности монтажа (усилие затяжки корпуса, плотность прилегания втулки или вкладыша к корпусу).

Для подшипников ДВС характерна работа при различных нагрузочных и скоростных режимах. Это, в своё очередь, также осложняет расчёт ресурса подшипников в виду вероятностного характера режимов работы в эксплуатации.

При соответствующей постановке задачи по оценке ресурса сложнагруженных ПС на ранних этапах проектирования машин вероятностный характер процессов изнашивания может быть учтён путём использования универсального метода определения

плотности распределения ресурса – метода статистического моделирования (метод Монте-Карло), при применении которого случайные величины начального износа (приведённого к началу эксплуатации после приработки), скорости изнашивания, моменты концов реализаций износа подчиняются своим законам распределения (рисунок 6.11) $f(S_0)$, $f(S_1)$ и $f(C_{\Pi})$, соответственно [25].



- 1 – распределение значений износа в конце приработки $f(S_0)$;
- 2 – распределение значений предельного износа $f(C_{\Pi})$;
- 3 – реализация износа с начальным S_{0i} и предельным $C_{\Pi i}$ значениями;
- 4 – смоделированное распределение ресурса

Рисунок 6.11 – Статистическое моделирование ресурса [26]

Для случая экспоненциальной реализации износа ПС плотность распределения ресурса определяется следующим выражением [26]:

$$f(t) = \frac{b \cdot | -C_{\Pi} | \cdot e^{(-b \cdot t)}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{S_0}} \cdot e^{\left(-\frac{(C_{\Pi} \cdot e^{(-b \cdot t)} - \bar{S}_0)^2}{2 \cdot \sigma_{S_0}^2} \right)}. \quad (6.3)$$

Здесь S_0 подчиняется нормальному закону распределения и в отношении подшипника представляет собой не что иное, как радиальный зазор C после приработки,

приведённый к началу эксплуатации; σ_{S_0} – среднее квадратическое отклонение радиального зазора.

Изменение интенсивности изнашивания на единицу износа деталей сопряжения b является по сути интенсивностью отказов (обычно для экспоненциального закона обозначается λ) и представляет собой величину, обратную ресурсу R_h , то есть

$$b = \frac{v_w}{\Delta h_{lim}}, \text{ ч}^{-1}. \quad (6.4)$$

6.5. Безразборное восстановление топливного насоса высокого давления

На ряду с изнашиванием подшипников скольжения в дизельном двигателе интенсивно изнашиваются плунжерные пары топливных насосов высокого давления (ТНВД). Моторное топливо в дизельной топливной аппаратуре используется, как рабочая жидкость, и как смазывающая среда для трущихся пар топливopодающей аппаратуры. Недостаточная смазочная способность дизельного топлива, является причиной отказа рабочих элементов дизельной топливной аппаратуры ДВС, а именно плунжерных пар ТНВД [34].

От состояния рабочих поверхностей прецизионных деталей топливного насоса высокого давления, основными из которых являются, плунжер-втулка, зависит работоспособность топливной системы, а также протекание процессов смесеобразования и сгорания в цилиндрах дизеля, определяющих экономические, функциональные и эксплуатационные показатели всего дизельного агрегата. Но даже незначительное количество механических примесей вызывает усиленный износ прецизионных деталей. Практика показывает, что наибольшее число отказов дизелей, до 50 %, происходит вследствие нарушения работы топливной аппаратуры, а именно из-за итенсивного износа плунжерных пар [35].

Одним из направлений обеспечения работоспособного состояния и ресурса плунжерных пар дизельной аппаратуры является применение противозадирных присадок в дизельном топливе. Поскольку топливный насос высокого давления выполняет основную функцию в двигателе внутреннего сгорания по доставке топлива к форсунке камеры сгорания, то становится понятно, что повышение давления в топливном насосе и поддержание его на заданном уровне во всех цилиндрах ДВС во время эксплуатации машины является главной задачей ТНВД.

Ремонт ТНВД является трудоемкой задачей, т.к. необходимо его снять с двигателя и потом его заменять новым или восстанавливать тем или иным способом. Поэтому разработка способов восстановления прецизионных плунжерных пар всегда актуальна. Сущность безразборных технологий заключается в том, что специальный состав, вводится в штатную масляную систему или консистентную смазку и не вводится в систему топливоподачи, а, следовательно, не попадают в плунжерную пару ТНВД дизеля.

В НИЦ «НиР БСМ» УрО РАН совместно с ООО «МАРКЕТ» разработан способ безразборного ремонта ТНВД без его снятия с дизельного двигателя [36]. Рациональным способом восстановления плунжерной пары и повышения давления в топливном насосе высокого давления без его снятия с двигателя, по нашему мнению, является подача в топливный фильтр грубой очистки насоса смеси топлива и трибологической композиции из расчёта один грамм сухого ультрадисперсного порошка композиции на один литр топлива. Это достигается добавлением в топливо трибологической композиции из расчета один грамм сухого ультрадисперсного порошка композиции на один литр топлива, после чего ее перемешивают и заливают смесь топлива с трибологической композицией в фильтр грубой очистки.

6.6. Заключение к разделу 6

В результате анализа и обобщения известных методов моделирования ПС и экспериментальных исследований предложена методология оценки ресурса динамически нагруженных ПС поршневых и роторных машин, включающая в себя: экспериментальные исследования реологического поведения СМ, оценку параметров шероховатости поверхностей трения ПС, методы решения гидродинамической задачи для определения ГМХ подшипника и зон контактного взаимодействия его элементов, методы моделирования повреждений поверхностей трения ПС. Совокупность этих методов позволяет расширить возможности оценки надёжности машин с ПС на ранних этапах проектирования и существенно сократить затраты на разработку и доводку конструкций ПС.

Применение концепции для оценки ресурса сложнонагруженных ПС позволяет свести к минимуму испытания, ускорить получение информации для обоснования решений, направленных на повышение долговечности ПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в отчете результаты являются важными недостающими компонентами зонтичной науки инфранетики и МИБИКС-технологий. Полученные результаты являются инструментами и средствами решения научных и практических задач, к которым ранее было невозможно подступиться.

Разработанный метод оценки снижения средней ожидаемой продолжительности жизни от воздействия негативных факторов окружающей среды впервые позволяет дать количественную трактовку субживучести, что, в свою очередь, позволяет более точно оценивать ущербы от таких пространственно-временных угроз, как пандемия, землетрясение, наводнение или нарушение снабжения.

Предложенный вариант использования аппарата к-статистики Каниадакиса позволяет приступить к моделированию событий типа *черный лебедь* или *король-дракон*, что резко снизит опасность пропуска или неучета последствий крайне редких, но чрезвычайно разрушительных аварий и катастроф при проектировании и эксплуатации критически важных объектов.

Разработанный кросс-энтропийный метод идентификации редких событий позволяет более точно оценить вероятность и последствия аварии на ЭЭС типа дефицит мощности.

Методика использования байесовских сетей для моделирования возможных аварий на критически важных объектах позволяет более точно определять количественные параметры возможного техногенного бедствия.

Разработанная вероятностно-энтропийная модель риска предлагается к использованию как инструмент для мониторинга состояния многомерных систем инфраструктур.

Полученные результаты не имеют аналога в опубликованной литературе, обладают внутренней полнотой и законченностью, и могут быть использованы для решения последующих научно-технических и практических задач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

К разделу 1:

1. Козлова О.А., Шеломенцев А.Г., Трушкова Е.А. Влияние экологических факторов на показатели ожидаемой продолжительности жизни населения Свердловской области. Социальные аспекты здоровья населения [сетевое издание], 2018. – № 64(6). – С. 12. – DOI: 10.21045/2071-5021-2018-64-6-12. – URL: <http://vestnik.mednet.ru/content/view/1034/30/lang.ru> (дата обращения: 20.09.2022).
2. Козлова О.А., Тухтарова Е.Х., Илинбаева Е.А. Методические вопросы оценки устойчивости трудоспособного населения к негативному экологическому воздействию. Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, 2017. – № 4. – С. 212–227.
3. Зайцева Н.В, Трусов П.В, Шур П.З. и др. Методические подходы к оценке риска воздействия разнородных факторов среды обитания на здоровье населения на основе эволюционных моделей // Анализ риска здоровью, 2013. – № 1. – С. 15–23.
4. Сакович В. А., Смирнова О. А. Математическое моделирование влияния радиации на продолжительность жизни млекопитающих // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2003. – Т. 134. – Вып. 6. – С. 1436–1484.
5. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining life contingencies // Philos. Trans. Roy. Soc. London. A. 1825. – Vol. 115. – P. 513–585.
6. Гаврилов Л.А., Гаврилова Н.С. Биология продолжительности жизни / отв. ред. В. П. Скулачев. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1991. 280 с.
7. Makeham W.M. On the law of mortality and the construction of annuity tables // J. Inst. Actuaries, 1860. – Vol. 8. – P. 301–310.
8. ГОСТ 25645. 205-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Метод расчета радиационного риска. – М. : Госстандарт СССР, 1984.
9. Губин А. Т. и др. Математическая модель скорости смертности животных при радиационных воздействиях // Тр. XVIII совещ. соцстран по космической биологии и медицине. – М., 1985. – С.227–278.
10. ГОСТ 25645. 215-85. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Нормы безопасности при продолжительности полета до трех лет. – М. : Госстандарт СССР, 1986.

11. Губин А. Т., Ковалев Е. Е., Сакович В. А. Модель для описания вероятности летального исхода при воздействиях радиации и других вредных факторов // АЭ, 1992. – Т. 72. – Вып. 6. – С. 604–512.
12. Губин А. Т., Сакович В. А. Математическая модель интенсивности радиационной смертности при облучении в детском возрасте // АЭ, 1999. – Т. 87.– Вып. 2. – С. 159–161.
13. Keyfitz N, Caswell H. Applied Mathematical Demography. – N.Y. : Springer, 2005
14. Goldman N, Lord G. A new look at entropy and the life table // Demography, 1986. – Vol. 23. – Pp. 275–282.
15. Wrycza T.F. Entropy of the Gompertz-Makeham mortality model, Demographic research, 2014. – Vol. 30, #13971404.
16. Vaupel J.W., Canudas Romo V., Decomposing change in life expectancy: A bouquet of formulas in honor of Nathan Keyfitz's 90th birthday // Demography, 2003. – Vol. 40. – Pp. 201–216.
17. Zhang Z. The age separating early deaths from late deaths // Demogr. Res., 2009. – Vol. 20. – Pp. 721–730.
18. Wrycza T., Baudisch A. How life expectancy varies with perturbations in age-specific mortality // Demographic Research, Max Planck Institute for Demographic Research, Rostock, Germany, 2012. – Vol. 27(13). – Pp. 365–376.

К разделу 2:

1. Kaniadakis G. Statistical mechanics in the context of special relativity // Phys. Rev. E., 2002. – Vol. 66, # 17.
2. Kaniadakis G. Maximum entropy principle and power-law tailed distributions // Eur. Phys. J. B 70, 2009. – Pp. 3–13.
3. Kaniadakis G., Scarfone A. M., Sparavigna A. & Wada T. Composition law of kappa-entropy for statistically independent systems // Phys. Rev. E 95, 2017. #052112.
4. Clementi F., Gallegati M., Kaniadakis G. A model of personal income distribution with application to Italian data // Empirical Econ, 2011. # 39. – Pp. 559–591.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – М., 2014. – 58 с.
6. Кислов А.В., Матвеева Т.А. Экстремумы скорости ветра в европейском секторе Арктики // Метеорология и гидрология, 2016. – No 7. – С. 5–14.

7. Кислов А.В., Матвеева Т. В., Платонов В. С. Общее описание изменчивости опасных погодных явлений в Арктике / В кн.: «Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики», т. 2. – М. : Лига-Вент, 2016. – С. 10–45.
8. Кислов А.В., Матвеева Т.А., Платонов В.С. Экстремумы скорости ветра в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология, 2015. – № 2. – С. 63–80.
9. Taleb N.N. The black swan: The impact of the highly improbable fragility. – Random House, 2010. – Vol. 2.
10. Sornette D. Dragon-Kings, Black Swans and the prediction of crises // Int. J. of Terraspace Science and Engineering, 2009. – №2 (1). – Pp. 1–18.

К разделу 3:

1. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». Сер. 09. Вып. 38. – М. : НТЦ исследований проблем промышленной безопасности, 2014.
2. ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска». – 86 с.
3. Support.bayesfusion.com / GeNie Modeler. – URL: <https://support.bayesfusion.com/docs/GeNie/> (дата обращения: 04.02.2022).
4. Репина И.Б. Учет влияния ЧФ на организационно-технологическую надежность производственных процессов инфраструктуры железных дорог: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.22. – Новосибирск, 2015. – С. 5–13.
5. Замышляев А.М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта: дисс. ... докт. тех. наук: 05.13.06. – М., 2013. – С. 7–13.
6. Протопопов В.А. Агрегированная оценка уязвимости объектов транспортной инфраструктуры: дисс. ... канд. тех. наук: 05.13.01. – Иркутск, 2015. С. 3–41.
7. Слюсарь Н.Н. Управление экологическими рисками транспортировки взрывчатых веществ железнодорожным транспортом: автореферат дисс. ... канд. тех. наук: 03.00.16. – Пермь, 2004. – С. 4–10.
8. Мартынюк И.В. Повышение безопасности железнодорожных перевозок опасных грузов с учетом взаимодействия с другими видами транспорта и окружающей средой: автореферат дисс. ... канд. тех. наук: 05.22.01. – Ростов-на-Дону, 2007. – С. 3–8.

9. Hoła A. et al. Methodology of Classifying the Causes of Occupational Accidents Involving Construction Scaffolding Using Pareto-Lorenz Analysis // *Applied Sciences*, 2018. – №8 (1). – 48 p.
10. Мугинштейн Л.А. и др. Основные причины повышенного износа рельсов и гребней колесных пар грузовых вагонов // *Железнодорожный транспорт*, 2020. – №6. – С. 25–33.
11. Уманец В. В. Вопросы анализа логистических рисков при перевозке грузов железнодорожным транспортом // *Проблемы анализа риска*, 2020. – №3 (17). – С. 66–73.
12. Dindar S. et al. Derailment-based Fault Tree Analysis on Risk Management of Railway Turnout Systems // *IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017. – № 245. – Pp. 1–8.
13. Fabiano B. et al. Dangerous Good Transportation by Road: From Risk Analysis to Emergency Planning // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005. – №18(4-6). – Pp. 403–413.
14. Обласов А.А. Управление рисками при грузоперевозках // *Российское предпринимательство*, 2010. – №4(1). – С. 48–50.
15. . Мурyleв О.В. Особенности ЧС при авариях на железнодорожном транспорте // *Бюллетень медицинских интернет-конференций*, 2012. – №2. – С. 157.
16. Смоляк А.С. О вероятностных моделях для оценки остаточного срока службы и износа машин и оборудования // *Экономика и управление народным хозяйством. Имущественные отношения в РФ*, 2017. – №2 (185). – С. 75–87.
17. Poluyan L.V., Malukova M.G. Assessment of human factor in critical infrastructures // *Economics and management of the national economy. Property relations in the Russian Federation*, 2017. – №2 (185). – Pp. 75–87.
18. ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных.
19. Сортировка–88. [Электронный ресурс]. – URL: https://66.ru/news/incident/236106/#i_agree_152 (дата обращения: 25.02.22).
20. Федеральный закон от 21.07.2011 №256-ФЗ (с изменениями на 24.04.2020 г.) – О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса.
21. ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия».

22. ГОСТ Р 58623-2019 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные. Правила технической эксплуатации».

23. Raphael N. Moura. Learning from accidents: human errors, preventive design and risk mitigation: Thesis submitted in accordance with the requirements of the University of Liverpool for the degree of Doctor in Philosophy, 2017. – 167 p.

24. Андреев Я.М. Обеспечение эксплуатационной надежности резервуаров Севера путем повышения выявляемости плоскостных дефектов: дисс. ... канд. тех. наук: 01.02.06 / Андреев Яков Михайлович. – Якутск, 2017. – 129 с.

25. Захарова М.Н. Анализ и оценка риска аварий резервуаров и газопроводов при низких температурах: дисс. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Захарова Марина Ивановна. – Якутск, 2015. – 140 с.

26. MacCarthy G. A. K., Asamoah C. N., Ephraim B. A., Alekhin V. N., Poluyan L. V. Analyzing Domino Effects Occurring on Gasoline Storage Tanks at the Bulk Oil Storage and Transportation (BOST) Depot // Russian Journal of Construction Science and Technology, 2019. – Vol. 5, № 2. – DOI: 10.15826/rjcest.2019.2.002.

27. Poluyan L.V. Assessing risk and resilience of critical infrastructures in the fuel and energy economy involving failure cascading effects // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. – Vol. 481, #1012010. – DOI:10.1088/1757-899X/481/1/012010.

28. Yasyreva A.N., Poluyan L.V., Guryev E.S. Devising an integrated procedure for assessing fragmentation effects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – Vol. 962 (4), #042054. – DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042054.

29. 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.

30. Poluyan L.V., and Malukova M.G. Assessment of human factor in critical infrastructures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. – Vol. 481 (1), #012001. – DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012001.

31. Poluyan L.V., Malukova M. G. Assessing functions of human risk, reliability and error probability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – Vol. 962. (4), #042055. – DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042055.

32. Алексеев С.Г., Зарипова К.А., Полуян Л.В. Расчет времени наступления опасных факторов пожара на примере стационарного цирка // Вестник НЦБЖД, 2020. – № 1 (43). – С. 62–75.

33. Timashev S. A., Alekhin V. N., Poluyan L.V., Fontanals I. and Gheorghe A. Transforming Yekaterinburg into a Safe, Resilient-Smart and Sustainable City // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. – Vol. 177 (1), # 012001.

34. Poluyan L.V., Syutkina E.V., Guryev E.S. Software Systems for Prediction and Immediate Assessment of Emergency Situations on Municipalities Territories // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017. – Vol. 262. – DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012199.

К разделу 4:

1. Маркович И. М. Режимы электроэнергетических систем. – М. : Энергия, 1969.
2. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М. : Наука, 1965.
3. Руденко Ю. Н., Чельцов М. Б. Надежность и резервирование в энергосистемах. – Новосибирск : Наука, 1974.
4. Биллингтон Р., Аллан Р. Оценка надежности электроэнергетических систем: пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
5. Эндрэни Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
6. Дубицкий М. А., Руденко Ю. Н., Чельцов М. Б. Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах. – М. : Энергоиздат, 1988. – 272 с.
7. Надежность систем энергетики (сборник рекомендуемых терминов) – М. : ИАЦ «Энергия», 2007. – 192 с.
8. Надежность систем энергетики и их оборудования. Спр. 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.
9. Чукреев Ю. Я. Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. – Сыктывкар : Коми НИЦ УрО РАН, 1995. – 176 с.
10. Непомнящий В.А. Учет надежности при проектировании энергосистем. – М. : Энергия, 1978.
11. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. – М. : Энергоатомиздат, 1984.

12. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. – Новосибирск. : Изд-во НГТУ, 2003.
13. Чукреев Ю. Я. Сравнение отечественных и зарубежных вероятностных показателей балансовой надежности электроэнергетических систем // Изв. РАН. Энергетика, 2012. – № 6. – С. 27–38.
14. Стандарт. Методические указания по проведению расчетов балансовой надежности. М., 2018.
15. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Надежность систем электроэнергетики. – Новосибирск : Наука, 2015.
16. Billinton R., Li W. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. – N.Y. : Springer Science+Business Media, 1994.
17. Обоскалов В.П. Надежность обеспечения баланса мощности электроэнергетических систем. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2002. – 210 с.
18. Руденко Ю. Н., Ушаков И. А. Надежность систем энергетики. – М. : Наука, 1986.
19. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. – М. : Советское радио, 1967. – 299 с.
20. Волков Г. А. Оптимизация надежности электроэнергетических систем. – М. : Наука, 1986.
21. Обоскалов В. П. Резервы мощности в электроэнергетических системах. – Свердловск : УПИ, 1989. – 92 с.
22. NERC, Reliability Assessment Guidebook. Version 2.1. April 7, 2009.
23. Vijayamohanan Pillai N. Loss of Load Probability of a Power System // J Fundam Renewable Energy Appl, 2014. 5: 149. – DOI: 10.4172/20904541.10001497.

К разделу 5:

1. Современный философский словарь: 2-е изд. / под общ. ред. проф. В.Е. Кемерова. Лондон, Франкфурт-на-Майне, Париж, Люксембург, Москва, Минск : ПАНПРИНТ, 1998.
2. Лысак И.В., Косенчук Л.Ф. Современное общество как общество сетевых структур // Информационное общество, 2015. – № 2–3. – С. 45–51.
3. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. – М. : ИПУ РАН, 2003.

4. Goldstein H. Multilevel Statistical Models: 4th ed. – Wiley, 2011.
5. Pardoe I. Applied Regression Modeling: 2nd ed. – Wiley, 2012.
6. Lanchier N. Stochastic Modeling. Springer, 2017.
7. Булатов В.В. Введение в математические методы моделирования сложных систем. – М. : ОнтоПринт, 2018.
8. Frank S.A., Smith D.E. Measurement Invariance, Entropy, and Probability // Entropy, 2010. – Vol. 12., No. 3. – Pp. 289–303.
9. Wilson A.G. Entropy in Urban and Regional Modelling: Retrospect and Prospect // Geographical Analysis, 2010. – Vol. 42., No. 4. – Pp. 364–394.
10. Czyz T., Hauke J. Entropy in Regional Analysis // Quaestiones Geographicae, 2015. – Vol. 34., No. 4. – Pp. 69–78.
11. Попков Ю.С., Дубнов Ю.А., Попков А.Ю. Энтропийная редукция размерности в задачах рандомизированного машинного обучения // АИТ, 2018. – № 11. – С. 106–122.
12. Popkov Y.S., Dubnov Y.A., Popkov A.Y. Entropy Dimension Reduction Method for Randomized Machine Learning Problems // Autom. Remote Control, 2018. – Vol. 79., No. 11. – Pp. 2038–2051.
13. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal, 1948. – Vol. 27., No.3. – Pp. 379–423; – No. 4. – Pp. 623–656.
14. Гельфанд И.М., Колмогоров А.Н., Яглом А.М. Количество информации и энтропия для непрерывных распределений / Тр. III Всесоюз. математического съезда. – М. : АН СССР, 1958. – Т. 3. С. 300–320.
15. Тырсин А.Н. Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем. – Воронеж : Научная книга, 2016.
16. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия / пер. с англ. – М. : Мир, 1993.
17. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь / пер. с англ. – М. : Советское радио, 1974.
18. Тырсин А.Н. Энтропийное моделирование сетевых структур // Автоматика и телемеханика, 2022. – № 10. – С. 144–155. – DOI: 10.31857/S0005231022100130.
19. Тырсин А.Н. Скалярная мера взаимозависимости между случайными векторами // Зав. лаборатория. Диагностика материалов, 2018. – Т. 84, № 7. – С. 76–82. – DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-76-82.
20. Ашнина Ю.А. Борисов А.В., Борисова Н.И. Развитие инфраструктуры современного города: социальные и экономические аспекты // NovaInfo, 2015. – № 39. – С. 177–183.

21. Laprie J.C., Kanoun K., Kaniche M. Modeling interdependencies between the electricity and information infrastructures // SAFECOMP-2007, 2007. – Vol. 4680. – Pp. 54–67.
22. Rinaldi S., Peerenboom J., Kelly T. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies // IEEE Control Systems Magazine, 2001. – Vol. 21. – Pp. 11–25.
23. Buldyrev S.V., Parshani R., Paul G., et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks // Nature, 2010. – Vol. 464. – Pp. 1025–1028.
24. Разработка фундаментальных основ супраживучести ключевых стратегических объектов и гармоничного управления (говернанса) умными инфраструктурами (промежуточный) (FUUF-2021-0001). Отчет о НИР. Рег. № НИОКТР АААА-А21-121011490020-5. Рук. Тимашев С.А. (Тырсин А.Н. Раздел 4 «Энтропийный метод распознавания и анализа динамической информации о состоянии сложных региональных систем», с. 138–190).
25. Тырсин А.Н., Яшин Д.А. Индивидуальный энтропийно-вероятностный мониторинг функционирования сердечно-сосудистой системы // Современные наукоемкие технологии, 2022. – № 5–2. – С. 219–225. – DOI: 10.17513/snt.39174.
26. Нобелевская речь физиолога Ивана Петровича Павлова (12 декабря 1904, Стокгольм) // Развитие личности, 2014. – №4. – С. 101–114. – URL: <http://rl-online.ru/uploads/101-114-2014-4.pdf> (дата обращения: 20.05.2022).
27. Цинкер М.Ю., Кирьяков Д.А., Камалтдинов М.Р. Применение комплексного индекса нарушения здоровья населения для оценки популяционного здоровья в Пермском крае // Известия Самарского научного центра РАН, 2013. – Т. 15, № 3(6). – С. 1988–1992.
28. Цветков О.В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 202 с.
29. Deutscher G. The Entropy Crisis. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008.
30. Клейнер Г.Б. Системная экономика и системно-ориентированное моделирование // Экономика и математические методы, 2013. – Т. 49, № 4. – С. 71–93.
31. Кориков А.М., Павлов С.Н. Теория систем и системный анализ. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 288 с.
32. Насонова Н.В. Автоматизированная система комплексного мониторинга факторов риска хронических неинфекционных заболеваний // Медицинская информатика, 2007. – №1(13). – С. 56–67.
33. Тырсин А.Н., Калев О.Ф., Яшин Д.А., Лебедева О.В. Оценка состояния здоровья популяции на основе энтропийного моделирования // Математическая биология и биоинформатика, 2015. – Т. 10. – Вып. 1. – С. 206–219. – DOI: 10.17537/2015.10.206.

34. Тырсин А.Н., Калев О.Ф., Яшин Д.А., Сурина А.А. Модель риска многомерной стохастической системы как инструментарий исследования состояния здоровья популяции // Системный анализ и управление в биомедицинских системах, 2018. – Т. 17, № 4. – С. 948–957. – DOI: 10.25987/VSTU.2018.17.4.017.

35. Tyrsin A.N., Yashin D.A., Surina A.A. Entropy-probabilistic modeling as a tool for forming key competencies of a doctor // Journal of Physics: Conference Series, 2021. – Vol. 1691. – DOI: 10.1088/1742-6596/1691/1/012162.

36. 35. Профилактика хронических неинфекционных заболеваний: Рекомендации / Председатели рабочей группы по подготовке текста рекомендаций – Бойцов С.А., Чучалин А.Г. – М. : Гос. науч.-исследов. центр профилактической медицины, 2013. – 40 с.

37. Ардашев А.В., Лоскутов А.Ю. Практические аспекты современных методов анализа variability сердечного ритма. – М. : Медпрактика-М, 2011. – 126 с.

38. Воронин Н.М. Основы медицинской и биологической климатологии. – М. : Медицина, 1981. – 351 с.

39. Артериальная гипертензия у взрослых: Клинические рекомендации, разработчик «Российское кардиологическое общество», 2020. – 136 с.

40. Тырсин А.Н., Сурина А.А., Геворгян Г.Г. Программный комплекс для риск-анализа гауссовской стохастической системы // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2018612937. Правообладатель Тырсин А.Н. Заявл. 09.01.2018; опубли. 01.03.2018, реестр программ для ЭВМ.

К разделу 6:

1. Bair S. Pressure-Viscosity Behavior of Lubricants to 1.4 GPa and Its Relation to EHD Traction // Tribology Transactions, 2000. – Vol. 43. – Pp. 91–99.

2. Bair S., Qureshi F. Accurate Measurements of PressureViscosity Behavior in Lubricants // Tribology Transactions, 2002. – Vol. 45. – Pp. 390–396. – DOI: 10.1080/10402000208982564.

3. Bair S. The First Normal Stress Difference in a Shear Thinning Motor Oil at Elevated Pressure // Tribology Transactions, 2015. – Vol. 58. – Pp. 654–659. – DOI: 10.1080/10402004.2015.1012773.

4. Bonneau D. Mixed Lubrication in Hydrodynamic Bearings // D. Bonneau, A. Fatu, D. Souchet. – L. : ISTE Ltd, 2014. – 172 p.

5. LotfizadehDehkordi B., Shiller P.J., Doll G.L. Pressure- and Temperature-Dependent Viscosity Measurements of Lubricants With Polymeric Viscosity Modifiers // *Front. Mech. Eng.*, 2019. – Vol. 5. – DOI: 10.3389/fmech.2019.00018.
6. Study of effect of metal oleates on mixed and boundary lubrication / I.G. Levanov, E.A. Zadorozhnaya, I.V. Mukhortov, M.O. Eschiganov // *Tribology in Industry*, 2020. – 42(3). – Pp. 461–467.
7. User Guide. AVL Excite Power Unit, version 7.0.4, 2008. – 418 p.
8. Zadorozhnaya E. Study of HTHS Viscosity of Modern Motor Oils / E. Zadorozhnaya, I. Levanov, O. Oskina // *Procedia Engineering*, 2016. – Vol. 150. – Pp. 602–606. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.051.
9. Авдонькин Ф. Н., Денисов А.С. Прогнозирование изменения технического состояния подшипников коленчатого вала/ *Автомобильная промышленность*, 1975. – № 7. – С. 4–5.
10. Алтоиз Б.А. Трибологические особенности граничных смазочных слоев судовых топлив и масел / Алтоиз Б.А., Пыжов Е.В., Народницкая Г.В., Ханмамедов С.А. // *Судовые энергетические установки : научн.-техн. сб.*, 2003. – Вып. 9. – Одесса : ОНМА. – С. 80–86.
11. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М. : Наука, 1964. – 541 с.
12. Берёзина Е.В., Годлевский В.А. и др. Аналитическое описание структурированного смазочного слоя // Е.В. Берёзина, В.А. Годлевский, А.Г. Железнов. Д.С. Фомичев // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*, 2014. – Т. 14. – № 1. – С.74–79.
13. Богданович А.В., Еловой О.М. Некоторые вопросы оценки ресурса силовой системы «подшипник скольжения с вкладышем-циклически деформируемый вал» // *Актуальные вопросы машиноведения*, 2016. – Т. 5.– С. 218–222.
14. Гриб В.В. Расчёт ресурса и износа узлов трения численными методами. – В кн. : *Теория и практика расчётов деталей машин на износ*. – М. : Наука, 1982. – С. 106–110.
15. Григорьев М. А., Галактионов А. Е., Левит С. М. Методика ускоренных стендовых испытаний на безотказность бензиновых двигателей легковых автомобилей // *Двигателестроение*. – СПб. : Машиностроение, 1996. – № 1. – С. 54–56.
16. Гурвич И.Б. Оценка предельного технического состояния двигателей / И.Б. Гурвич, В.И. Чумак, А.П. Егорова // *Автомобильная промышленность*, 1972. – № 8. – С. 6–9.

17. Дойкин А.А. Исследование износа материала элементов трибосопряжения «поршень – цилиндр» тяжелонагруженного дизеля / А.А. Дойкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», 2012. – Вып. 19, № 12 (271). – С. 51–55.
18. Железнов А.Г. Диагностика надмолекулярной структуры смазочного слоя методом поляризационной трибометрии: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.04 / Железнов Антон Геннадьевич. – Иваново, 2015. – 147 с.
19. Задорожная Е.А. Динамика и смазка неньютоновскими жидкостями сложнонагруженных трибосопряжений поршневых и роторных машин: дисс. ... докт. тех. наук: 05.02.02 / Задорожная Е. А. – Челябинск, 2013. – 358 с.
20. Задорожная Е.А. Методология расчёта динамики сложнонагруженных трибосопряжений высокофорсированного дизельного двигателя / Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов, С.А. Пырьев // Вестник машиностроения, 2013. – № 12. – С. 42–47.
21. Икрамов У.А. Расчётные методы оценки абразивного износа. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
22. Канарчук В.Е. Долговечность и износ двигателей при динамических режимах работы / К.: «Наукова думка», 1978. – 256 с.
23. Когаев В.П. Прочность и износостойкость деталей машин / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М. : Высшая школа, 1991. – 319 с.
24. Крагельский И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
25. Леванов И.Г. Экспериментальные исследования реологических свойств всесезонных моторных масел / И.Г. Леванов, Е.А. Задорожная // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», 2011. – Вып. 17, № 11 (228). – С. 70–76.
26. Лукинский В.С., Зайцев, Е.И. Прогнозирование надёжности автомобилей / В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев. – Л. : Политехника, 1991. – 224 с.
27. Паллей З.С. Гидродинамический расчёт подшипников скольжения авиационных двигателей / З.С. Паллей. – Л. : ЛКВВИА, 1947. – 99 с.
28. Рождественский Ю.В. Связные задачи динамики и смазки сложнонагруженных опор скольжения: дисс. ... докт. тех. наук. – Челябинск, 1999. – 347 с.
29. Рождественский Ю.В. Исследование динамики сложнонагруженных подшипников скольжения при переменной угловой скорости шипа: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.02 / Маляр Н. С. – Челябинск, 1975. – 187 с.
30. Усовершенствованная модель реологических свойств граничного слоя смазки / И.В. Мухортов, Н.А. Усольцев, Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2010. – № 5. – С.8–19.

31. Хозенюк Н.А. Совершенствование метода упругогидродинамического расчета сложнонагруженных подшипников скольжения поршневых машин: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.02 / Хозенюк Надежда Александровна. – Челябинск, 2009. – 160 с.
32. Черепанов Д.А. Расчётно-экспериментальная модель изнашивания опор скольжения коленчатых валов поршневых ДВС: дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Черепанов. – СПб. : СПбГПУ, 2004. – 168 с.
33. Захаров С.М. Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей / С.М. Захаров, А.П. Никитин, Ю.А. Загорянский. – М. : Транспорт, 1981. – 181 с.
34. Бодякина Т.В. Обеспечение работоспособного состояния плунжерных пар топливного насоса высокого давления применением противозадирной присадки в дизельное топливо: дисс. ... канд. тех. наук: 05.20.03 / Бодякина Татьяна Владимировна. – Новосибирск, 2022. – 140 с.
35. Новичков А.В. Уменьшение износа плунжерных пар топливных насосов снижением обводненности дизельного топлива: моногр. / А.В. Новичков, Ю.А. Захаров, Е.Г. Рылякин. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 200 с.
36. Новиков Р.И., Полуян Л.В., Марков А.О., Гурьев Е.С. Способ ремонта топливного насоса высокого давления: патент RU № 2775799, С1. Публ. 11.07.2022. – Бюл. 20.