

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

Мажибрада Ирина

**Разработка модели оценки эффективности управления системой  
технического обслуживания и ремонта одноковшовых карьерных  
гидравлических экскаваторов**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (промышленность)

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Баранникова Ирина Владимировна

Москва 2018

## Содержание

Введение .....	5
1 Анализ предметной области .....	10
1.1 Обзор основных производственных процессов при ведении открытых горных работ.....	10
1.2 Классификация парка карьерного оборудования .....	12
1.3 Показатели качества одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	17
1.4 Факторы, влияющие на возможность возникновения отказов одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов .....	19
1.5 Влияние природно-технических факторов на изменение показателей качества одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов .....	20
1.6 Основные формы технического обслуживания и ремонта оборудования .....	24
Выводы по главе 1 .....	30
2 Анализ факторов для оценки возможности отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора.....	31
2.1 Характеристики гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	32
2.2 Описание и классификация основных факторов, влияющих на возможность отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	34
2.3 Категории отказов гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	39
2.4 Оценка влияния факторов на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	43
2.5 Возможность отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	48

Выводы по главе 2.....	52
3 Модель оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	53
3.1 Обзор методов оценки и прогнозирования .....	53
3.2 Нечеткие нейронные сети и их применение в задаче оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ .....	56
3.3 Формализация задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	58
3.4 Построение функций принадлежности факторов для задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора.....	60
3.5 Механизм нечеткого вывода в задаче оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	63
3.6 Построение нечеткой базы правил для оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	66
3.7 Нечеткая нейронная сеть для задачи «Оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора» .....	72
3.9 Построение модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	74
3.8 Программное обеспечение для решения задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	83
Выводы по главе 3.....	85

4. Реализация разработанной модели и ее экспериментальное исследование .....	86
4.1 Построение функций принадлежности факторов в задаче оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	86
4.2 Формирование базы правил и построение нечеткой нейронной сети для решения задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора .....	98
4.3 Экспериментальное исследование модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора на контрольном примере .....	103
4.4. Оценка на адекватность полученной модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора .....	105
4.5. Оценка эффективности внедрения модели оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ .....	106
Выводы по главе 4 .....	107
Заключение .....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	109
СПИСОК ПРИЛОЖЕНИЙ .....	124
Приложение А .....	125
Приложение Б .....	126
Приложение В .....	127
Приложение Г .....	128
Приложение Д .....	129

## Введение

**Актуальность темы и степень ее разработанности.** В мире открытым способом добывается более 80% твердых полезных ископаемых. Из года в год растет количество добываемой горной массы, а также увеличиваются масштабы карьеров.

Одним из решающих условий дальнейшего совершенствования производства является обеспечение горнодобывающей промышленности высокопроизводительным и надежным оборудованием. Максимальная производительность и минимальные эксплуатационные затраты обеспечиваются своевременным и качественным проведением технических обслуживаний и ремонтов. Горное оборудование, в том числе и одноковшовые карьерные гидравлические экскаваторы (ОКГЭ), простаивает около половины рабочего времени, где треть времени простоев связана с восстановлением его работоспособности. Эти факты подчеркивают актуальность повышения надежности оборудования путем возможности предупреждения появления отказа.

В последние годы заметно проявляется разрыв между сложностью и высокой стоимостью техники и низким уровнем ее обслуживания. Это одна из главных причин внезапных длительных простоев, связанных с обнаружением и устранением причин отказов, а также большими затратами на ремонтные работы. Одним из важнейших инструментов управления системой технического обслуживания и ремонта оборудования является оценка возможности появления отказа любых частей оборудования, в том числе и карьерного.

Техническое обслуживание и ремонт оборудования (ТОиР) должны проводиться с учетом специфики предприятия, природно-геологических факторов и свойств оборудования (рекомендации производителя горного оборудования, срок эксплуатации, режим работы).

В настоящее время все большее число компаний стремятся, в целях оптимального расходования материальных средств, перейти от регламентированных ремонтов к ремонтам оборудования, исходя из его текущего технического (фактического) состояния.

Организация централизованного сбора информации по отказам в совокупности с данными мониторинга позволила бы снизить время простоев горного оборудования. Создание такого инструмента организации сложно представить без использования современных методов и средств автоматизации.

Поэтому разработка новой модели оценки эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов, позволяющей повысить качество и надежность технического обслуживания и ремонта является актуальной научной и практической задачей.

Повышение качества работы системы технического обслуживания и ремонта горного оборудования охватывает широкий круг проблем, таких как, определение и повышение надежности оборудования, способы исследования надежности оборудования, планирование технических осмотров и ремонтов. Этим вопросам посвящены работы Р.Ю. Подэрни, В.Ф. Замышляева, Л.И. Кантовича, В.Н. Гетопанова, Г.П. Берлявского, В.И. Зайкова, В.В. Ржевского, В.М. Рачек и других.

Без использования современных методов и средств автоматизации реализация задачи одновременного снижения эксплуатационных затрат и аварийности для любого горного оборудования невозможна. Чтобы облегчить информационную нагрузку на персонал ремонтных служб от информационных потоков, требуется поддержка принятия решений. Исследования в этом направлении проводились А.В. Леоненковым, Т.А. Гавриловой, В.Ф. Хорошевским, С. Осовским, В.И. Тинякова и др.

Исследованием в области теории возможностей занимались Л. Заде, Д. Дюбуа, А. Прад, а в области нечеткой логики и нечетких нейронных сетей – В.В. Круглов, М.И. Дли, В.С. Тарасян, Д. Рутковская, В.Я. Пивкин, В.Я. Бакулин, Д.И. Кореньков, Ю.С. и др.

**Целью** данного научного исследования является повышение эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта на основе исследования системных связей факторов и категорий отказов гидравлической системы (ГС) одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов.

**Задачи.** Исходя из цели исследования, были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ условий, принципов работы ОКГЭ, его основных частей и проблем отказа ГС ОКГЭ;
- определение и классификация технических, внешних факторов, а также текущих характеристик и их уровня влияния на возможность появления различных категорий отказов ГС ОКГЭ;
- разработка модели оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ на основе технических, внешних факторов, а также текущих характеристик ГС ОКГЭ;
- оценка взаимосвязи факторов и категорий отказов на основе экспертно-моделирующих процедур, позволяющих сформировать функции принадлежности каждого фактора, а также спроектировать базу правил (БП) и получить балльную оценку возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ;
- оценка эффективности модели оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ.

**Идея работы** заключается в выявлении значимых факторов и изучении их влияния на возможность появления категорий отказа ГС ОКГЭ, создании на базе этого исследования модели, позволяющей осуществить эффективный переход системы ТОиР с формы «Планово-предупредительные ремонты» (ППР) на форму «Обслуживание по фактическому состоянию» (ОФС).

**Научные положения и их новизна:**

- разработана модель оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ, впервые позволяющая оценить эту возможность с учетом технических и внешних факторов, а также текущих характеристик на основе субъективного анализа качества и надежности функционирования основных частей ОКГЭ;

- оценку взаимосвязи факторов и категорий отказов необходимо осуществлять на основе методики экспертно-моделирующих процедур, что позволит сформировать функции принадлежности каждого фактора, а также разработать базу правил и получить балльную оценку возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ;

- оценку эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта ГС ОКГЭ необходимо осуществлять на основе расчетов показателей технической готовности оборудования и уровня затрат на техническое обслуживание и ремонты с учетом агрегированных показателей мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту ОКГЭ.

**Методы исследования.** В диссертационной работе были использованы методы системного анализа, теория возможностей, экспертные оценки, нейронные сети и нечеткие множества, а также теория графов.

**Научное значение работы** состоит в выделении основных категорий отказов ГС ОКГЭ на основании анализа классификации отказов; формировании модели оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ с учетом технических факторов (Т), внешних факторов (К) и текущих характеристик (С) ГС ОКГЭ для повышения эффективности функционирования системы ТОиР.

**Научная новизна** состоит в разработке модели оценки эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта однокорпусных карьерных гидравлических экскаваторов, позволяющей решить задачу оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ. Для окончательного расчета оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ использовались нечеткие методы и алгоритмы, которые обеспечивают обработку значений технических, внешних, текущих характеристик ГС ОКГЭ и позволяют выявить взаимосвязи, как между ними, так и между категориями отказа на основе использования аппарата нечетких множеств.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что разработанная модель оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ является основой для разработки комплекса мероприятий по повышению эффективности



управления системой технического обслуживания и ремонта одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов.

**Реализация выводов и рекомендаций** работы осуществлены путем внедрения их в компании, осуществляющей техническое обслуживание и ремонт горного оборудования ООО «Пак Поинт» (г. Белград, Сербия).

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертации и ее отдельные положения докладывались на:

- семинарах кафедры АСУ НИТУ МИСиС (г. Москва 2013-2017 гг);
- международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва 2013-2017 гг);
- международной научно-практической конференции «Новая наука: проблемы и перспективы» (г. Стерлитамак ,04 октября 2015 г, 29 сентября 2015 г);
- международной научно-практической конференции «Новая наука: от идеи к результату» (г. Сургут, 29 мая 2016 г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано семь научных работ (в том числе три работы – в рецензируемых изданиях по перечню ВАК).

**Объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений; содержит 28 таблиц, 43 рисунка и список литературы из 142 наименований.

## **1 Анализ предметной области**

### **1.1 Обзор основных производственных процессов при ведении открытых горных работ**

Открытые горные работы включают в себя большое количество процессов, начиная от подготовки горных пород к выемке и добычных работ до транспортирования и переработки горной массы.

Согласно [99, с. 5] производственные процессы при ведении открытых горных работ разделяются на следующие этапы:

- подготовка горных пород к выемке;
- выемочно-погрузочные работы;
- перемещение карьерных грузов;
- отвалообразование вскрышных пород и складирование полезного ископаемого;
- вспомогательные работы.

На каждом этапе используется большое количество различного оборудования. На основании литературных источников [93, с. 10; 1; 59, с. 31] получены средние значения «доли затрат и коэффициенты использования оборудования во времени для каждого этапа» [9]. В таблице 1.1 приведены «поэтапные доли затрат и коэффициенты использования оборудования во времени для каждого из этапов» [9].

Этап «Подготовка горных пород к выемке» является самым сложным. На данный этап уходит примерно 40% всех материальных затрат. Низкий коэффициент использования оборудования во времени (30%) чаще всего обусловлен организацией труда.

Удельный вес этапа «Выемочно-погрузочных работ» в общих затратах достигает 25 %, а коэффициент использования оборудования во времени 0.65. При этом 30 % времени простоев оборудования на данном этапе связано с восстановлением работоспособного состояния, причем, на долю плановых

ремонт приходится около 82 % затрат времени, а на долю аварийных простоев – около 18 %.

Таблица 1.1 - Использование карьерного оборудования на основных этапах открытых горных работ

Наименование этапа	Коэффициент использования	Доля в затратах, %
Подготовка горных пород к выемке	0,30	40
Выемочно-погрузочные работы	0,65	25
Перемещение карьерных грузов	0,70	30
Отвалообразование вскрышных пород и складирование полезного ископаемого	0,85	3
Вспомогательные работы	0,20	2

На этапе «Перемещения карьерных грузов» уходит 30 % затрат, а коэффициент использования оборудования во времени достаточно высокий (0,7). Материальные затраты на этапе «Отвалообразование вскрышных пород и складирование полезного ископаемого» и на этапе «Вспомогательные работы» в сумме достигают лишь 5 % всех затрат и поэтому, не берутся во внимание при данном исследовании.

Основное требование, предъявляемое к карьерному оборудованию — обеспечение бесперебойности работы. Из вышесказанного видно, что большое значение имеет эффективное использование техники во времени и снижение ее простоев, что достигается повышением надежности работы оборудования.

На этапе «Выемочно-погрузочные работы» низкий коэффициент использования оборудования во времени (0,65) обусловлен частыми ремонтами. Для выемки и погрузки горных пород обычно применяются одноковшовые экскаваторы. Коэффициент использования одноковшовых экскаваторов не превышает 0,5-0,6 [98, с. 167]. Такой низкий коэффициент обусловлен недостаточно эффективно организацией технического обслуживания и ремонта.

## **1.2 Классификация парка карьерного оборудования**

Горное оборудование по технологическому признаку, т.е по роду выполняемой работы, принято делить на семь классов [90, с. 15]: машины для подготовки горных пород к выемке, выемочно-погрузочные, выемочно-транспортирующие, транспортирующие, отвалообразующие машины, сортировочно-обогащительное оборудование, машины для вспомогательных работ. Чаще всего на этапе выемочно-погрузочном этапе используются экскаваторы.

Классифицировать экскаваторы можно «по следующим признакам [90, с. 197]:

- назначению и роду выполняемой работы;
- вместимости ковша;
- теоретической производительности;
- виду рабочего оборудования;
- виду ходового оборудования;
- виду силового оборудования» [90, с. 197].

Основываясь на [90, с. 199], предлагается следующая классификация экскаваторов для задачи оценка возможности появления категории. На основании этой классификации была определена область дальнейшего исследования. На рисунке 1.1 представлена данная классификация экскаваторов.



Рисунок 1.1 - Классификация экскаваторов

«Рабочий цикл одноковшового карьерного экскаватора складывается из четырех последовательных операций: наполнение ковша (черпание), перемещение его к месту разгрузки (транспортирование), разгрузка и перемещение порожнего ковша к месту черпания для воспроизведения нового цикла» [90, с. 197].

Гидравлические экскаваторы по сравнению с механическими экскаваторами более гибкие и компактные. «Устройство составных частей очень простое по сравнению с механическими устройствами. Например, размер гидравлического мотора значительно меньше электрического мотора, который производит такую же энергию» [97, с. 1]. Работа гидравлической системы плавная и тихая, а

вибрация сведена к минимуму. В работе [120, с. 72-75] проведено сравнение производительности гидравлического экскаватора R-9350 и механического экскаватора ЭКГ-15, работающих практически в равных условиях на разрезе «Краснобродский». Выяснилось что средняя часовая производительность данного гидравлического экскаватора на 28 % выше, чем средняя часовая производительность механического экскаватора.

«За последние 15 лет динамика соотношения между электрическими и гидравлическими экскаваторами в общем объеме поставок на территорию РФ и стран СНГ имеет тенденцию к выравниванию» [3, с. 16].

В данный момент на российском рынке из общего объема поступающих на горнодобывающие предприятия России карьерных экскаваторов только 30 % составляют российские машины, остальные – иностранного производства [106]. Нишу по гидравлическим машинам заняли четыре мировых лидера: американская корпорация Caterpillar, немецкий концерн Liebherr, японские компании Komatsu и Hitachi.

Современные одноковшовые экскаваторы состоят из следующих основных частей:

- рабочее оборудование (РО);
- ходовое оборудование (ХО);
- электрогидравлическое оборудование (ЭГО);
- другое (ДР).

В работе [17, с.15] определены основные показатели надежности экскаваторов: среднее время между отказами и среднее время восстановления после отказа, а также приведены значения среднего времени между отказами, среднего времени восстановления после отказа, наработки и суммарное время простоев гидравлических экскаваторов KOMATSU PC 3000, PC 5500 и PC 8000.

На рисунке 1.2 представлен внешний вид одноковшовых экскаваторов на примере KOMATSU PC 3000.

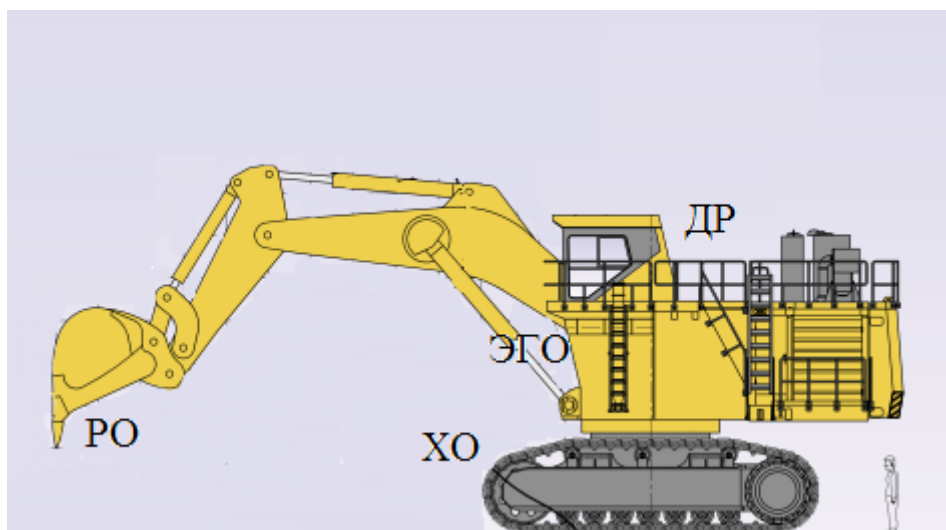


Рисунок 1.2 - Внешний вид одноковшового карьерного гидравлического экскаватора на примере PC 3000

В таблице 1.2 показаны средние проценты выходов из строя основных частей с детализацией по основным элементам одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов PC 3000, PC 5500 и PC 8000 [17, с. 15-20].

Таблица 1.2 - Средний процент выхода из строя основных частей экскаватора PC 3000

Основная часть	Элементы	Выход из строя, %
Рабочее оборудование	Ковш, стрела, рукоять, механизм напора	25
Ходовое оборудование	Ходовое оборудование: рама гусеничной цепи, направляющие колеса, гусеничная цепь	10
Электро-гидравлическое оборудование	Элементы низковольтной и средневольтной аппаратуры. Элементы гидравлической системы: соединения трубопроводов, клапаны, цилиндры	45
Другое	Систем отопления кабины оператора, вентиляция, джойстики	20

В таблице 1.3 даны значения суммарного времени простоев (STF), наработки на отказ (MTBF) и среднего времени на восстановление после отказа (MTTR) экскаватора PC 3000 при наработке – 60 700 моточасов [17, с. 14].

Таблица 1.3 - Основные показатели надежности экскаватора РС 3000

Основная часть	STF, час	MTBF, час	MTTR, час
Рабочее оборудование (РО)	1883,50	831,50	25,80
Ходовое оборудование (ХО)	1136,00	2168,00	51,64
Электро-гидравлическое оборудование (ЭГО)	2321,00	3321,14	57,45
Другое (ДР)	1573,00	1011,70	26,21

На рисунке 1.3 представлена сравнительная диаграмма распределения отказов основных частей, суммарное время простоев наработка на отказ и среднее время восстановления одноковшового карьерного гидравлического экскаватора РС 3000 [17, с. 14].

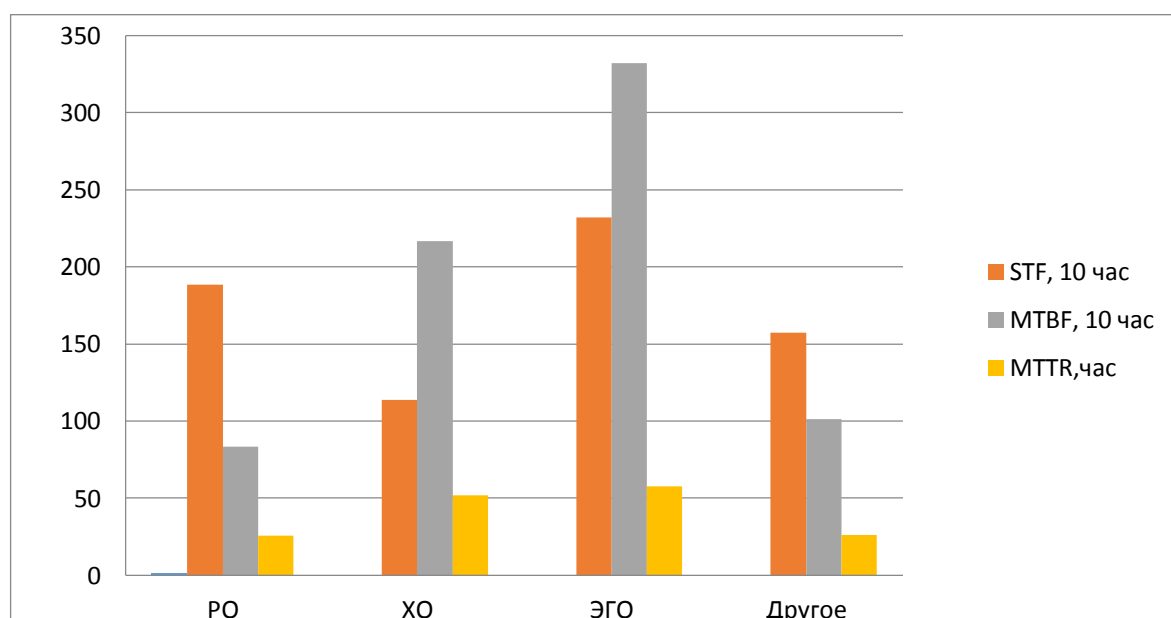


Рисунок 1.3 - Сравнительная диаграмма распределения отказов основных частей ОКГЭ РС 3000

Анализ таблицы 1.3 показывает, что как рабочее, так и электрогидравлическое оборудование имеют высокое значение времени простоев (45 %), но достаточно небольшие средние затраты времени на восстановление (57,45 часов). С другой стороны, наименьшее суммарное время простоев (1136 часов) и большую наработку на отказ (2168 часов) имеет ходовое оборудование, но при этом оно требуют средних затрат времени на восстановление (51,64 часов).



Таким образом, объектом исследования являются одноковшовые карьерные гидравлические экскаваторы, так как обеспечение их безотказной работы позволит значительно снизить материальные затраты горнодобывающего предприятия.

### **1.3 Показатели качества одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

В процессе эксплуатации одноковшового карьерного гидравлического экскаватора необходимо оценивать его возможности в различных условиях. Такую оценку можно производить на основе «эксплуатационных свойств, представляющих собой объективную особенность машины, проявляющуюся при ее создании, испытаниях, эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте и т.д.» [132, с. 1].

Для обеспечения безаварийной работы с минимальными простоями одноковшовые карьерные гидравлические экскаваторы «должны обладать высоким качеством, т.е. совокупностью свойств, обуславливающих их пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с их назначением» [111, с.7].

«Количественную характеристику одного или нескольких свойств горных машин, составляющих их качество, рассматриваемую применительно к определенным условиям эксплуатации, называют показателем качества» [50, с. 3].

Основные стадии жизненного цикла одноковшового карьерного гидравлического экскаватора, на которых формируется его качество, являются [50, с. 3]: проектирование, изготовление и эксплуатация.

Основными показателями качества одноковшового карьерного гидравлического экскаватора являются:

- надежность;
- безотказность;
- ремонтпригодность;
- долговечность;

- сохраняемость.

Надежность машины – «свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, транспортирования и хранения» [36, с. 2]. «Надежность является сложным свойством, которое состоит из сочетания свойств: безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости» [50, с. 30].

«Безотказность – свойство горной машины непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки» [50, с. 30].

«Ремонтпригодность – свойство горной машины, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта» [36, с. 2].

«Долговечность – свойство горной машины сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. К показателям долговечности относятся срок службы между капитальными ремонтами и срок службы до списания машины» [36, с. 2].

«Сохраняемость – свойство горной машины сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение хранения и (или) транспортирования и после» [36, с. 2].

Горные машины принято «оценивать комплексным показателем качества, который характеризует несколько их свойств (параметров). Относительную характеристику качества машин, основанную на сравнении комплексных показателей с соответствующими базовыми показателями, называют уровнем качества» [32, с. 2].

Достоверную оценку надежности одноковшовых карьерных гидравлических экскаватора дают следующие показатели:

- вероятность безотказной работы  $W(t)$

$$W(t) = 1 - \frac{r}{N}; \quad (1.1)$$

- частота отказов  $f(t)$

$$f(t) = \frac{r}{N}; \quad (1.2)$$

- интенсивность отказов  $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}; \quad (1.3)$$

- среднее время наработки на отказ  $T_o$  (MTBF)

$$T_o = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{N} = \frac{\sum t_i}{N}; \quad (1.4)$$

- интенсивность восстановления  $\mu$

$$\mu = \frac{1}{t_e}; \quad (1.5)$$

- коэффициент простоя  $K_n$

$$K_n = \frac{t_B}{T + t_B}; \quad (1.6)$$

- среднее время на восстановление  $T_v$  (MTTR)

$$T_v = \frac{t_{v1} + t_{v2} + \dots + t_{vn}}{M} = \frac{\sum t_{vi}}{M}. \quad (1.7)$$

где  $r$  – число объектов, отказавших в момент времени  $t$ , шт.;

$N$  – число исправных объектов, шт.;

$M$  – количество отказов, шт.;

$t_i$  – время наработки на отказ  $i$ -ого экскаватора, час;

$t_{vi}$  – время на восстановление  $i$ -ого экскаватора, час;

$t_B$  – время восстановления, час.

Показатели качества тесно взаимосвязаны с такими факторами, как конструктивные, технологические и природно-технические.

#### **1.4 Факторы, влияющие на возможность возникновения отказов одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов**

В процессе эксплуатации под действием различных взаимосвязанных природно-технических факторов непрерывно ухудшается техническое состояние оборудования. Причины, вызывающие изменение технического состояния горных

машин могут быть описаны следующими факторами: конструктивные, технологические, природно-технические.

К конструктивным факторам следует отнести: конструкция машины, начальные зазоры и посадки сопряженных деталей, скорость скольжения, выбор материалов для изготовления сопряженных деталей, легкость доступа для технического обслуживания и смены деталей при ремонте и т. п.

К технологическим факторам можно отнести качество материалов, из которых изготовлен одноковшовый карьерный гидравлический экскаватор.

Природно-технические факторы характеризуют режим работы машины, во времени и ее текущую рабочую скорость. К природно-техническим относятся:

- климатические условия – атмосферные осадки, высокие и низкие температуры, влага, солнечная радиация;
- горно-геологические условия – воздействия газов, запыленность воздуха;
- биологическая среда – микроорганизмы;
- физико-механические свойства разрабатываемых горных пород.

Были исследованы специфика, условия и принципы работы карьерного оборудования, в том числе одноковшового карьерного гидравлического экскаватора. Также дана общая классификация основных факторов, влияющих на его работоспособность. Разработка модели оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ возможна после изучения влияния природно-технических факторов на изменение показателей надежности одноковшовых экскаваторов. Для более полной оценки их влияния на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ природно-технические факторы следует разделить на природные факторы и технические факторы.

### **1.5 Влияние природно-технических факторов на изменение показателей качества одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов**

Природно-технические факторы оказывают существенное влияние на все элементы ОКГЭ. «Эксплуатация экскаваторов сопровождается разрушением деталей, их взаимным перемещением, трением, нагревом, химическим преобразованием, изменением в процессе работы физических величин и

конструктивных параметров (размеров, взаимностью расположения и т.д.)» [4, с. 8].

Существенное влияние на ОКГЭ также оказывают технические факторы. На каждую основную часть ОКГЭ воздействует определенный набор технических факторов. Во второй главе более подробно рассмотрены технические факторы, оказывающие влияние на возможность отказа электро-гидравлической системы ОКГЭ.

При ведении открытых горных работ на все карьерное оборудование достаточно ощутимое влияние оказывают природные факторы: климатические условия и горно-геологические свойства пород. В таблице 1.4 показано влияние природных факторов на изменение показателей надежности ОКГЭ [9].

Таблица 1.4 - Влияние природных факторов на изменение показателей надежности ОКГЭ

Фактор		Последствие
Климатические	Низкие температуры	Возникает наибольшее число поломок. Масла и технических жидкости не поступают по каналам и трубопроводам.
	Высокие температуры	Ускорение процесса старения деталей из пластмассы, а также старение изоляции электротехнических оболочек.
	Солнечная радиация	Ускроение процесса старения деталей из пластмассы или резины. В материалах образуются трещины.
	Повышенное содержание влаги в воздухе	Влага ускоряет процесс изнашивания материалов, а также снижает прочность изоляции.
Горно-геологические	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Прочность</li> <li>- Крепость</li> <li>-Твердость</li> <li>- Хрупкость</li> <li>- Разрыхляемость</li> <li>- Буримость</li> <li>- Абразивность</li> </ul>	Основным показателем, характеризующим процесс экскавации, является удельное сопротивление копанию.

«Существенную роль при открытой разработке месторождений полезных ископаемых имеют климатические условия. Так, зимой производительность экскаваторов снижается. Повышенный износ ковша при низких температурах связан с неравномерным натяжением и сбеганием каната подъема в сторону из-за примерзания и прилипания породы к барабану» [50, с. 21]. С повышением температуры снижается надежность электрического оборудования машин, а непрерывное действие солнечных лучей способствует разрушению верхнего слоя конвейерных лент.

«Высокая влажность воздуха, особенно в сочетании с температурой окружающей среды, способствует повышению интенсивности коррозии металлов, окислению контактов электрических аппаратов и приборов, а также быстрому старению резинотехнических изделий» [125, с. 32].

Запыленность воздуха значительно влияет на надежность ОКГЭ. Так как эксплуатация ОКГЭ часто «ведется в условиях с повышенным пылеобразованием, то пыль является основным источником абразивного изнашивания трущихся узлов и деталей» [125, с. 32].

В таблице 1.5 показано влияние условий эксплуатации на изменение показателей надежности элементов одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов.

Таблица 1.5 - Влияние условий эксплуатации на изменение показателей надежности элементов ОКГЭ

Отказ элемента		Условия эксплуатации
Рабочее оборудование	Ковш (зубья)	Прочность, крепость, твердость, хрупкость, абразивность, неправильная эксплуатация
	Стрела	Перегруз, низкие температуры, «усталость металла»
	Рукоять	Скорости подъема ковша
	Механизм напора	Низкие температуры, перегруз, износ
Ходовое оборудование	Ходовое оборудование: рама гусеничной цепи, направляющие колеса, гусеничная цепь.	Засорение грязью, перепады температуры, износ
Электро-гидравлическое оборудование	Провода, элементы соединения трубопроводов, клапаны, цилиндры. Элементы низковольтной и средневольтной аппаратуры, (датчики, провода, электродвигатели систем вентиляции).	Засорения, износ, перепады температуры, трение, высокая запыленность воздуха, повышенное содержание влаги в воздухе, высокие и низкие температуры
Другое	Система отопления кабины оператора, вентиляция, джойстики и остекление кабины	Износ, перепады температуры, засорения

Поддержание высокой технической готовности ОКГЭ обеспечивается только при соблюдении норм периодичности и объема работ по техническому обслуживанию и плановым ремонтам, а также применением качественных материалов и запчастей при высокой квалификации оснащенных инструментом и приспособлениями работников подразделения технического сервиса.

## **1.6 Основные формы технического обслуживания и ремонта оборудования**

Согласно [50, с. 19] техническим состоянием объекта называется «совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств, которая характеризуется в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией».

Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) – «это комплекс организационных мероприятий по обслуживанию и ремонту оборудования, включает в себя планирование, подготовку, реализацию технического обслуживания и ремонта для заданных условий эксплуатации с заданными последовательностью и периодичностью» [50, с. 39].

Техническое обслуживание (ТО) – «комплекс операций по поддержанию работоспособности оборудования при использовании по назначению, ожиданию, транспортированию и хранению» [50, с. 39]. В техническое обслуживание могут входить операции как «мойка оборудования, контроль его технического состояния, очистка, смазывание, замена некоторых составных частей и т.д.» [34] ТО подразделяется на регламентированное и нерегламентированное.

Ремонт – «комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности оборудования и восстановления ресурсов оборудования или его составных частей» [50, с. 39].

К основным задачам ТОиР следует отнести

- поддержание оборудования в работоспособном состоянии и предотвращение отказов оборудования;
- эффективную организацию мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту оборудования;
- увеличение коэффициента технического использования оборудования за счет повышения качества технического обслуживания и ремонта, а также уменьшения простоя в ремонте;
- выполнение ремонтных работ и обслуживания по графику, согласованному с планом производства;



- своевременную подготовку необходимых запасных частей.

«Максимальная производительность и минимальные эксплуатационные затраты обеспечиваются своевременным проведением технических обслуживаний и ремонтных работ. Одним из важнейших инструментов системы технического обслуживания и ремонта является оценка возможности отказа любого элемента горной машины» [9].

В настоящее время на горных предприятиях часто возникают следующие проблемы в области технического обслуживания и ремонта оборудования:

- «высокий удельный вес сильно изношенного оборудования, требующего частых ремонтов и работающего с низкой эффективностью;
- нехватка средств для обновления или модернизации парка оборудования при одновременной необходимости сокращения затрат на его ремонт и обслуживание в условиях жесткой конкуренции;
- нерациональная организация технического обслуживания и ремонта оборудования, использование устаревшей системы ТОиР;
- недоиспользование трудового потенциала специалистов и рабочих» [126, с. 130].

Способы планирования мер по техническому обслуживанию и ремонту классифицируются следующим образом:

- по событию;
- регламентному обслуживанию;
- по состоянию.

Ремонты подразделяется на

- текущий ремонт – «выполняемый для обеспечения или восстановления работоспособности объекта и состоящий в замене и/или восстановлении отдельных легкодоступных его частей» [34];
- средний – «выполняемый для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса объекта с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния объекта в объеме, предусмотренном в документации» [34];

- капитальный ремонт – «выполняемый для восстановления исправности и полного или близкого к полному ресурса объекта с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые» [34].

Мировой опыт показывает, что существует три формы технического обслуживания и ремонта:

- РПО – реактивное профилактическое обслуживание;
- ППР – планово-предупредительные ремонты;
- ОФС – обслуживание по фактическому техническому состоянию.

На рисунке 1.4 представлены формы ТОиР и способы планирования мер по реализации каждой из них.

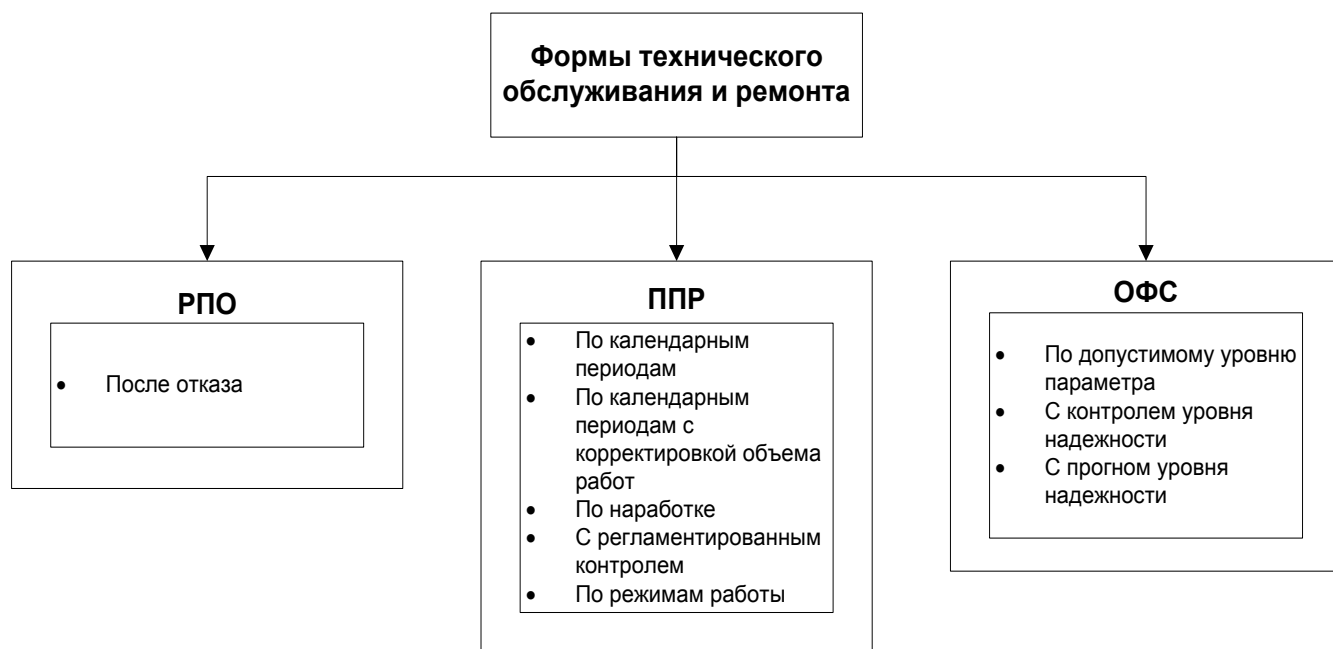


Рисунок 1.4 - Формы ТОиР

Реактивное профилактическое обслуживание (РПО) – форма ТОиР, при которой ремонт элемента производится только после его отказа. Данную форму технического обслуживания следует применять только для дешевого вспомогательного оборудования ОКГЭ, например, для системы отопления кабины оператора.

Обслуживание по регламенту (ППР) – данная форма ТОиР исключает появление отказа оборудования путем проведения заранее запланированных мероприятий по техническому обслуживанию и плановых ремонтов.

В данной форме устанавливаются регламентные сроки эксплуатации оборудования на основании статистических данных отказов. В реальных условиях такая форма ТОиР не всегда работает, «строгая линейная зависимость между наработкой на отказ или сроком эксплуатации и техническим состоянием оборудования редко существует» [34]. Остаточный ресурс оборудования не должен определяться только временем его эксплуатации, так как в природе не может быть абсолютно одинаковые условия эксплуатации двух машин.

Несмотря на все недостатки, на сегодняшний день, система ППР является наиболее популярной формой ТОиР, но с приходом рыночной экономики ситуация постепенно меняется. В целях снижения эксплуатационных затрат начинает постепенно формироваться новая форма ТОиР – ОФС.

Обслуживание по фактическому состоянию (ОФС) – стратегия технического обслуживания и ремонта, направленная на прогнозирование возможных поломок и отказов оборудования. Стремительное развитие и усовершенствование микропроцессорной техники позволило создать аппарат диагностики и прогнозирования технического состояния оборудования. Таким образом появилась новая форма технического обслуживания и ремонта.

Основная идея формы ОФС системы ТОиР состоит в том, что при планировании технического обслуживания и ремонта учитывается не только наработка оборудования, но и его реального текущего технического состояния.

Основой ОФС является техническое диагностирование и прогнозирование вероятности отказа оборудования. С помощью этих средств проводится контроль параметров состояния любого объекта.

Переход на технологию обслуживания ОКГЭ «по фактическому состоянию» позволит:

- контролировать реальное текущее техническое состояние основных частей ОКГЭ;
- уменьшить финансовые и трудовые затраты при эксплуатации ОКГЭ;
- продлить срок службы основных частей ОКГЭ;
- существенно уменьшить количество внезапных отказов;

- планировать сроки технического обслуживания и ремонта.

В таблице 1.6 представлены достоинства и недостатки рассмотренных форм технического обслуживания и ремонта.

Таблица 1.6 - Сравнительный анализ форм обслуживания оборудования

Тип	Достоинства	Недостатки
РПО	Не требует больших финансовых затрат на организацию технического обслуживания и ремонта.	Высокая вероятность внезапных отказов.
ППР	Плановые профилактические осмотры и различные виды плановых ремонтов позволяют поддерживать заданный уровень исправности и работоспособности оборудования	Полностью не исключает вероятность появления внезапных отказов, так как базируется только на статистических данных отказов аналогичного оборудования.
ОФС	Исключает вероятность внезапных отказов, так как учитывает текущее состояние оборудования.	Требует больших финансовых затрат на внедрение, которое включает в себя, подготовку персонала и модернизацию отдела ТОиР.

Так как форма РПО технического обслуживания и ремонта полностью используется в основном для вспомогательного оборудования, а не для сложных и дорогих систем, таких как гидравлическая система, более подробно рассмотрим формы ППР и ОФС. На рисунке 1.5 представлены графики изменения затрат на ТОиР экскаватора ЭКГ – 5А за 20 лет эксплуатации по формам: а) ППР; б) ОФС [104, с. 11].

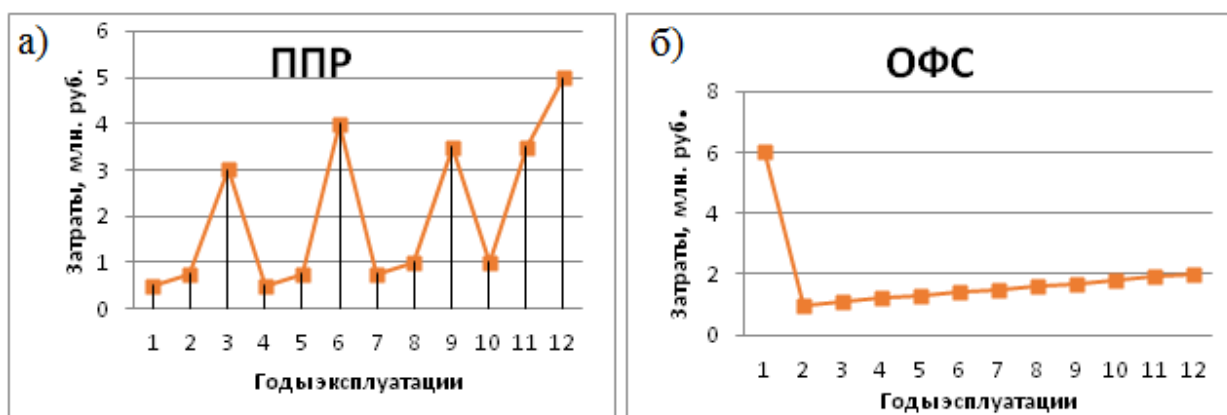


Рисунок 1.5 - График изменения затрат на ТОиР экскаватора по формам: а) ППР и б) ОФС

На рисунке 1.6 представлен график сравнения количества отказов форм ППР и ОФС в 2007 – 2008 годах. [104, с. 11]

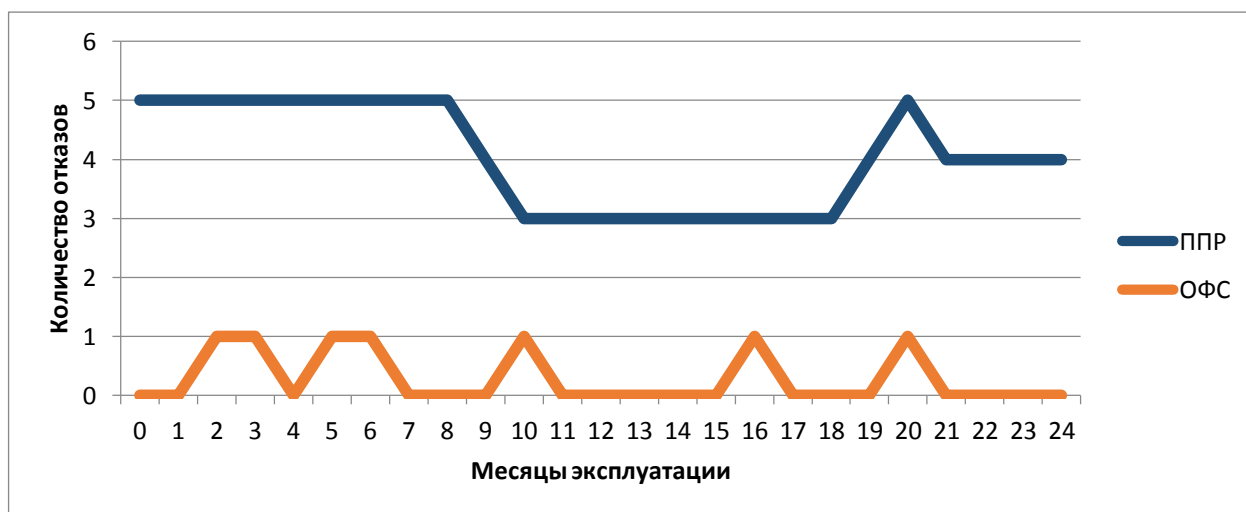


Рисунок 1.6 - График сравнения количества отказов систем ППР и ОФС

Из анализа данных (рисунок 1.8) следует, что при переходе на форму ОФС затраты на ТОиР сократились примерно на 10%, а количество отказов на 90%. Переход на форму ОФС ОКГЭ невозможен без грамотной организации работы службы технического обслуживания и ремонта, а также без оценки возможности отказов карьерного оборудования, в том числе электро-гидравлической системы ОКГЭ.

**Выводы по главе 1**

1. Открытые горные работы включают в себя несколько этапов, на которых применяется большое количество различного оборудования. На выполнение выемочно-погрузочных работ, с использованием одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов, уходит до 25% всех материальных затрат.

2. Электро-гидравлическое оборудование экскаватора имеет высокий уровень времени простоев (45%). Снижение количества отказов электро-гидравлического оборудования позволит оптимизировать работу системы ТОиР гидравлических одноковшовых экскаваторов в целом.

3. Максимальная производительность ОКГЭ и минимальные эксплуатационные затраты обеспечиваются своевременным проведением технических обслуживаний и ремонтных работ.

4. Переход на форму ОФС сокращает затраты на ТОиР до 10%, а количество отказов на 90% по сравнению с ППР. Для перехода на форму ОФС необходимо разработать модель оценки возможности появления отказов ОКГЭ.

## **2 Анализ факторов для оценки возможности отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

Одной из важнейших задач технического обслуживания и ремонта (ТОиР) является обеспечение безотказной работы любой карьерной машины.

До недавнего времени считалось, что самая эффективная форма ТОиР – планово-предупредительные ремонты ППР, но теоретические исследования и практическое применение показали, что форма ТОиР обслуживания по фактическому состоянию (ОФС) эффективнее формы ППР [104].

В настоящее время производители ОКГЭ (KOMATSU, Hyundai и другие) используют высокотехнологичные датчики и технологии микроэлектроники для того, чтобы обеспечить максимальную безопасность эксплуатации продукции, улучшить условия труда, сэкономить время диагностики неисправностей оборудования и предупредить о возможности его отказа.

Таким образом, одной из самых актуальных задач системы управления ремонтом и техническим обслуживанием стала задача построения модели оценки возможности появления отказа ГС ОКГЭ и выявления категории возможного отказа. Решение этой задачи позволит оперативно найти «слабые точки» в гидравлической системе и при необходимости провести дополнительные мероприятия (например, замена узла) или скорректировать план технического обслуживания электро-гидравлической системы ОКГЭ.

Обеспечение бесперебойной работы электро-гидравлического оборудования позволит оптимизировать работу ТОиР гидравлических одноковшовых карьерных экскаваторов в целом. С позиций системного анализа электро-гидравлическое оборудование экскаватора следует рассматривать как систему, состоящую из двух подсистем: электрической и гидравлической. Так как подсистема любой системы может быть сама рассмотрена как система, то отдельно рассмотрим гидравлическую систему одноковшового карьерного гидравлического экскаватора (ГС ОКГЭ).

## **2.1 Характеристики гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

Гидравлические системы ОКГЭ «используются для передачи механической энергии с одного места в другое. Гидравлический насос приводится в действие механической энергией. Механическая энергия преобразуется в энергию давления и кинетическую энергию гидравлической жидкости и затем снова преобразуется в механическую энергию для выполнения работы» [27].

«Насос подаёт масло, преобразуя механическую энергию в энергию давления и кинетическую энергию. Привод является частью системы, которая преобразует гидравлическую энергию обратно в механическую энергию для выполнения работы. В гидравлических системах используются три условия работы: сила, скорость и направления» [27].

Несмотря на все достоинства и высокую надежность, в гидравлических системах случаются отказы. Для лучшего понимания причин отказов была проанализирована структура гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора.

Гидравлическая система ОКГЭ состоит из следующих основных частей (рисунок 2.1):

- насос – часть системы, которая качает масло;
- приводы – существует линейный и роторный приводы. Гидравлический цилиндр является линейным приводом, а гидравлический мотор является роторным приводом;
- бак хранения масла;
- клапаны – контролируют направление и величину потока и ограничивают давления. Различают три типа клапанов: клапаны регулирования давления масла, клапаны управления направлением и клапаны регулирования скорости потока масла;
- линии трубопровода – это все соединительные линии между составными частями гидравлической системы. «Различают рабочие линии (напорная линия,



линия всасывания, сливная линия) и нерабочие линии (дренажная линия, пилотная линия)» [27].

На рисунке 2.1 представлен пример типовой схемы гидравлической системы ОКГЭ.

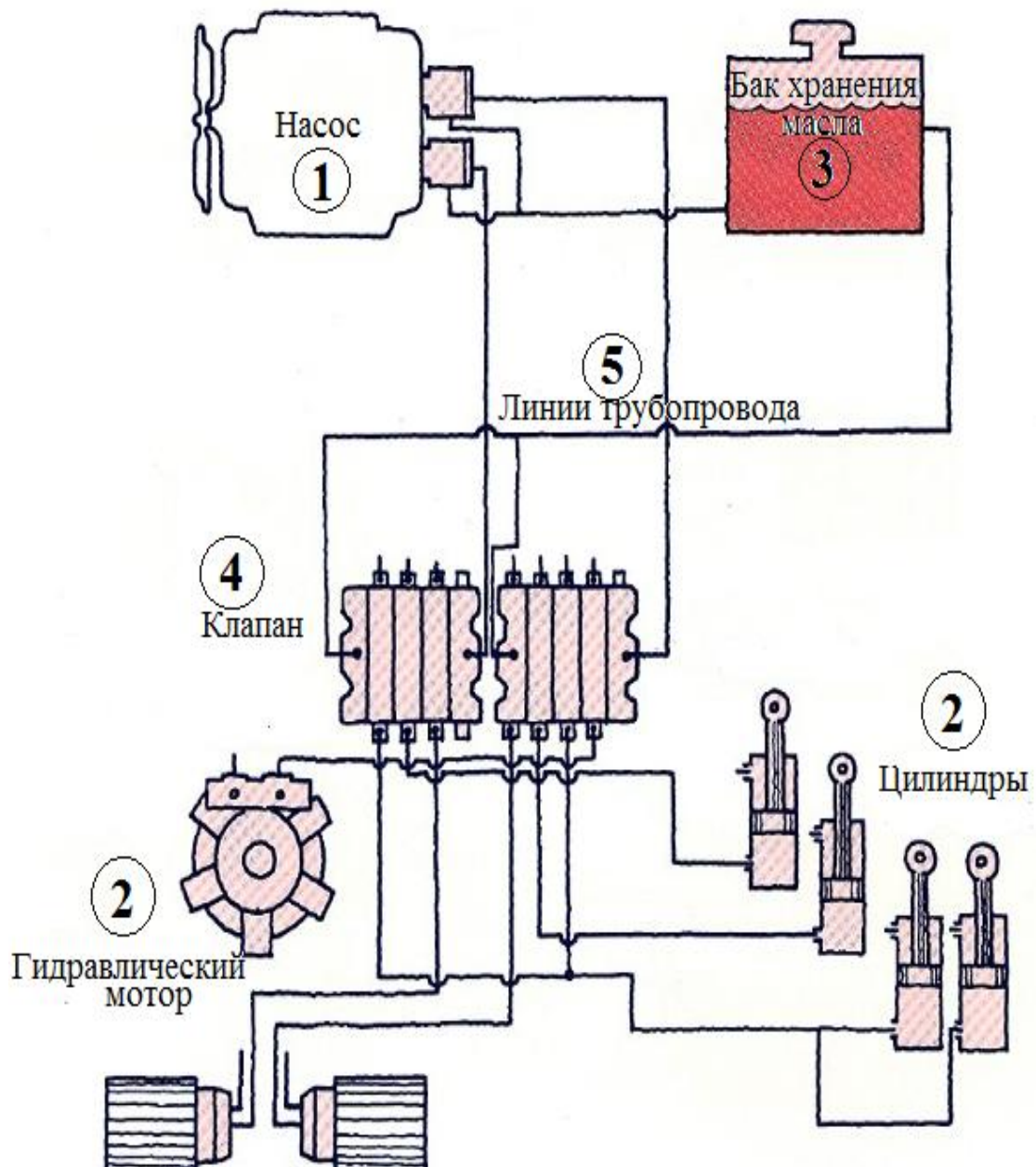


Рисунок 2.1 - Типовая схема гидравлической системы ОКГЭ

В процессе эксплуатации ОКГЭ под действием различных взаимосвязанных природных и технических факторов непрерывно ухудшается техническое состояние гидравлической системы ОКГЭ.

## **2.2 Описание и классификация основных факторов, влияющих на возможность отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

Несмотря на регулярное проведение планового технического обслуживания и ремонта по рекомендациям производителя, в практике гидравлические системы одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов иногда внезапно ломаются. Это происходит по той причине, что надежность оборудования сильно зависит от условий его эксплуатации, которая при выбранной руководством форме обслуживания ППР не учитываются. Для перехода на форму ОФС необходимо рассмотреть ряд внутренних и внешних факторов, от которых зависит возможность отказа гидравлической системы ОКГЭ.

Все влияющие факторы следует разделить на внутренние и внешние. Внутренние факторы отображают текущие процессы в ГС ОКГЭ, а внешние отображают поведение внешней среды. Внутренние факторы делятся на технические факторы и текущие характеристики ОКГЭ. На возможность отказа гидравлической системы наиболее сильное влияние оказывают технические факторы (Т), такие как температура воды в двигателе, температура и давление масла в системе, уровень загрязнения масла и прочее. Также, на работоспособность гидравлической системы ОКГЭ влияют и свойства самого объекта – срок эксплуатации ОКГЭ, срок эксплуатации элементов – текущие характеристики ОКГЭ (С). В меньшей степени влияет внешние факторы (К), в том числе климатические условия и горно-геологические условия. Схема взаимосвязи факторов и возможности отказа ГС ОКГЭ представлена на рисунке 2.2.

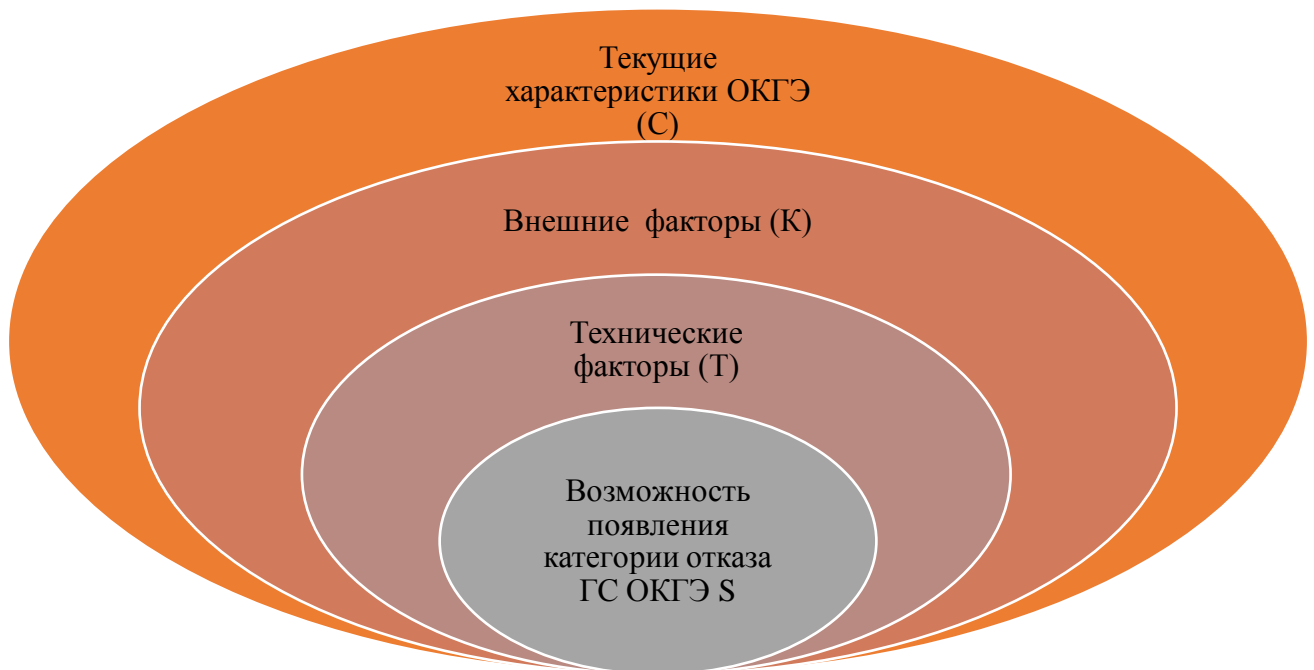


Рисунок 2.2 - Схема факторов, влияющих на возможность отказа ОКГЭ

К техническим факторам (Т) следует отнести температуру воды в двигателе, температуру масла, давление масла в двигателе, давление в главном насосе, давление в контрольном контуре, частоту вращения двигателя, уровень масла, шум в насосе, расход масла, уровень загрязненности гидравлического масла. Все эти факторы напрямую влияют на работу гидравлической системы и оказывают большое влияние на возможность отказа гидравлической системы. Список технических факторов представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Технические факторы

Обозначение	Значение фактора	Единица измерения	Диапазон	Приборы и инструменты для измерения
T <sub>1</sub>	Температура воды в двигателе	°С	0-100	Температурные датчики
T <sub>2</sub>	Температура масла	°С	0-150	Температурные датчики
T <sub>3</sub>	Давление масла в двигателе	МПа	0-10	Вакуумметры или манометры
T <sub>4</sub>	Давление в главном насосе	МПа	0-40	Вакуумметры или манометры
T <sub>5</sub>	Давление в контрольном контуре	МПа	0-10	Вакуумметры или манометры
T <sub>6</sub>	Частота вращения двигателя	об/мин	0-2500	Тахометр
T <sub>7</sub>	Уровень масла	-	- низкий - нормальный, - высокий	Индикаторы уровня масла
T <sub>8</sub>	Шум в насосе	дБ	0-100	Измерители шума
T <sub>9</sub>	Расход масла (поток масла)	л/мин	0-8280	Расходомеры
T <sub>10</sub>	Уровень загрязненности гидравлического масла	Микрон / мл.	0-160 000	Счетчики частиц

Из совокупности внешних факторов, оказывающих влияние на изменение надежности ОКГЭ (таблица 1.4), наибольшее влияние на гидравлическую систему ОКГЭ оказывают климатические условия: температура воздуха, запыленность воздуха и содержание влаги в воздухе, а также горно-геологические условия.

На основании данных таблицы 1.4 из множества горно-геологических условий на возможность отказа ГС ОКГЭ наибольшее влияние оказывает – крепость породы  $f$  (по шкале проф. М.М. Протодяконова).

Выбранные для исследования внешние факторы (К) и их диапазоны представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Внешние факторы

Значение фактора		Единица измерения	Диапазон
Климатические условия			
К <sub>1</sub>	Температура воздуха	°С	-50 до 50
К <sub>2</sub>	Запыленность воздуха	мг/м <sup>3</sup>	0-20
К <sub>3</sub>	Содержание влаги в воздухе	%	0-100
Горно-геологических условия			
К <sub>4</sub>	Крепость породы	Шкала проф. М.М. Протодяконова (приложение А)	0,3-20

К текущим характеристикам ОКГЭ (С), которые влияют на работоспособность гидравлической системы, следует отнести: выработанный ресурс ОКГЭ, выработанный ресурс отдельных элементов гидравлической системы ОКГЭ (насос, приводы, бак хранения масла, клапаны, линии трубопровода). В таблице 2.3 приведены текущие характеристики ОКГЭ, влияющие на возможность отказа его гидравлической системы.

Таблица 2.3 - Текущие характеристики ГС ОКГЭ

Обозначение	Характеристика фактора	Диапазон, час
C <sub>1</sub>	Выработанный ресурс ОКГЭ	0-131,4*10 <sup>3</sup>
C <sub>2</sub>	Выработанный ресурс насоса ГС ОКГЭ	0-43,8*10 <sup>3</sup>
C <sub>3</sub>	Выработанный ресурс приводов ГС ОКГЭ	0-43,8*10 <sup>3</sup>
C <sub>4</sub>	Выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКГЭ	0-30,66*10 <sup>3</sup>
C <sub>5</sub>	Выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ	0-8,76*10 <sup>3</sup>
C <sub>6</sub>	Выработанный ресурс линий трубопровода ГС ОКГЭ	0-8,7610 <sup>3</sup>

Значения технических и внешних факторов снимаются с помощью датчиков и измерительных приборов, установленных на горном оборудовании, а значения текущих характеристик ОКГЭ – берутся из документации предприятия. Схема передачи данных представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 - Схема передачи данных на сервер обработки данных

Таким образом, определены внешние и внутренние факторы, влияющие на возможность отказа гидравлической системы ОКГЭ и их диапазоны. Для решения задачи оценки возможности отказа ГС ОКГЭ следует определить основные категории отказов.

### **2.3 Категории отказов гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

Для обеспечения своевременного оперативного реагирования и проведения предупредительных ремонтов и работ следует выделить основные категории отказов гидравлической системы ОКГЭ. После анализа технических описаний и инструкций по эксплуатации одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов [101, 19, 102, 57] и схемы гидравлической системы ОКГЭ (рисунок 2.1), все отказы были систематизированы и сгруппированы, с целью выявления взаимосвязи причин их появления.

Дерево отказов – многоуровневая структура взаимосвязанных событий, полученных в результате прослеживания возможных отказов в обратном порядке, в целях определения возможных причины их возникновения. «Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий и пр.) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями)» [81].

Построенное дерево отказов ГС ОКГЭ представлено на рисунке 2.4, а в таблице 2.4 – описание элементов дерева. На рисунке представлены три уровня дерева. Верхний уровень отображает отказ всей гидравлической системы ОКГЭ, средний – основные категории отказов, а на нижнем уровне представлены самые часто встречающиеся неисправности ГС ОКГЭ.

Отказ ГС ОКГЭ

Категория

отказа ГС ОКГЭ

Неисправности

ГС ОКГЭ

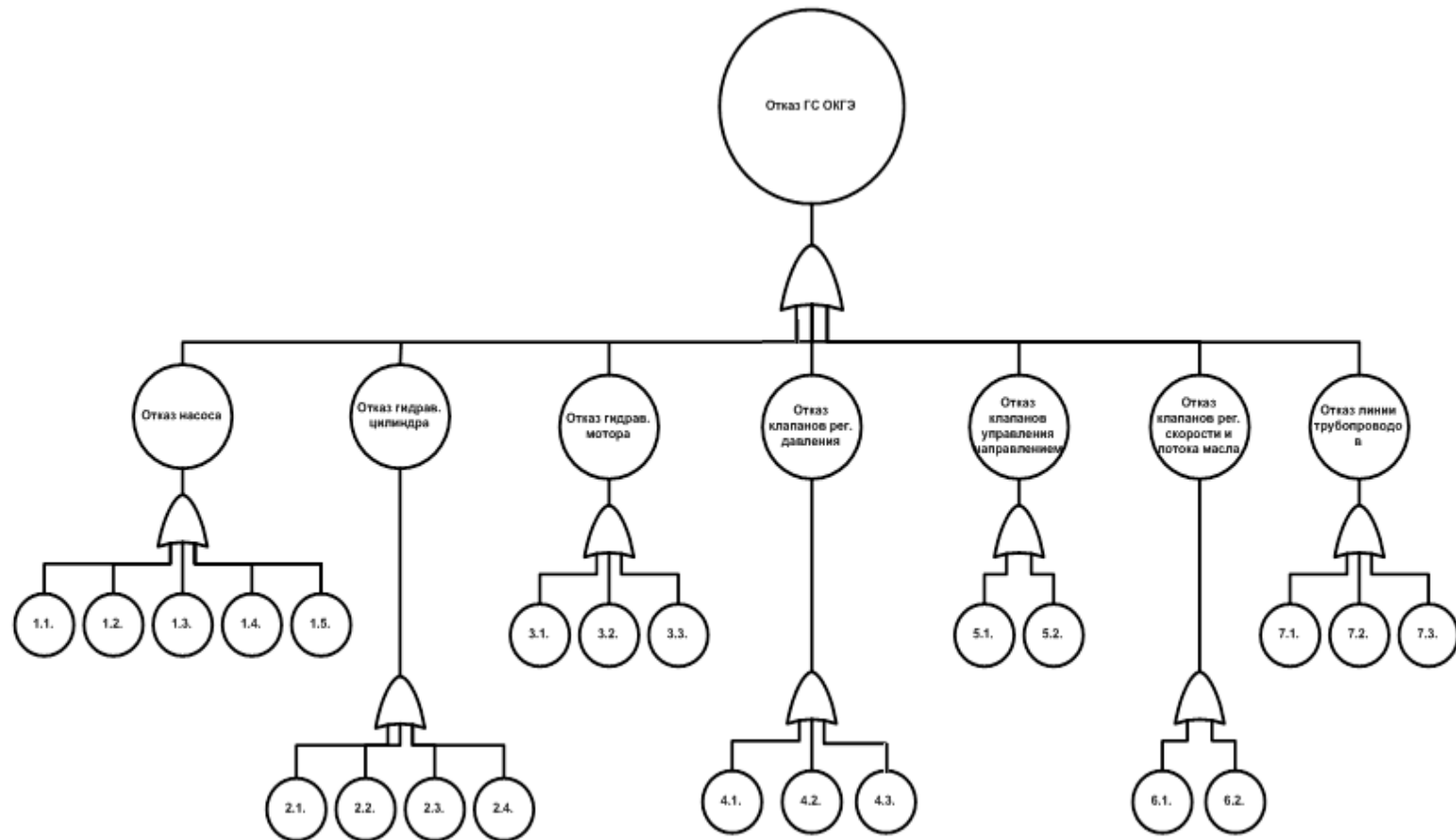


Рисунок 2.4 - Дерево отказов ГС ОКГЭ



Таблице 2.4 - Описание элементов дерева

№ элемента	Описание
1.1.	Неисправен привод (муфта, вал, ротор)
1.2.	Неправильное направление вращения вала насоса
1.3.	Повышенный износ насоса и низкий объемный к.п.д.
1.4	Насос засасывает и нагнетает в ГС воздух
1.5	Насос не создает давления
2.1.	Плохое крепление корпуса гидравлического цилиндра
2.2.	Механические повреждения или чрезмерный износ деталей привода цилиндра
2.3.	Воздух в гидроцилиндрах
2.4.	Износ или повреждение уплотнений гидроцилиндров
3.1.	Плохое крепление корпуса гидравлического мотора
3.2.	Механические повреждения или чрезмерный износ деталей привода мотора
3.3.	Повышенная температура (перегрев) масла в гидросистеме
4.1.	Вибрация элементов клапанов регулирования давления
4.2.	Давление клапана регулирования давления близкое к рабочему давлению
4.3.	Поврежден или загрязнен воздушный фильтр-сапун
4.4.	Недостаточное давление в канале управления
5.1.	Вибрация элементов клапанов управления направлением
5.2.	Неработоспособны клапанов управления направлением
6.1.	Вибрация элементов клапанов регулирования скорости и потока масла
6.2.	Неработоспособны клапанов регулирования скорости и потока масла
7.1.	Плохое закрепление трубопроводов
7.2.	Деформация (сужение) трубопроводов
7.3.	Загрязнения трубопроводов

На основании дерева отказов выделено семь основных категории отказов гидравлической системы ОКГЭ. Категории отказов ГС ОКГЭ представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Категории отказов и их обозначения

Обозначение	Категория отказа
$S_1$	Отказ насоса
$S_2$	Отказ гидравлического цилиндра
$S_3$	Отказ гидравлического мотора
$S_4$	Отказ клапанов регулирования давления
$S_5$	Отказ клапанов управления направлением
$S_6$	Отказ клапанов регулирования скорости потока масла.
$S_7$	Отказ линии трубопровода

Каждая категория отказа  $S_j$  содержит множество основных элементарных неисправностей. Например, в категорию «Отказ насоса», входят такие неисправности как «Неисправен привод», «Неправильное направление вращения вала насоса», «Повышенный износ насоса» и прочее. Каждая элементарная неисправность имеет свой «вес». Некоторые элементарные неисправности приводят к отказу всей системы, а другие не влияют на общую работоспособность системы. В данной работе целью является оценка возможности появления категории ГС ОКГЭ, а не возможности наступления элементарной неисправности.

Определив основные категории отказа гидравлической системы ОКГЭ, необходимо оценить влияния каждого из выявленных фактов  $T_i$ ,  $K_i$  и  $C_i$  на конкретную категорию отказа ГС ОКГЭ  $S_j$ .

## 2.4 Оценка влияния факторов на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора

Анализ факторов, влияющих на возможность отказа ГС ОКГЭ, позволил разделить все факторы на выходные и входные, а также на количественные и качественные факторы (таблица 2.6).

Таблица 2.6 - Классификация факторов, влияющих на возможность отказа ГС ОКГЭ

Входные			Выходные
<b>Количественные</b>			
Технические факторы	Технические характеристики ГС ОКГЭ	Внешние факторы	Категории отказов ГС ОКГЭ
T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> , T <sub>8</sub> , T <sub>9</sub> , T <sub>10</sub> ,	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> , C <sub>5</sub> , C <sub>6</sub>	K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub> , K <sub>4</sub>	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>
<b>Качественные</b>			
Технические факторы			-
T <sub>7</sub>			-

Состояние гидравлической системы ОКГЭ можно представить в виде связей между факторами, оказывающими влияние не только на возможность появления категории отказа, но и на появление самой категорией отказа.

Получить статистические данные для оценки степени влияния факторов на возможность появления категории отказа достаточно сложно из-за большого количества влияющих факторов. Поэтому были проведены экспериментальные исследования методом экспертных оценок.

В качестве экспертов были приглашены: персонал горнодобывающего предприятий ОАО «Раменский ГОК» и ОА «Богаевский карьер» и преподаватели кафедры «ГОТиМ» НИТУ МИСиС. Для оценки степени квалификации в данной предметной области была построена система критериев оценки. В эту систему вошли критерии: образование, должность, стаж работы с ОКГЭ, вовлеченность в проблемную область (приложение Г).

Проводилось заочное анкетирование, где «экспертам предлагалось оценить степень влияния каждого фактора на каждую категорию отказа в баллах по шкале от 1 до 100» [74, с. 221]. Итоговая оценка степени влияния каждого фактора  $\beta_i$  может быть получена по формуле 2.1, а степень согласованности суждений экспертов  $V_i$  по формуле 2.2

$$\beta_i = \frac{\sum_{d=1}^m D_{id}}{\sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m D_{id}} \quad (2.1)$$

$$V_i = \frac{\sqrt{(D-1)^{-1} \sum_{d=1}^D (\beta_{id} - \beta_i)^2}}{\beta_i} \quad (2.2)$$

где  $D_{ik}$  – оценка степени влияния  $i$ -го фактора  $d$ -м экспертом на возможность появления  $j$ -ой категории отказа  $S_j$ ;

$m$  – количество факторов;

$D$  – количество экспертов.

Коэффициент конкордации экспертов считается по формуле

$$W = \frac{12Q}{D^2(m^3 - m)} \quad (2.3)$$

где  $Q$  – сумма квадратов отклонений сумм рангов;

$m$  – количество факторов;

$D$  – количество экспертов.

На основе экспертного опроса были получены коэффициенты влияния факторов на появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$ . Полученные коэффициенты легли в основу модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы ОКГЭ  $S_j$ .

На рисунке 2.5 представлено влияние технических факторов ( $T_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$ .

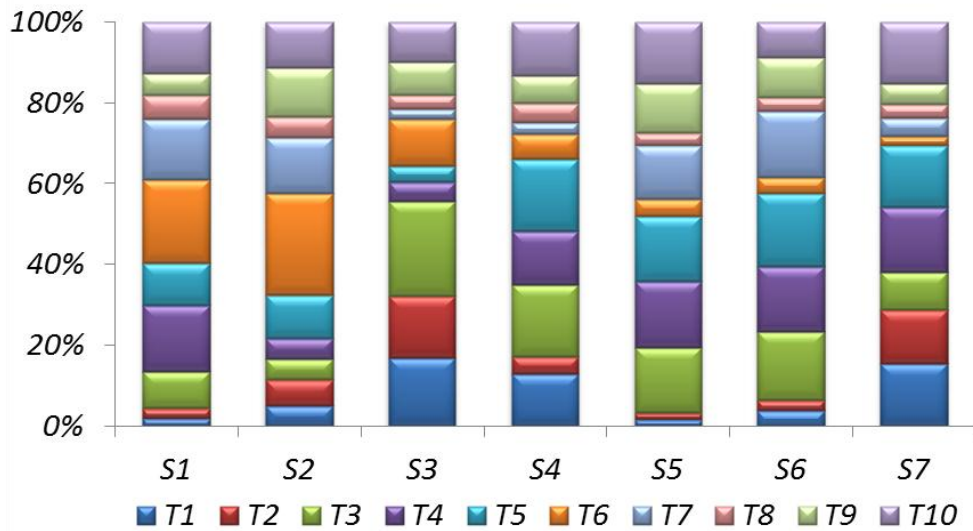


Рисунок 2.5 - Влияние технических факторов ( $T_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

На рисунке 2.6 представлено влияние внешних факторов ( $K_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ.

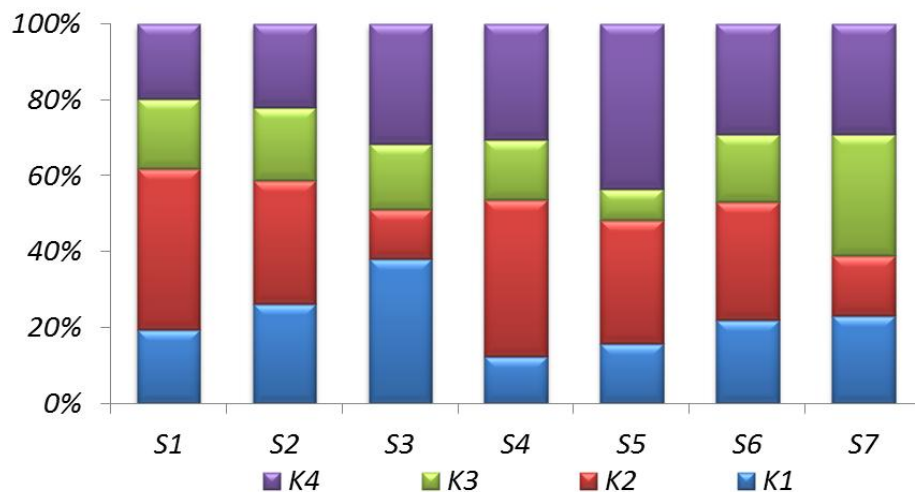


Рисунок 2.6 - Влияние внешних факторов ( $K_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

На рисунке 2.7 представлено влияние текущих характеристик ОКГЭ ( $C_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ.

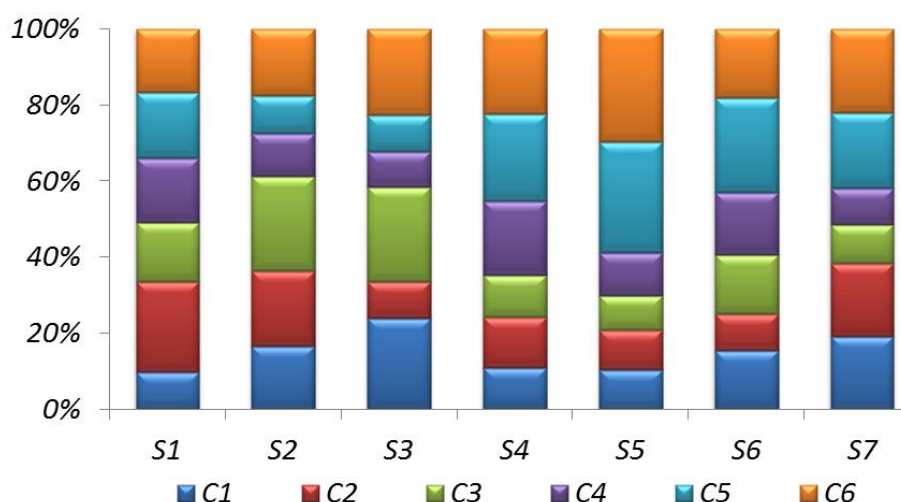


Рисунок 2.7 - Влияние текущих характеристик ОКГЭ ( $C_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

Для ранжирования степени влияния технические факторы была построена диаграмма, представленная на рисунке 2.8. На данной диаграмме представлены средние значения степени влияния каждого технического фактора ( $T_i$ ) на категории отказов.

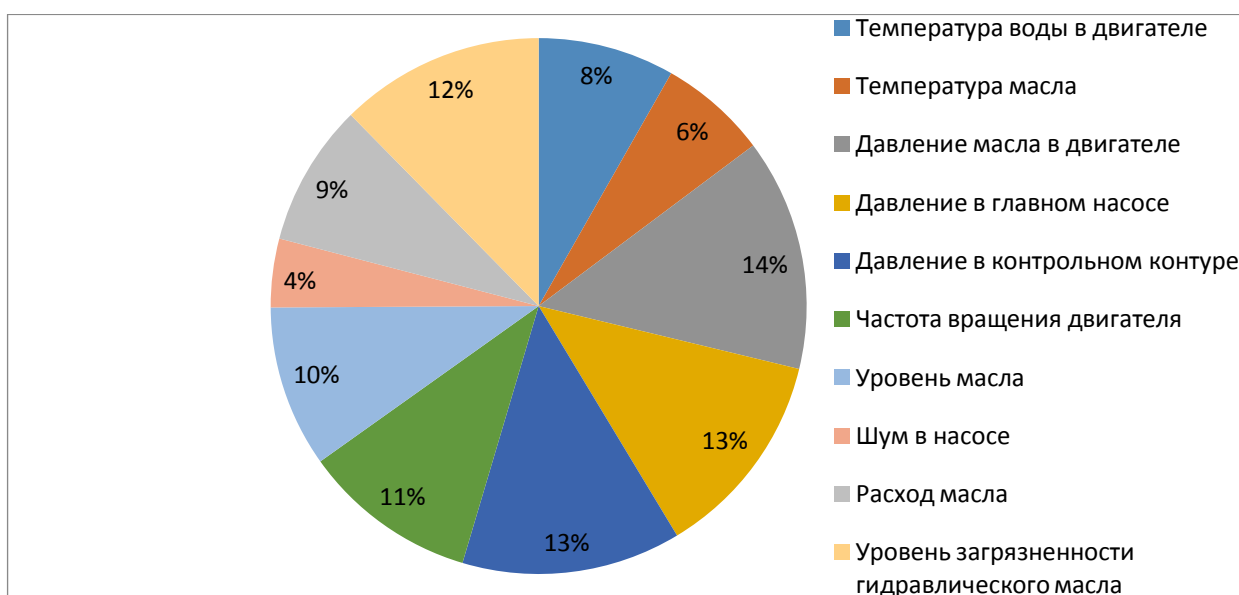


Рисунок 2.8 - Средние значения влияния технических факторов ( $T_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

В результате выявлено, что из ряда технических факторов ( $T_i$ ) наибольшее влияние на возможность появления категории отказ  $S_j$  оказывают воздействия: давление масла в двигателе, давление в главном насосе, давление в контрольном

контуре и уровень загрязненности гидравлического масла. Суммарная степень влияния этих факторов составляет 52 %.

Аналогичным образом, построены и диаграммы средних значений степеней влияния внешних и текущих факторов на категории отказов. Диаграмма средних значений степеней влияния внешних факторов ( $K_i$ ) представлены на рисунке 2.9.

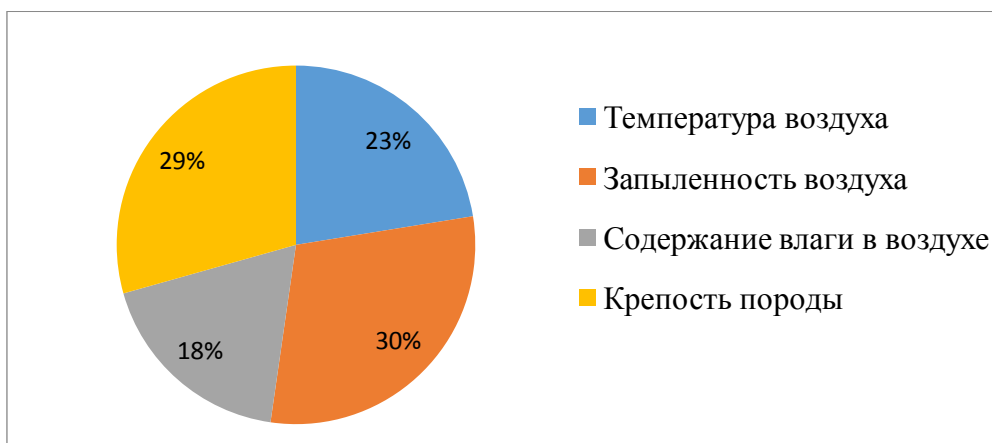


Рисунок 2.9 - Средние значения влияния внешних факторов ( $K_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

На данной диаграмме видно, что из ряда внешних факторов ( $K_i$ ), наибольшее влияние на возможность появления категорий отказов оказывает запыленность воздуха (30 %), а наименьшее влияние – содержание влаги в воздухе (18 %).

На рисунке 2.10 представлена диаграмма средних значений степеней влияния текущих характеристик ОКГЭ ( $C_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ.

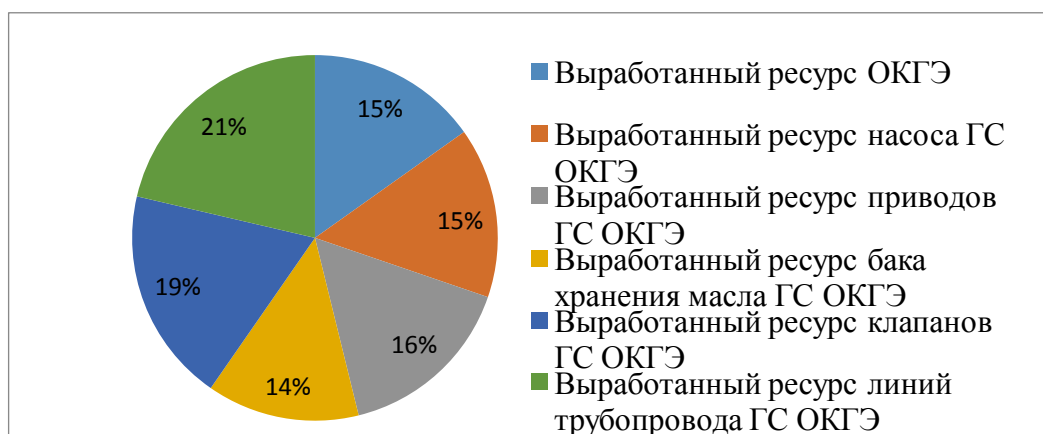


Рисунок 2.10 - Средние значения влияния текущих характеристик ОКГЭ ( $C_i$ ) на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

В результате выявлено, что из ряда текущих характеристик ОКГЭ в наибольшей степени на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ влияют выработанный ресурс линий трубопроводов (21 %) и выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ (19 %).

Таким образом, определены основные категории отказа ГС ОКГЭ, а также, проанализированы все факторы, влияющие на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ и определены их степени влияния на категории отказа. Возможность появления категории отказа ГС позволит ЛПР определить «слабые» точки ГС ОКГЭ и своевременно реагировать. Также на основании оценок возможности появления категорий отказов, можно оценить общую возможность отказа гидравлической системы ОКГЭ в целом.

## 2.5 Возможность отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора

Модель оценки возможности отказа  $P$  и категории отказа представлена структурно на рисунке 2.11.

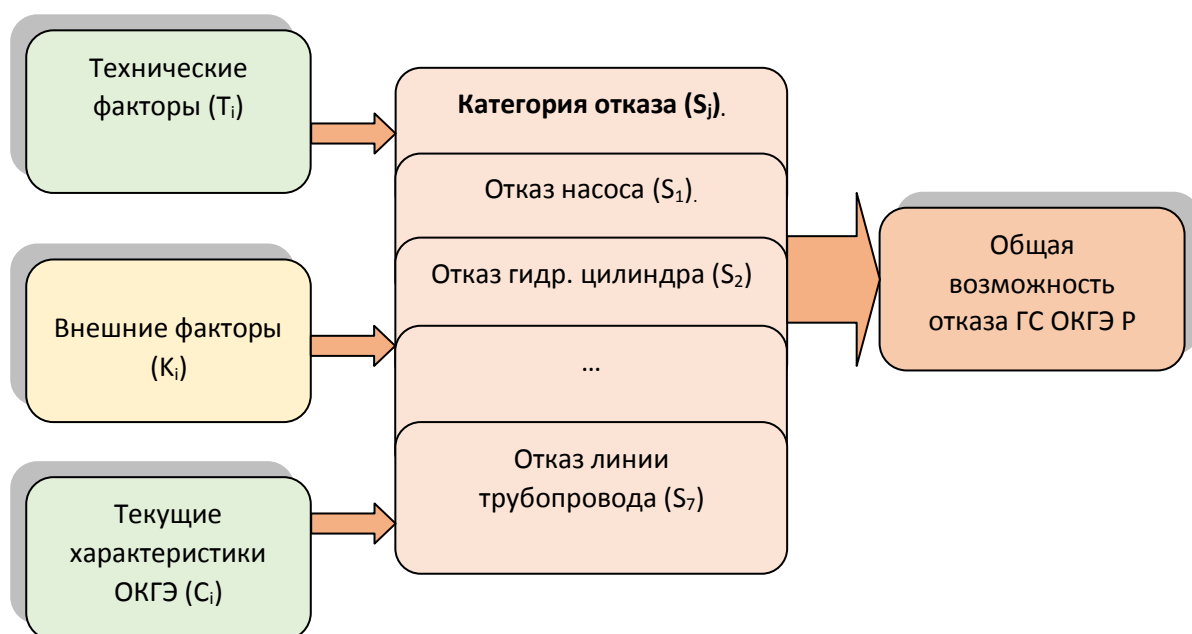


Рисунок 2.11 – Схема взаимосвязей факторов и категорий возможности отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

Общая возможность отказа ГС ОКГЭ  $P$ , состоящей из  $j$  событий (категорий отказа) по теореме сложения возможностей [42, с. 38] определяется как



$$P = \bigoplus_{S_j \in S} S_j = \max_{S_j \in S} S_j \quad (2.4)$$

где  $P$  – общая возможность отказа ОКГЭ;

$S_j$  – категория отказа;

$j$  – количество категорий.

Возможность отказа гидравлической системы ОКГЭ в целом  $P$  позволяет оперативно оценить состояние гидравлической системы и принять необходимые меры по предупреждению возникновения поломок. Для анализа состояния ГС ОКГЭ следует использовать список диапазонов общей возможности отказа ГС ОКГЭ, полученного путем моделирования состояния ГС при различных значениях  $S_j$ :

- 0 – 20 - скорее всего отказов не будет;
- 20 – 40 - небольшая возможность отказа;
- 40 – 60 - средняя возможность отказа;
- 60 – 80 - высокая возможность отказа;
- 80 – 100 - очень высокая возможность отказа.

Возможность отказа гидравлической системы ОКГЭ  $P$  можно визуально представить в виде шкалы (рисунок 2.12).

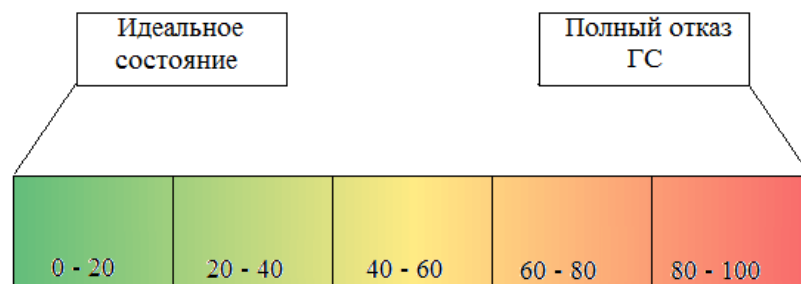


Рисунок 2.12 - Шкала возможностей отказа ГС ОКГЭ  $P$

Шкала на рисунке 2.12 и результаты моделирования возможности отказа гидравлической системы позволяют оперативно оценить состояние ГС ОКГЭ, а для более глубокого анализа текущего состояния всей системы элементов ЛПР следует воспользоваться оценками возможности появления категории отказов  $S_j$ .

В качестве ЛПР выступают машинисты ОКГЭ и сотрудники подразделения технического обслуживания, которые отвечают за принятие решений о

работоспособности оборудования и дальнейшей его эксплуатации. Поэтому результаты оценки возможности появления категории отказа должны передаваться машинисту ОКГЭ и в подразделение технического обслуживания.

При получении высоких критических значений возможности отказа ГС ОКГЭ (от 81-100) машинист должен оперативно выполнить ряд действий, например, прекратить работу или отрегулировать давление масла в ГС. При средних значениях (от 50-80) сотрудники подразделения технического обслуживания должны проанализировать возможные категории отказа и скорректировать план ТОиР. На рисунке 2.13 представлена схема передачи информации.

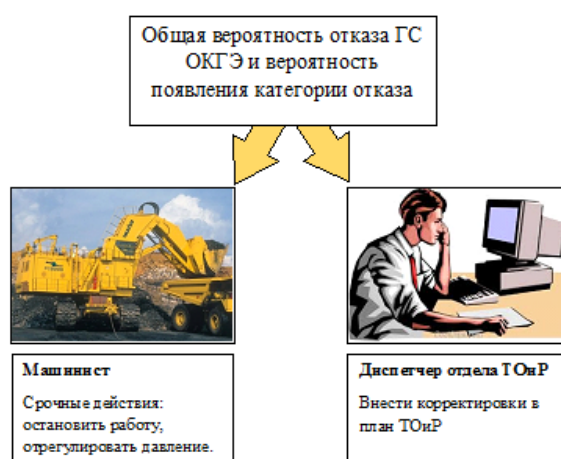


Рисунок 2.13 - Передача результатов оценки возможности появления категорий отказов ГС ОКГЭ

«По определениям инженерной психологии цвет и свет играют значительную роль в человеческой практике. Цвет может выполнять важную информационную функцию» [105, с. 46]. В целях минимизации количества информации, поступающей к машинисту, на бортовую панель экскаватора следует поместить устройство отображения информации о состоянии гидравлической системы (рисунок 2.14). Слева будет располагаться большой индикатор общей возможности отказа ГС, а слева – индикаторы возможностей появления отказа категорий ГС ОКГЭ. Индикаторы могут менять цвет согласно шкале (рисунок 2.12). Диапазон значений общей возможности отказа ГС ОКГЭ от

0 до 40 зеленым цветом, диапазон от 41 до 80 желтым и оранжевым, а диапазон от 81 до 100 - красным цветом.



Рисунок 2.14 - Устройство отображения информации

Обеспечение своевременного ремонта и технического обслуживания достаточно сложный процесс, так как система ТОиР одновременно должна учитывать плановые обслуживания и следить за текущим состоянием оборудования. Оценка возможности отказа оборудования позволит в значительной степени упростить этот процесс. ЛПР своевременно будет получать информацию по каждой части ГС ОКГЭ и на основании этих данных может вносить корректировки и изменения в план технического ремонта и обслуживания. В таблице 2.7 дан пример возможного регламента действий в зависимости от полученного значения общей возможности отказа гидравлической системы Р.

Таблица 2.7 - Действия в зависимости от общей возможности отказа Р

Диапазон	Порядок действий
0 – 50	Ничего не нужно делать
51 – 70	Проанализировать категории отказа, при необходимости скорректировать план ТО
71 – 80	Проанализировать категории отказа, скорректировать план ТО
81 – 90	Проанализировать категории отказа, добавить ремонт (или ТО) в план на ближайшие дни
91 – 100	Проанализировать категории отказа. Срочный ремонт (или ТО)

Предложенный в таблице 2.7 порядок действий может стать основой должностной инструкции, определяющей порядок выполнения действий технических обслуживаний и ремонтов, выполняемых отделом ТОиР.

**Выводы по главе 2**

1. Для обеспечения безотказной работы всего экскаватора нужно решить задачу оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы ОКГЭ.

2. Все факторы, влияющие на работоспособность гидравлической системы, следует разделить на факторы: технические ( $T_i$ ), внешние ( $K_i$ ) и текущие характеристики ОКГЭ ( $C_i$ ).

3. Проведенная систематизация и классификация отказов позволяет выделить основные категории отказов гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора –  $S_j$ .

4. Состояние гидравлической системы ОКГЭ можно представить в виде связей между факторами ( $T_i, K_i, C_i$ ), влияющими на возм  $S_j$  и общей возможности отказа отказа ( $S_j$ ) в целом.

5. Шкала общей возможности отказа гидравлической системы ОКГЭ и ее описание позволяют оперативно оценивать текущее состояние ОКГЭ и в случае необходимости принимать соответствующие меры.

### **3 Модель оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

#### **3.1 Обзор методов оценки и прогнозирования**

Оценка возможности появления категории отказа является одним из наиболее эффективных методов повышения эффективности управления системой ТОиР ГС ОКГЭ. На практике с целью планирования мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту «существует два вида прогнозов – на короткий интервал времени, до нескольких дней, и на интервал от недели до нескольких месяцев» [116]. Оценка возможности появления отказа позволяет предупреждать не только внезапные отказы, а и постепенно накапливающиеся. Прогнозируемыми параметрами для ГС ОКГЭ являются:

- «эксплуатационные параметры, измеряемые штатными приборами автоматической системы управления технологическим процессом» [116];
- «параметры технического состояния, измеряемые переносными приборами с остановкой оборудования и/или частичной разборкой горного оборудования» [116].

«Методы оценки делятся на интуитивные и формализованные. Для решения задачи оценки возможности отказа оборудования, в частности ГС ОКГЭ, наиболее часто применяют формализованные методы прогнозирования» [74]. Они базируются на количественной зависимости переменных. В таблице 3.1 представлены результаты сравнительного анализа методов оценки и прогнозирования возможности появления отказов любого механизма.

Таблица 3.1 - Анализ методов оценки и прогнозирования возможности появления отказов

Название	Сущность метода	Преимущества	Недостатки
Адаптивный метод авторегрессии с переменными коэффициентами	Основой данного метода является схема адаптивного фильтра	Довольно точный прогноз и простота построения	Большая вероятность ошибок, если ряд не имеет авторегрессионный характер
Метод экспоненциального сглаживания	Выявление и анализ тенденций динамического ряда за счет расчета экспоненциальных средних	Простота построения	Используется только для краткосрочных прогнозов
Регрессионный анализ	Исследование влияния одной или нескольких независимых переменных на зависимую переменную	Можно количественно оценить степень влияния того или иного фактора	Сложность отбора влияющих факторов
Система оценки и прогнозирования на базе нейронных сетей	Позволяет воспроизводить сложные зависимости	Возможность исследовать зависимость прогнозируемой величины от независимых переменных	Сложность при выборе параметров. Сложность при обучении

«Основной проблемой оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ является большое количество влияющих факторов, которые сложно представить с помощью аналитических формул, т.е. большинство факторов, влияющих на одноковшовых экскаваторов, являются случайными» [10]. «Поэтому оценка возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ не поддается надежному анализу и моделированию традиционными методами, что вызывает необходимость разработки новых моделей» [74].

Одним из оптимальных способов повышения эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта ГС ОКГЭ является применение нейронных сетей (НС). «Под искусственными нейронными сетями подразумевают вычислительные структуры, состоящие из большого количества однотипных элементов, каждый из которых выполняет определенные функции» [5, с. 133].

«Нейронные сети позволяют создавать адаптивные нелинейные прогнозные модели, позволяющие во многих случаях моделировать и выполнять прогнозы сложных временных зависимостей с большей эффективностью и точностью по сравнению с известными статистическими методами» [74].

Процесс оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ с помощью нейронных сетей «состоит из следующих этапов:

- выбор типа нейронной сети;
- сбор и анализ входных обучающих данных;
- обучение нейронной сети (создание базы правил);
- тестирование на контрольном множестве данных и при необходимости доработка базы;
- эксплуатация системы в качестве средства оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ с возможностью доработки» [74].

Способности нейронной сети к выполнению оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ напрямую следуют из ее способности к выделению зависимостей между входными и выходными данными.

Главные преимущества нейронных сетей:

- «нейронные сети позволяют выявить сложные зависимости, а также моделировать зависимости с большим числом переменных;
- нейронные сети учатся на примерах» [74].

Использование нейронных сетей позволит создать модель для оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ. Разработанная модель может лечь в основу системы технического обслуживания и ремонта оборудования.

### **3.2 Нечеткие нейронные сети и их применение в задаче оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ**

Использование нейронных сетей позволит получить наиболее точные результаты оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ, что приведет к возможности оптимизировать работу системы ТОиР предприятия.

Одной из важных задач при оценке возможности появления категории отказа гидравлической системы является выбор адекватной модели, позволяющей строить нелинейные модели. Из результата анализа методов оценки и прогнозирования (таблица 3.1) установлено, что для задач с большим количеством влияющих и не полностью определенных факторов целесообразно использовать метод нечетких нейронных сетей.

Нечеткие нейронные сети объединяют достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода (рисунок 3.1). «Нейронные сети – это одно из направлений исследований в области искусственного интеллекта, основанное на попытках воспроизвести нервную систему человека. А именно: способность нервной системы обучаться и исправлять ошибки, что позволит смоделировать, хотя и достаточно грубо, работу человеческого мозга» [141].

«Система нечеткого вывода – это процесс получения нечетких заключений о требуемом управлении объектом на основе нечетких условий или предпосылок, представляющих собой информацию о текущем состоянии объекта» [108].





Рисунок 3.1 - Структура нечетких нейронных сетей

«Основная идея, положенная в основу нечетких нейронных сетей, заключается в том, что используется существующая выборка данных для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе логического вывода, то есть выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики. А для нахождения параметров функций принадлежности используются алгоритмы обучения нейронных сетей. Такие системы могут использовать заранее известную информацию, обучаться, приобретать новые знания и прогнозировать временные ряды» [87]. Таким образом, для решения задачи оценки возможности появления категорий отказа ГС ОКГЭ целесообразно использовать нечеткие нейронные сети, так как основаны на нечетком выводе, который тесно связан с понятием возможности.

### 3.3 Формализация задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора

Каждую оценку возможности появления категории отказа  $S_j$  можно представить в виде следующей информационной структуры

$$S_j \langle T_i, K_i, C_i; A \rightarrow B \rangle, \quad (3.1)$$

где  $S_j$  – возможность появления категории отказа;

$T_i$  – множество значений технических факторов ГС ОКГЭ;

$K_i$  – множество значений внешних факторов;

$C_i$  – множество значений текущих характеристик ГС ОКГЭ;

$i$  – количество элементов каждого фактора;

$j$  – количество категорий отказов;

$A, B$  – нечеткие высказывания;

$A \rightarrow B$  – нечеткая импликация.

Для построения такой модели оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ необходимо определить функций принадлежности каждого фактора  $\mu(T_i)$ ,  $\mu(K_i)$ , и  $\mu(C_i)$ , а также построить нечеткую базу правил. Схема нейронной сети представлена на рисунке 3.2.

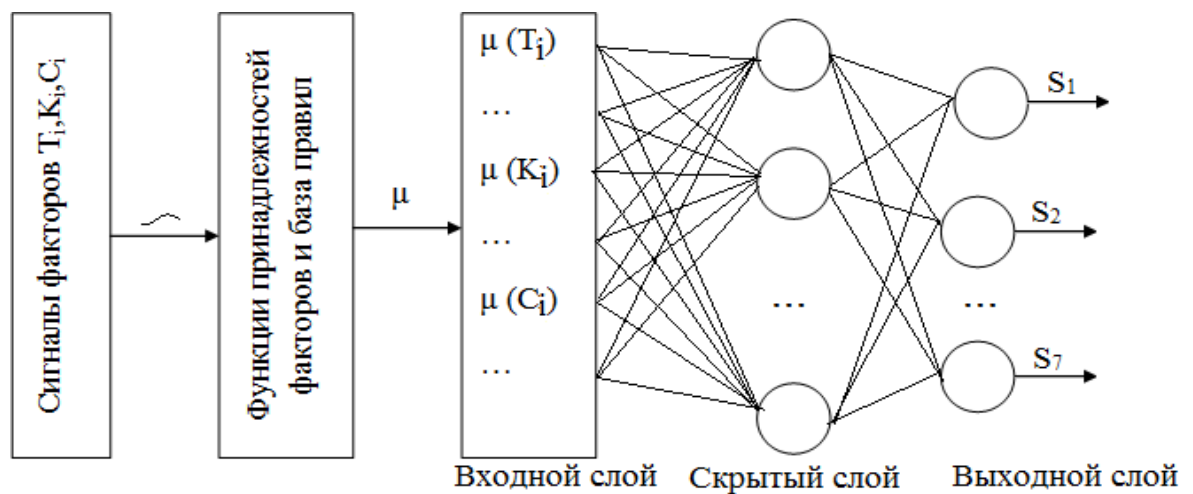


Рисунок 3.2 - Схема нейронной сети задачи оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

Нейронная сеть состоит из: входного слоя – синапсов, связывающих входы нейрона с ядром; ядра нейрона, которое осуществляет обработку этих сигналов и аксона, который связывает нейрон с нейронами следующего слоя и выходного слоя.

Входным слоем в задаче оценки возможности появления категории отказа являются факторы  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$ . Чем выше неопределенность факторов, влияющих на возможность возникновения категории отказа  $S_j$ , тем эта возможность более нечеткая. Поэтому, данные должны быть представлены в виде функций принадлежности. Данный этап называется фаззификацией. Фаззификация представляет собой процедуру нахождения значений функций принадлежности входных лингвистических переменных на основе обычных (не нечетких) исходных данных.

Согласно [65, с. 20] лингвистическая переменная  $A$  каждого фактора задается кортежем:

$$\langle A, Th(A), U, V, H \rangle, \quad (3.2)$$

где « $A$  – название переменной;

$U$  – универсальное множество;

$V$  – синтаксическое правило, позволяющее формировать названия значений лингвистической переменной  $A$ ;

$H$  – семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной из  $Th(A)$  нечеткое подмножество универсального множества  $U$ » [65, с. 20].

На рисунке 3.3 приведен пример лингвистической переменной для фактора  $T_i$ .

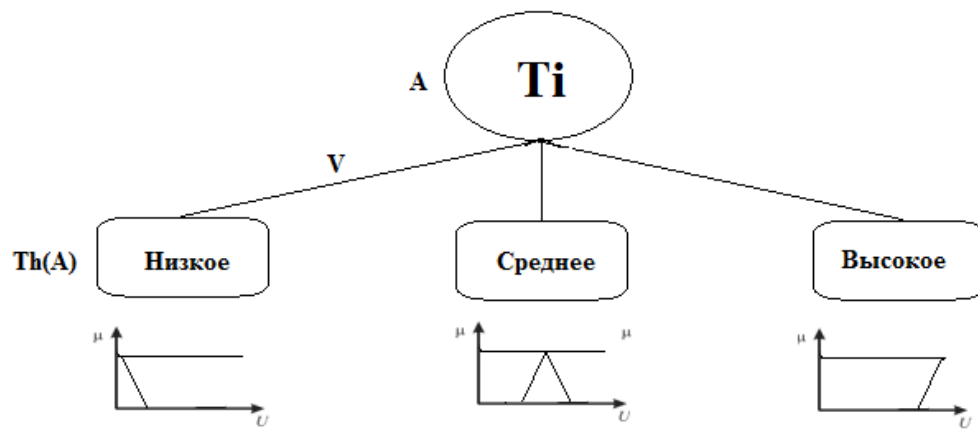


Рисунок 3.3 - Пример задания лингвистической переменной  $A$  для фактора  $T_i$

На функциях принадлежности определяются промежутки, на которых входная лингвистическая переменная ассоциируется с заданными лингвистическими оценками, например: «низкое», «среднее» и «высокое».

Таким образом, определены входы и выходы нейронной сети, дальше для решения задачи оценки возможности появления категории отказа  $S_j$  ГС ОКГЭ необходимо определить функции принадлежности факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  и категорий отказов  $S_j$ , а также построить базу правил.

### **3.4 Построение функций принадлежности факторов для задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

Функции принадлежности фактора в нечеткой логике представляют принадлежности фактора к нечеткому множеству на интервале  $[0, 1]$ . В практике существуют две группы методов построения функции принадлежности: прямые методы и косвенные методы. На рисунке 3.4 представлена классификация методов построения функции принадлежности.

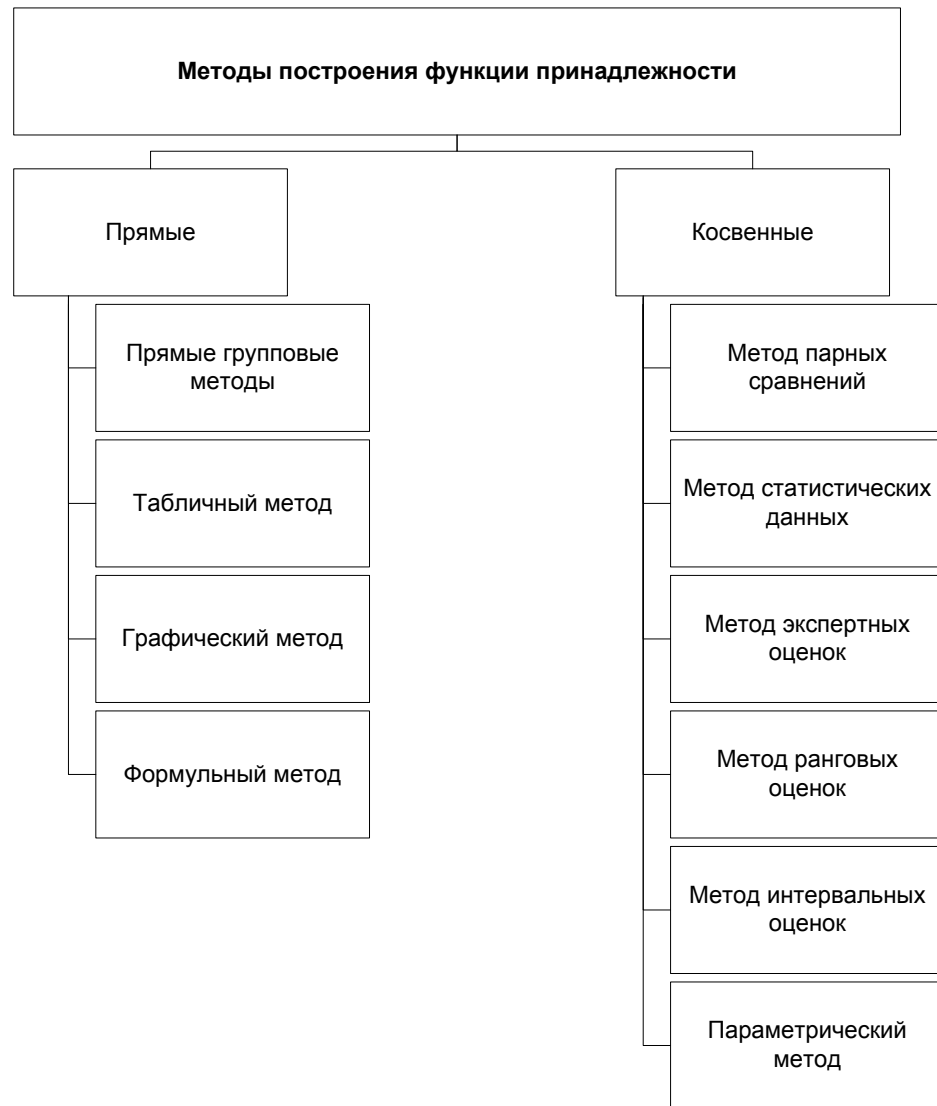


Рисунок 3.4 - Классификация методов построения функции принадлежности

Прямые методы характеризуются тем, что непосредственно эксперт определяет степень принадлежности фактора к нечеткому множеству. Обычно для представления информации используются таблицы, графики и формулы. Основным недостатком данной группы методов является большая доля субъективности.

В косвенных методах экспертная информация является основой для дальнейшей обработки. К косвенным методам относятся: метод парных сравнений, статистические методы, метод экспертных оценок, метод ранговых оценок, метод интервальных оценок и параметрический метод.

Прямые групповые методы – основаны на том, что каждый эксперт группы отвечает, принадлежит ли или нет объект  $U_i$  ( $i=\overline{1,n}$ ) к нечеткому множеству  $I_j$  ( $j=\overline{1,m}$ ). Пример бланка анкетирования приведен в приложении В. Степень принадлежности объекта, в нашем случае фактора, к нечеткому множеству определяется по формуле

$$\mu_{I_j}(U_i) = \frac{\sum_{d=1}^D b_{j,i}^d}{D}, \quad (3.3)$$

где  $D$  – количество экспертов;

$b_{j,i}^d$  – мнение  $d$ -го эксперта о степени принадлежности объекта  $U_i$  к нечеткому множеству  $I_j$ ;

$j$  – количество нечетких множеств;

$i$  – количество объектов.

Метод с использованием статистических данных базируется на результатах экспериментальных наблюдения. События регистрируются в матрице оценок показаний. Матрица состоит из  $i$  строк и  $j$  столбцов. Далее считается количество экспериментов в каждом интервале. Если количество не одинаково, необходима дополнительная обработка данных с помощью матрицы подсказок. Элементы матрицы подсказок  $k_j$  читаются по формуле

$$k_j = \sum_{i=1}^j b_{ij}, \quad (3.4)$$

где  $i$  – количество строк;

$j$  – количество столбцов;

$b_{ij}$  – элемент матрицы оценки.

Далее элементы матрицы преобразуются по формуле

$$c_{ij} = (b_{ij} \cdot k_{\max}) \mid k_j. \quad (3.5)$$

Для построения функций принадлежности находятся максимальные элементы по строкам матрицы оценки показаний по формулам

$$c_{ij} = \max_i c_{ij}, \quad (3.6)$$

$$\mu_{I_j} = \frac{c_{ij}}{c_{i \max}}, \quad (3.7)$$

где  $i$  – количество строк;

$j$  – количество столбцов;

$c_{ij}$  – элемент матрицы оценки показаний;

$\mu_{I_j}$  – значения функций принадлежности.

Таким образом, определены основные методы построения функции принадлежности факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$ , и категорий отказов  $S_j$ . Далее, для решения задачи оценки возможности появления категории отказа, необходимо определить метод построения базы правил и механизм нечеткого вывода в задаче оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ.

### **3.5 Механизм нечеткого вывода в задаче оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

Решение задач оценки обычно базируется на использовании механизмов нечеткого вывода по алгоритмам Мамдани и Сугэно. Для задач, где более важным является не только объяснение, но и обоснование принятого решения, будут иметь преимущество нечеткие модели типа Мамдани, а для задач, где более важным является точность идентификации нелинейных зависимостей, целесообразным будет использование нечетких моделей типа Сугэно [77, с. 242].

Алгоритм Мамдани

При реализации алгоритма Мамдани база знаний представляется в виде правил

П1: если  $x$  есть  $A_1$  и  $y$  есть  $B_1$ , то  $z$  есть  $D_1$ ,

...

П $n$ : если  $x$  есть  $A_n$  и  $y$  есть  $B_n$ , то  $z$  есть  $D_n$ .

(3.8)

где  $x$  и  $y$  – имена входных переменных;

$z$  – имя переменной вывода;

$A_n$ ,  $B_n$ ,  $D_n$  – заданные функции принадлежности.

Реализация алгоритма Мамдани состоит из пяти этапов.

На первом этапе происходит фаззификация входных переменных (введение нечеткости). Фаззификация – «установка соответствия между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной» [107]. На данном этапе все значения факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$ , полученные при помощи датчиков, получают соответствующие лингвистические термы.

Следующий этап – агрегирование условий. Данная процедура служит для «определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. В алгоритме Мамдани агрегирование осуществляется при помощи классической нечеткой логической операции «И» двух элементарных высказываний  $A, B$ » [107]

$$T(A \cap B) = \min\{T(A); T(B)\}. \quad (3.9)$$

Третий этап – «активизация подзаключений правил нечеткой продукции. Она осуществляется методом нечеткой композиции – min-активизации

$$\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}, \quad (3.10)$$

где  $\mu(x)$  и  $c$  – соответственно функции принадлежности термов лингвистических переменных и степени истинности нечетких высказываний, образующих соответствующие следствия (консеквенты) ядер нечетких продукционных правил» [107].

Четвертый этап – «аккумуляция. Это процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Проводится при помощи классического для нечеткой логики max-объединения функций принадлежности» [107]

$$\forall x \in X \mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x); \mu_B(x)\}. \quad (3.11)$$

Последний этап – «дефаззификация проводится методом центра тяжести или центра площади» [107].



### Алгоритм Сугэно

При реализации алгоритма Сугэно база знаний представляется в виде правил:

$$\begin{aligned} \Pi_1: & \text{если } x \text{ есть } A_1 \text{ и } y \text{ есть } B_1, \text{ то } z_1 = a_1x + b_1y, \\ & \dots \\ \Pi_n: & \text{если } x \text{ есть } A_n \text{ и } y \text{ есть } B_n, \text{ то } z_n = a_nx + b_ny. \end{aligned} \quad (3.12)$$

где  $x$  и  $y$  – имена входных переменных;

$z$  – имя переменной вывода;

$A_n, B_n$  – заданные функции принадлежности;

$a_n, b_n$  – коэффициенты.

При реализации алгоритма Сугэно этапы фаззификации и агрегирования подусловий осуществляются аналогично алгоритму Мамдани.

Активизация подзаключений правил нечеткой продукции проводится в два этапа. «На первом этапе, степени истинности заключений нечетких продукционных правил находятся аналогично алгоритму Мамдани, как алгебраическое произведение весового коэффициента и степени истинности антецедента данного нечеткого продукционного правила» [107]. На втором этапе, для каждого из продукционных правил находится четкое значение выходной переменной  $z_n = a_nx + b_ny$ .

«Аккумуляция заключений правил нечеткой продукции не проводится, поскольку на этапе активизации уже получены дискретные множества четких значений для каждой из выходных лингвистических переменных» [107].

Дефаззификация предполагает использование модифицированного варианта метода центра тяжести.

Таким образом, рассмотрены основные механизмы нечеткого вывода. В задаче оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ целесообразно будет использовать алгоритм Сугэно, так как выходные переменные можно представить как константы.

### 3.6 Построение нечеткой базы правил для оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора

«База правил систем нечеткого вывода предназначена для формального представления эмпирических знаний экспертов в той или иной предметной области в форме нечетких продукционных правил» [108]. База правил для оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ содержит совокупность правил, полученных путем опроса экспертов и необходимых для вывода возможности появления отказа ГС ОКГЭ  $S_j$ .

Представить знания полученных от экспертов можно с помощью следующих моделей:

- логические;
- продукционные;
- фреймовые;
- продукционно-фреймовые.

Логические модели. В основе этих моделей лежит формальная система, задаваемая четверкой вида

$$L = \langle F, P, A, B \rangle, \quad (3.13)$$

где  $F$  – множество базовых элементов различной природы;

$V$  – множество синтаксических правил;

$A$  – множество аксиом;

$B$  – множество правил вывода.

Сетевые модели. В основе моделей этого типа лежит конструкция, названная ранее семантической сетью. Сетевые модели формально можно задать в виде

$$H = \langle I, S_1, S_2, \dots, S_n, Y \rangle, \quad (3.14)$$

где  $I$  – множество информационных единиц;

$Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  – множество типов связей между информационными единицами;

$Y$  – отображение, задающее конкретные отношения из имеющихся типов  $S_i$  между элементами  $I$ .

Продукционные модели. Каждое правило базы правил продукционной модели представления знаний можно представить в виде

$$e: \langle O; L; A \rightarrow B; Q \rangle, \quad (3.15)$$

где  $O$  – описание класса ситуаций;

$L$  – условие, при котором продукция активизируется;

$A \rightarrow B$  – ядро продукции;

$Q$  – постусловие продукционного правила.

Фреймовые модели. «Основная идея фреймового подхода к представлению знаний заключается в том, что все понятия или ситуации представляются во фрейме. Фреймом называется структура для описания понятия или ситуации, состоящая из характеристик этой ситуации и их значений» [6, с. 10]. Информация, относящаяся к фрейму, содержится в составляющих его слотах.

Продукционно-фреймовые модели. Гибридная модель представления знаний с использованием фреймов и правил продукционного выбора.

В настоящее время при разработке экспертных систем все чаще используются гибридные модели представления знаний. Как отмечается в [49, с. 107] наибольшей эффективностью пользуются продукционно-фреймовые модели. Таким образом, для решения задачи оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ целесообразно использовать продукционно-фреймовую модель представления знаний.

Фрейм состоит из имени и отдельных единиц, называемых слотами. Помимо конкретного значения в слоте могут храниться процедуры и правила. Среди них выделяют «процедуры-демоны», они запускаются автоматически при выполнении некоторого условия. В работе [45] предложено использование возможностей фреймовой модели с применением метода нечеткой логики в процедурах-демонах фрейма.

Структура фрейма в задаче оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ представлена на рисунке 3.5.

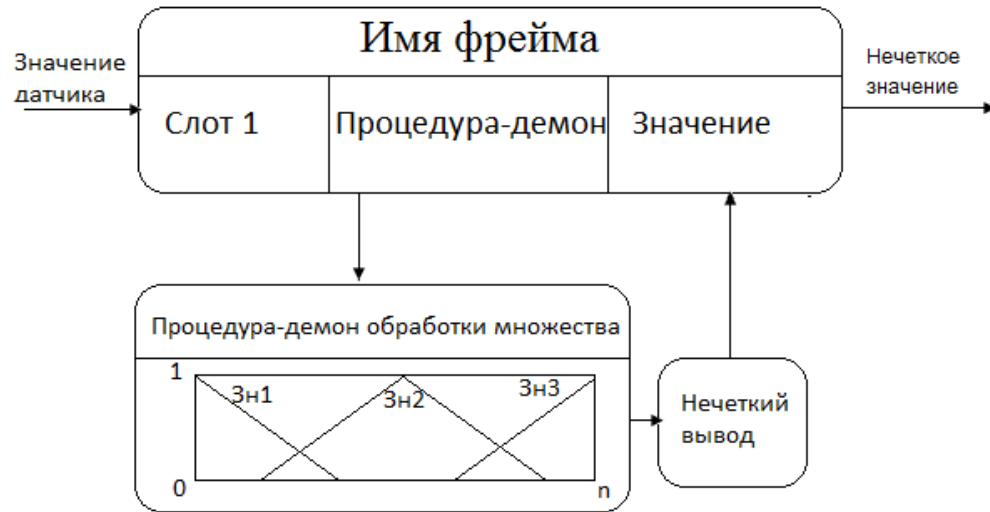


Рисунок 3.5 - Структура фрейма в задаче оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ

Слот фрейма содержит процедуру-демон, которая при получении входного действия, обрабатывает его, и результат обработки записывается в слот.

Пример заполнения фрейма элемента «Температура воды в двигателе –  $T_1$ » фактора  $T_i$  рассмотрен на рисунке 3.6.

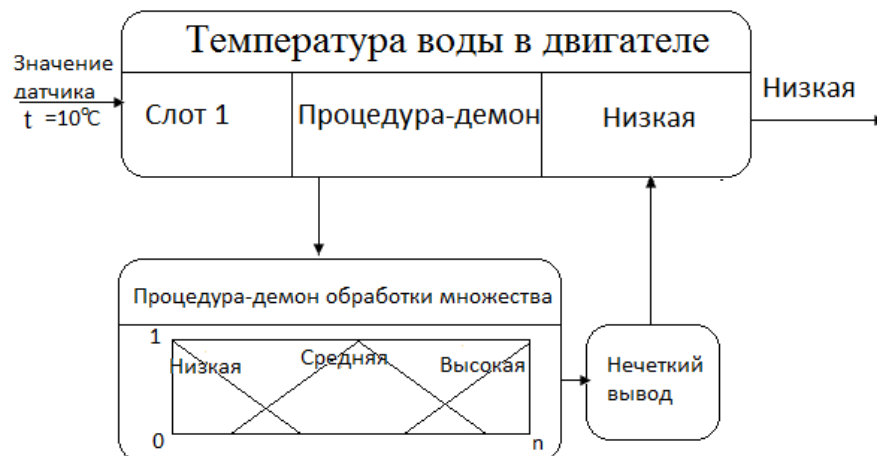


Рисунок 3.6 - Структура фрейма «Температура воды в двигателе –  $T_1$ »

Значение элемента «Температура воды в двигателе –  $T_1$ » фактора  $T_i$  разделены на три класса «низкая», «средняя» и «высокая». «Значение

лингвистической переменной фрейма определяется входным воздействием с использованием функций принадлежности» [45]. Таким образом, при поступлении очередного нового входного воздействия с датчика, процедура-демон будет определять лингвистическую переменную и записывать ее в слот.

Каждое правило базы правил записано в виде предложенного типа: «Если ..., то ...». Такой способ записи позволяет понять свойства объекта и протекающих в нем процессов. Для построения правил необходимо использовать математический метод нечетких множеств. Так, каждой переменной необходимо представить поставить в соответствие лингвистические переменные с характерными термами, например «низкая», «средняя», «высокая». Это означает, что можно сформулировать базу правил о влиянии факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на значение зависимых категорий отказов  $S_j$  в виде совокупности логических высказываний типа

$$\begin{aligned}
 &\text{ЕСЛИ } (F_1 = a_{1j1}) \text{ И } (F_2 = a_{2j1}) \text{ И } \dots \text{ И } (F_n = a_{nj1}). \\
 &\text{ИЛИ } (F_1 = a_{1j2}) \text{ И } (F_2 = a_{2j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (F_n = a_{nj2}) \\
 &\dots \\
 &\text{ИЛИ } (F_1 = a_{1jk}) \text{ И } (F_2 = a_{2jk}) \text{ И } \dots \text{ И } (F_n = a_{njk}) \\
 &\text{ТО } S_j = d_j, j \in [1, m],
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

где  $F$  – обозначение множества факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$ ;

$a_{ijp}$  – терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в строчке с номером  $j_p$  ( $p \in [1, k_j]$ );

$k_j$  – количество строчек-конъюнкций, у которых выход оценивается термом  $d_j$ ;

$m$  – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходного параметра  $S_j$ .

При проектировании нечеткой базы правил могут быть использованы данные о моделируемой системе, полученные от экспертов или полученные в результате измерений. На практике часто используется смешанный тип проектирования – когда

начальная база правил строится на основании мнений экспертов, а ее уточнение и корректировка проводится с использованием экспериментальных данных.

Недостатком использования метода проектирования нечеткой базы правил на основании заключений экспертов является то что, при определенном количестве факторов и их возможных значений растет количество правил. Обеспечить полноту, непротиворечивость и связность базы правил в таких условиях очень сложно. Поэтому в данной работе предлагается создавать на каждую категорию отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  отдельную базу правил  $БП(S_j)$ . Включать в базу правил  $БП(S_j)$  следует только факторы  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$ , которые оказывают значительное влияние на данную категорию отказа ГС ОКГЭ  $S_j$ .

Алгоритм проектирования нечеткой базы правил для решения задачи оценки возможности появления отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  представлена на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 - Алгоритм проектирования нечеткой базы правил для решения задачи оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

После отбора значимых элементов факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  для  $S_j$  необходимо автоматически сгенерировать список всех возможных правил путем полного перебора различных вариантов. Полученный список может содержать большое количество правил, но после дальнейшего анализа, эксперт может отвергнуть

большинство. Начальная база правил, полученная после экспертного анализа, может быть скорректирована при поступлении в нечеткую систему экспериментальных данных об объекте. В таблице 3.2 представлен фрагмент базы правил для оценивания возможности появления категории отказа  $S_j$  ГС ОКГЭ.

Таблица 3.2 - Фрагмент базы правил для получения возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$

№ условия	Правило
1	Если $T_1$ – [значение 1], ... $T_n$ – [ значение 1],... $K_1$ – [значение 1]... $K_m$ – [значение 1], $C_1$ – [значение1], ... $C_d$ – [ значение 1],тогда возможность появления отказа $S_j$ – [значение 1]
...	...
n	Если $T_1$ – [значение N], ... $T_n$ – [ значение N],... $K_1$ – [значение M]... $K_m$ – [значение M], $C_1$ – [значение D], ... $C_d$ – [ значение D],тогда возможность появления отказа $S_j$ – [значение J]

где  $n$  – количество элементов фактора  $T$ , оказывающих значительное влияние на  $S_j$ ;

$m$  – количество элементов фактора  $K$ , оказывающих значительное влияние на  $S_j$ ;

$d$  – количество элементов фактора  $C$ , оказывающих значительное влияние на  $S_j$ ;

$N$  – количество значений фактора  $T_n$ ;

$M$  – количество значений фактора  $K_m$ ;

$D$  – количество значений фактора  $C_d$ .

Таким образом построена начальная база правил для задачи оценки возможности появления категории отказа  $S_j$  на основе экспертного анализа. Следующим шагом является выбор механизма нечеткого вывода возможности появления категории отказа  $S_j$ .

### **3.7 Нечеткая нейронная сеть для задачи «Оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора»**

В качестве нечеткой нейронной сети для задачи «Оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора» была выбрана адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода - ANFIS. Данная сеть была выбрана, так как она реализует систему нечеткого вывода Сугено.

Данная сеть состоит из пяти слоев [129]:

- первый слой - термы входных переменных;
- второй слой - антецеденты (посылки) нечетких правил;
- третий слой - нормализация степеней выполнения правил;
- четвертый слой - заключения правил;
- пятый слой – агрегирование результата.

На рисунке 3.8 изображена ANFIS-сеть для категории отказа «Отказ насоса» – S1 с десятью входными переменными: «Давление в главном насосе» – Т4, «Частота вращения двигателя» – Т6, «Уровень масла» – Т7, «Уровень загрязненности масла» – Т10, «Температура воздуха» – К1, «Запыленность воздуха» – К2, «Выработанный ресурс насоса ГС ОКГЭ» – С2, «Выработанный ресурс приводов ГС ОКГЭ» – С3, «Выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКГЭ» – С4, «Выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ» – С5 и «Выработанный ресурс линий трубопровода ГС ОКГЭ» – С6. Для лингвистической оценки входных переменных используется по 3 терма.



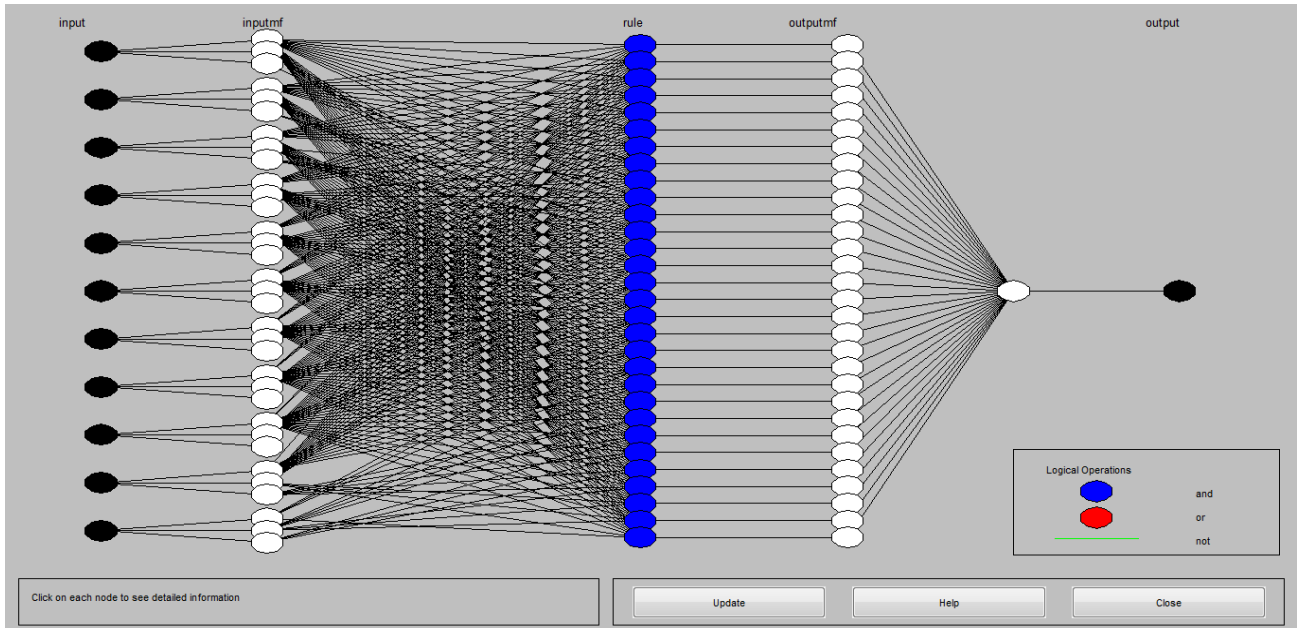


Рисунок 3.8 - ANFIS-сеть для категории отказа «Отказ насоса» - S1

Результатами каждого слоя являются [129]:

Слой 1 – степень принадлежности значения входной переменной соответствующему нечеткому терму

$$\mu_r(x_j) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_j - c}{a} \right|^{2b}}, \quad (3.17)$$

Слой 2 – степень выполнения правила

$$\tau_r, r = \overline{1, m}, \quad (3.18)$$

Слой 3 – относительная степень выполнения нечеткого правила

$$\tau_r^* = \frac{\tau_r}{\sum_{j=\overline{1, m}} \tau_j}, \quad (3.19)$$

Слой 4 – вклад одного нечеткого правила в выход сети.

$$y_r = \tau_r^* (b_{0,r} + b_{1,r} x_1 + \dots + b_{n,r} x_n), \quad (3.20)$$

Слой 5 – суммирует вклады всех правил.

$$y = y_1 + \dots y_r \dots + y_m, \quad (3.21)$$

где  $y$  – выходная переменная;

$x$  – входная переменная (входы сети);

$R_r$  – нечеткое правило с порядковым номером  $r$ ;

$m$  – количество правил;

$n$  – количество входов;

$a_{i,r}$  – нечеткий терм с функцией принадлежности  $\mu_r(x_j)$ ;

$b_{n,r}$  – действительные числа в заключении  $r$ -го правила.

### **3.9 Построение модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

Для оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ была разработана модель, которая обеспечивает оперативное получение общего показателя (общей возможности отказа) по ГС ОКГЭ и информацию по каждой части ГС ОКГЭ. Блок-схема алгоритма построения модели оценки возможности появления категории отказа представлена на рисунке 3.9, а процедур «Процедура определения функций принадлежности факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  ГС ОКГЭ  $S_j$ », «Построение базы правил» и «Расчет возможности появления категории отказа  $S_j$ » представлены на рисунках 3.10 – 3.12.



Рисунок 3.9 - Блок-схема алгоритма реализации модели оценки возможности появления категории отказа

Описание блок-схемы алгоритма реализации модели оценки возможности появления категории отказа:

Блок 1: Производится ввод технических факторов, внешних факторов и текущих характеристик ОКГЭ.

Блок 2: Процедура определения функций принадлежности факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  и категории отказов  $S_j$  ГС ОКГЭ.

Блок 3: Процедура построения базы правил.

Блок 4: Производится расчет оценки возможности появления категории отказа  $S_j$  ГС ОКГЭ.

Блок 5: Если результаты оценки возможности появления категории отказа  $S_j$  ГС ОКГЭ в допустимом интервале (не отрицательные или больше 100), переход к блоку 6. Если нет, переход назад к блоку 4.

Блок 6: Расчет общей возможности отказа ГС ОКГЭ.

Блок 7: Получение шкалы возможности отказа ГС ОКГЭ.

Блок 8: Выводные данные: Общая возможность отказа ГС ОКГЭ.

Блок 9: Оценки модели оценки возможности появления категории отказа на адекватность.

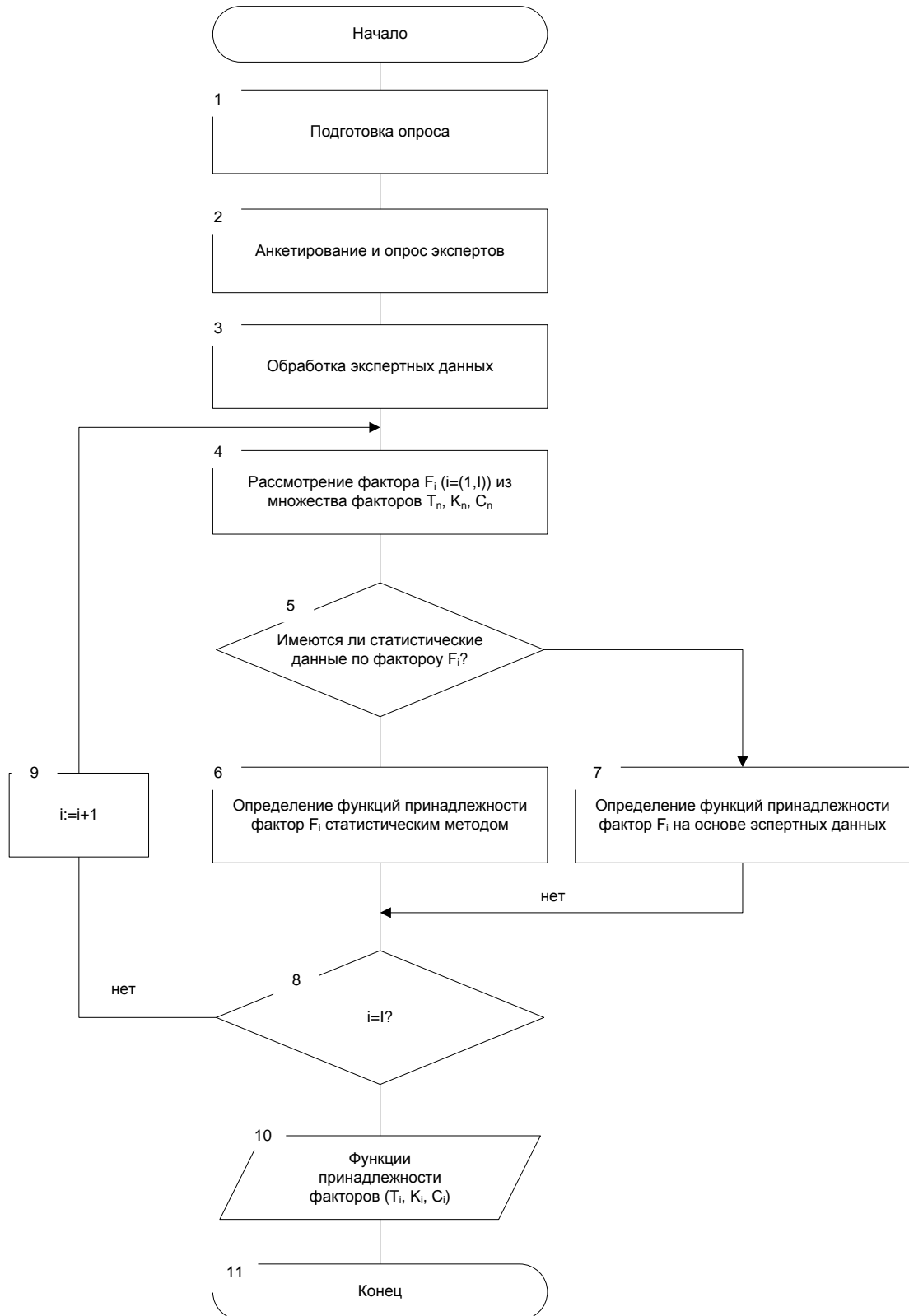


Рисунок 3.10 - Блок-схема алгоритма процедуры «Определение функций принадлежности факторов  $T_i, K_i, C_i$  ГС ОКГЭ»

Описание блок-схемы процедуры построения базы данных и определение функций принадлежности:

Блок 1: Подготовка опроса.

Блок 2: Анкетирование и опрос экспертов

Блок 3: Обработка экспертных данных.

Блок 4: Рассмотрение фактора  $F_i (T_i, K_i, C_i)$ .

Блок 5: Если статистические данные по фактору  $F_i$  – переход к блоку 6. Если нет, переход назад к блоку 7.

Блок 6: Определение функций принадлежности  $F_i$  статистическим методом.

Блок 7: Определение функций принадлежности  $F_i$  прямым групповым методом.

Блок 8: Проверка окончания множества факторов. Если  $F_i$  последний фактор в множестве факторов  $(T_i, K_i, C_i)$  переход к блоку 10. Если нет, переход к блоку 4.

Блок 9: Переход на следующий фактор  $F_i$ .

Блок 10: Получены функции принадлежности факторов  $(T_i, K_i, C_i)$ .



Рисунок 3.11 - Блок-схема алгоритма процедуры «Построение базы правил»

Описание блок-схемы процедуры построения базы данных:

Блок 1: Подготовка опроса.

Блок 2: Анкетирование и опрос экспертов

Блок 3: Оценка экспертных данных.

Блок 4: Получены коэффициенты влияния факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на  $S_j$ .

Блок 5: Рассмотрение категории отказа  $S_j$ .

Блок 6: Отбор значимых факторов для категории отказа  $S_j$  (степень влияния фактора должна быть больше 0.15)

Блок 7: Генерация базы правил для категории отказа  $S_j$ .

Блок 8: Обработка экспертом сгенерированных правил базы правил для категории отказа  $S_j$ .

Блок 9: Получена начальная база правил для категории отказа  $S_j$ .

Блок 10: После поступления статистических данных происходит корректировка начальной базы правил для категории отказа  $S_j$ .

Блок 11: Получена окончательная база правил для категории отказа  $S_j$ .

Блок 12: Проверка окончания множества факторов. Если  $S_j$  последний фактор переход на конец процедуры. Если нет, переход к блоку 13.

Блок 13: Переход к следующей категории отказа  $S_j$ .





Рисунок 3.12 - Блок-схема алгоритма процедуры «Расчет возможности появления категории отказа  $S_j$ »

Описание блок-схемы процедуры построения базы данных и определение функций принадлежности:

Блок 1: Фаззификация входных переменных. Установка соответствия между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей термина лингвистической переменной

Блок 2: Агрегирование подусловий. Процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода.

Блок 3: Активизация подзаключений. Процедура нахождения степени истинности каждого из элементарных логических высказываний, составляющих консеквенты ядер всех нечетких правил

Блок 4: Аккумуляирование заключений. Процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных

Блок 5: Дефаззификация выходных данных. Процесс перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее четкому значению.

Блок 6: Получена оценка возможности появления категории отказа  $S_j$ .

### **3.8 Программное обеспечение для решения задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора**

В последнее время получили широкое распространение программные средства или информационные системы, предназначенные для автоматизации работ обработки данных. Они позволяют собирать, хранить и обрабатывать разнородные массивы данных с использованием единой информационной базы. Такие системы ориентируются на потребности руководства при выполнении функций управления на основе внутренних и внешних данных и баз правил.

Наиболее широкое применение в настоящее время получили пакеты: STATISTICA, FuzzyTECH, MATLAB R2014a и Deductor.

STATISTICA – «это универсальная интегрированная система, предназначенная для статистического анализа, визуализации данных и разработки пользовательских приложений. Программа содержит широкий набор процедур анализа для применения в научных исследованиях, технике, бизнесе. Помимо общих статистических и графических средств, в системе имеются специализированные модули, например, для проведения социологических или биомедицинских исследований, решения технических и промышленных задач: карты контроля качества, анализ процессов и планирование эксперимента. Пользователями системы являются крупнейшие университеты, исследовательские центры, компании, банки всего мира, государственные учреждения» [82].

MATLAB R2014a – искусственные нейронные сети в MATLAB представляют новое направление в практике создания технических систем. Пакет обеспечивает всестороннюю поддержку типовых нейросетевых парадигм и имеет открытую модульную архитектуру. Пакет содержит функции командной строки и графический интерфейс пользователя для быстрого пошагового создания нейросетей.

Deductor – «является аналитической платформой, т.е. основой для создания законченных прикладных решений. Реализованные в Deductor технологии

позволяют на базе единой архитектуры пройти все этапы построения аналитической системы: от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов» [133].

«Deductor предоставляет аналитикам инструментальные средства, необходимые для решения самых разнообразных аналитических задач: корпоративная отчетность, прогнозирование, сегментация, поиск закономерностей – эти и другие задачи, где применяются такие методики анализа, как OLAP, Knowledge Discovery in Databases и Data Mining» [133].

Таким образом в таблице 3.3 представлены результаты сравнительного анализа рассмотренных статистических пакетов.

Таблица 3.3 - Сравнительный анализ статистических данных

Название программы	Свойства	
	Плюсы	Минусы
STATISTICA	Имеются русифицированные версии пакета. Выпущено достаточно литературы по работе в пакете. Подробное руководство пользователя. Хорошо реализованы карты контроля качества и методы планирования экспериментов. Имеет очень мощный модуль для нейросетевого моделирования.	Очень много кнопок и настроек усложняет освоение пакета. Высокая цена
MATLAB	Простой интерфейс. По сравнению с конкурентами низкая цена. Все функции пакета FUZZY LOGIC TOOLBOX написаны на открытом языке MATLAB, что значит, что при необходимости можно изменять исходный код, а также создавать свои собственные функции и процедуры.	Не русифицирован.
Deductor	Реализован основной набор популярных статистических методов анализа.	Неудобный интерфейс

Анализ статистических пакетов показал, что для проведения оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ наиболее экономичным и полным является MATLAB.

**Выводы по главе 3**

1. Система проведения оценки на базе нечетких нейронных сетей позволяет воспроизводить сложные зависимости, такие как зависимости факторов и возможности появления категории отказа гидравлической системы.
2. Для решения задачи оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  необходимо определить функции принадлежности факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$ , и создать нечеткую базу правил.
3. В качестве механизма вывода целесообразно использовать алгоритм Мамдани, так как выходные переменные – категории отказов  $S_j$  заданы нечеткими множествами.
4. Разработана модель оценки возможности появления возможности категории отказа ГС ОКГЭ и общая возможность отказа ГС ОКГЭ и представлен в виде блок-схемы.

## 4. Реализация разработанной модели и ее экспериментальное исследование

### 4.1 Построение функций принадлежности факторов в задаче оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора

Экспериментальные исследования для определения степени влияния факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на возможность появления категории отказа  $S_j$  были проведены методом экспертных оценок. Анкетирование проведено заочное, где экспертам было предложено оценить степень влияния факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на категории отказов  $S_j$  и записать результаты оценок в специально разработанную форму (Приложение Б).

Полученные коэффициенты влияния факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на категории отказов  $S_j$  представлены на рисунке 4.1.

1. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ насоса» - S1									
№	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор
T1	Температура воды в двигателе	0,020	K1	Температура воздуха	0,195	C1	Выработанный ресурс ОКГЭ	0,097	
2. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ гидравлического цилиндра» - S2									
T3	Дав. №	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка
T4	Дав. T1	Температура воды в двигателе	0,051	K1	Температура воздуха	0,262	C1	Выработанный ресурс ОКГЭ	0,167
T5	Дав. T2	Тем. 3. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ гидравлического мотора» - S3							
T6	Част. T3	Дав. №	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор
T7	Уро. T4	Дав. T1	Температура воды в двигателе	0,168	K1	Температура воздуха	0,380	C1	Выработанный ресурс ОКГЭ
T8	Шум. T5	Дав. T2	Тем. 4. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ клапанов регулирования давления» - S4						
T9	Рас. T6	Част. T3	Дав. №	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка
T10	Уро. T7	Урс. T4	Дав. T1	Температура воды в двигателе	0,128	K1	Температура воздуха	0,125	C1
T8	Шум. T5	Дав. T2	Тем. 5. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ клапанов управления направлением» - S5						
T9	Рас. T6	Част. T3	Дав. №	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка
T10	Уро. T7	Урс. T4	Дав. T1	Температура воды в двигателе	0,018	K1	Температура воздуха	0,157	C1
T8	Шум. T5	Дав. T2	Тем. 6. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ клапанов регулирования скорости потока масла» - S6						
T9	Рас. T6	Част. T3	Дав. №	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка
T10	Уро. T7	Урс. T4	Дав. T1	Температура воды в двигателе	0,038	K1	Температура воздуха	0,22	C1
T8	Шум. T5	Дав. T2	Тем. 7. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ линии трубопровода» - S7						
T9	Рас. T6	Част. T3	Дав. №	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка
T10	Уро. T7	Урс. T4	Дав. T1	Температура воды в двигателе	0,154	K1	Температура воздуха	0,232	C1
T8	Шум. T5	Дав. T2	Температура масла	0,133	K2	Запыленность воздуха	0,157	C2	Выработанный ресурс насоса ГС ОКГЭ
T9	Рас. T6	Част. T3	Давление масла в двигателе	0,095	K3	Содержание влаги в воздухе	0,319	C3	Выработанный ресурс приводов ГС ОКГЭ
T10	Уро. T7	Урс. T4	Давление в главном насосе	0,160	K4	Крепость	0,292	C4	Выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКГЭ
T8	Шум. T5	Дав. T2	Давление в контрольном контуре	0,153				C5	Выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ
T9	Рас. T6	Част. T3	Частота вращения двигателя	0,021				C6	Выработанный ресурс линий трубопроводов ГС ОКГЭ
T10	Уро. T7	Урс. T4	Уровень масла	0,046					
T8	Шум. T5	Дав. T2	Шум в насосе	0,034					
T9	Рас. T6	Част. T3	Расход масла	0,052					
T10	Уро. T7	Урс. T4	Уровень загрязненности масла	0,152					

Рисунок 4.1 - Коэффициенты влияния факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на категории отказов  $S_j$

Таким образом, на основе результатов экспертного опроса получены степени влияния каждого фактора на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  и

был проведен отбор значимых факторов по каждой категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  в целях дальнейшего формирования базы правил.

#### Построение функции принадлежности факторов

С целью решения задачи оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  для каждого из фактора  $T_i$ ,  $K_i$  и  $C_i$  построены графики принадлежности.

По некоторым данным [89] до 45% отказов гидравлических систем возникает из-за состояния масла, а именно из-за его чистоты. Уровень загрязненности масла является одним из факторов, оказывающим значительное влияние на возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ. Ниже представлен порядок построения графиков функции принадлежности для фактора «Уровень загрязненности масла –  $T_{10}$ ».

Опираясь на статистику отказов гидравлической системы ОКГЭ РС 3000 [89, 137] построен график зависимости возможности отказа ГС ОКГЭ и уровня загрязненности масла. График представлен на рисунке 4.2.

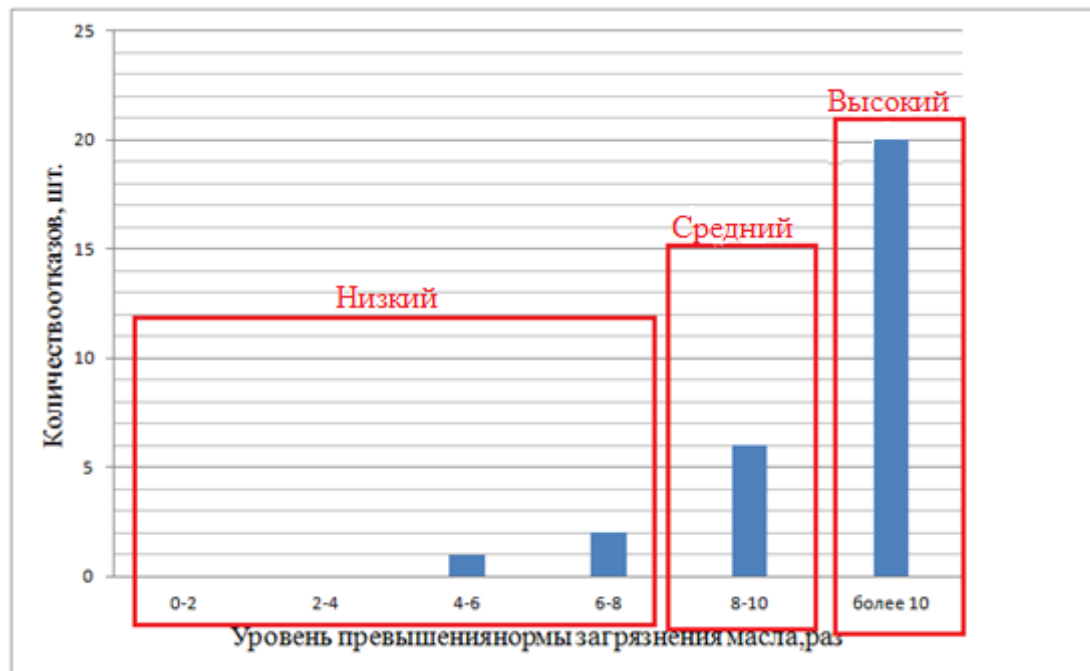


Рисунок 4.2 - Зависимости возможности отказа ГС ОКГЭ и уровня загрязненности масла

Из графика видно, что уровни загрязненности масла по степени влияния на возможность отказа ГС ОКГЭ можно разделить на три категории «низкий», «средний» и «высокий».

Для построения функций принадлежности следует использовать метод построения с использованием статистических данных. На основании данных [89, 137] построена матрица оценки показаний. Матрица оценки показаний представлена в таблице 4.1. В ней показано количество отказов в зависимости от уровня загрязненности масла.

Таблица 4.1 - Матрица оценки значений элемента «Уровень загрязненности масла – T10» фактора T<sub>i</sub>

Уровень загрязненности масла	Диапазон					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Более 10
Низкий	0	0	1	2	0	0
Средний	0	0	0	0	6	0
Высокий	0	0	0	0	0	20

«Данный метод требует выполнения условия, чтобы в каждый интервал попадало одинаковое число экспериментов. Если это условие не выполняется, требуется дополнительная обработка данных с помощью матрицы подсказок» [53]. Элементы матрицы подсказок читаются по формуле:

$$k_j = \sum_{i=1}^3 b_{ij}, \quad (4.1)$$

где  $i$  – количество строк;

$j$  – количество столбцов;

$b_{ij}$  – элемент матрицы оценки показаний фактора «Уровень загрязненности масла – T<sub>10</sub>».

Таким образом получена матрица подсказок:

$$k_j = \|0, 0, 1, 2, 6, 20\|, \quad (4.2)$$

Дальше элементы матрицы преобразуются по формуле



$$c_{ij} = (b_{ij} \cdot k_{\max}) \mid k_j. \quad (4.3)$$

В результате преобразования получилась матрица коэффициентов  $c_{ij}$ . Матрица представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Матрица коэффициентов  $c_{ij}$

Уровень загрязненности масла	Диапазон					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Более 10
Низкий	0	0	20	20	0	0
Средний	0	0	0	0	20	0
Высокий	0	0	0	0	0	20

Для построения функций принадлежности найдены максимальные элементы по строкам матрицы оценки показаний по формулам (3.6) и (3.7). Значения функций принадлежности  $\mu_{ij}$  представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Значения функций принадлежности  $\mu_{ij}$

Уровень загрязненности масла	Диапазон					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Более 10
Низкий	0	0	1	1	0	0
Средний	0	0	0	0	1	0
Высокий	0	0	0	0	0	1

Решение задачи оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ было осуществлено с использованием средств компьютерного моделирования в пакете Fuzzy Logic Toolbox в среде MATLAB.

Fuzzy Logic Toolbox включает 11 встроенных функций принадлежности, которые могут быть сгруппированы следующим образом:

- кусочно-линейную;
- гауссовское распределение;
- сигмоидную кривую;
- квадратическую и кубические кривые.

Функции принадлежности с гауссовским распределением «часто используются в нечетких системах, так как на всей области определения они являются гладкими и принимают ненулевые значения» [129].

В данной работе использована обобщенная колоколообразная функция принадлежности – gbellmf. Данный тип функции принадлежности задается следующей аналитической формулой

$$\mu(T) = \begin{cases} 1 & x = c \\ \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} & 0 < x < c \\ 0 & 0 > x \end{cases} \quad (4.4)$$

где  $a$  – коэффициент концентрации функции принадлежности;

$b$  – коэффициент крутизны функции принадлежности;

$c$  – координата максимума функции принадлежности.

На рисунке 4.4 представлены функции принадлежности элемента «Уровень загрязненности масла –  $T_{10}$ » фактора  $T_i$ .

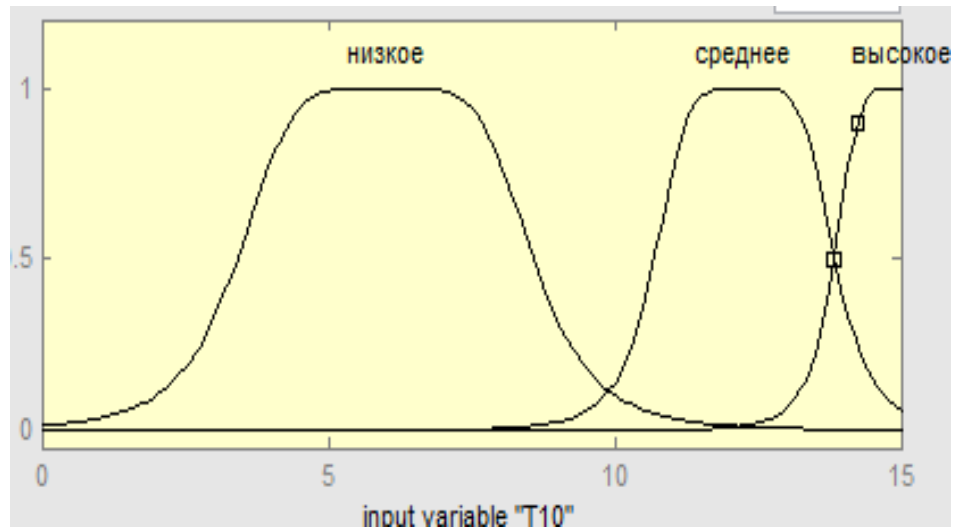


Рисунок 4.4 - Функции принадлежности элемента «Уровень загрязненности масла –  $T_{10}$ » фактора  $T_i$

Состояние элемента «Уровень загрязненности масла –  $T_{10}$ » фактора  $T_i$  попадет в диапазон «Низкое» при значениях (4.5)

$$\mu(T_{10}) = \begin{cases} 1 & x = 6 \\ \frac{1}{1 + \left|\frac{x-6}{2.5}\right|^5} & 0 < x < 6 \\ 0 & 0 > x \text{ и } x < 11 \end{cases} \quad (4.5)$$

Состояние элемента «Уровень загрязненности масла –  $T_{10}$ » фактора  $T_i$  попадет в диапазон «Среднее» при значениях (4.6)

$$\mu(T_{10}) = \begin{cases} 1 & x = 12 \\ \frac{1}{1 + \left|\frac{x-12}{1.5}\right|^5} & 0 < x < 12 \\ 0 & 8 > x \text{ и } x < 17 \end{cases} \quad (4.6)$$

Состояние элемента «Уровень загрязненности масла –  $T_{10}$ » фактора  $T_i$  попадет в диапазон «Высокое» при значениях (4.7)

$$\mu(T_{10}) = \begin{cases} 1 & x = 15 \\ \frac{1}{1 + \left|\frac{x-15}{1.5}\right|^5} & 0 < x < 15 \\ 0 & 11 > x \end{cases} \quad (4.7)$$

Функции принадлежности для оставшихся факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  были получены с использованием прямого группового метода построения функции принадлежности. Анкетирование проводилось заочно, каждый эксперт отвечал на вопрос, принадлежит ли или нет объект  $U_i$  ( $i=\overline{1,n}$ ) (в нашем случае диапазон фактора) к нечеткому множеству  $I_j$  ( $j=\overline{1,m}$ ). Результаты опроса были записаны в специальные бланки (приложение В).

Данные опроса для элемента «Температура воды в двигателе» фактора  $T_i$  приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Сводная таблица опроса

Эксперт	Термы	Диапазон									
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
№1	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
№2	низкая	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
№3	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
№4	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
№5	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

Продолжение таблицы 4.4

Эксперт	Термы	Диапазон									
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
№6	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
№7	низкая	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
№8	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
№9	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
№10	низкая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	средняя	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	высокая	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

С помощью формулы расчета (3.4) получены степени принадлежности диапазона фактора  $U_i$  к нечеткому множеству  $I_j$ . Они представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Степени принадлежности объекта  $U_i$  к нечеткому множеству  $I_j$

Термы	Диапазон									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
Низкая	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
Средняя	0	0,8	1	1	0,3	0	0	0	0	0
Высокая	0	0	0	0	0,7	1	1	1	1	1

График функций принадлежности элемента «Температура воды в двигателе – T1» фактора  $T_i$  представлен на рисунке 4.5.

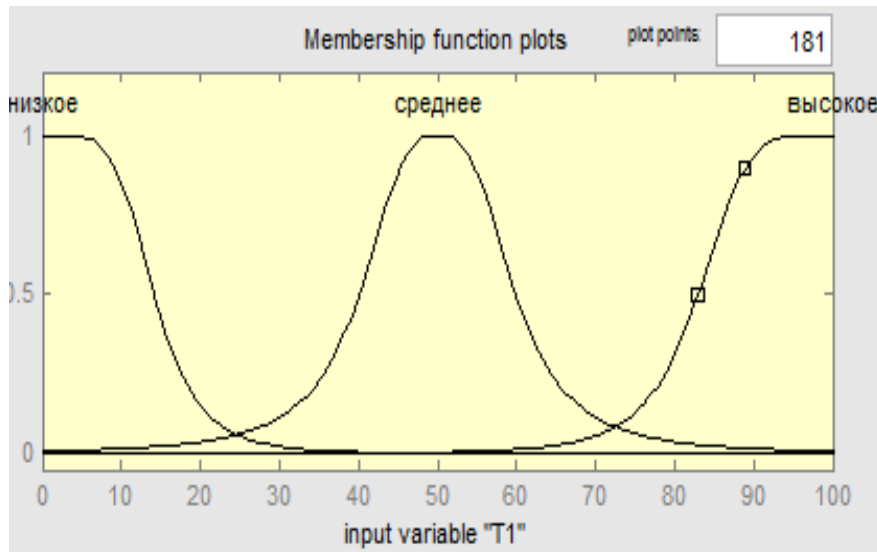


Рисунок 4.5 - График функций принадлежности элемента «Температура воды в двигателе – T1» фактора

Аналогичным образом, путем использования прямого группового метода, были определены функции принадлежности оставшихся факторов. Для лингвистической оценки большинства факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  были использованы термы «Низкое», «Среднее» и «Высокое».

Допустимые значения термов исследуемых элементов фактора  $T_i$  представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Элементы группы технических факторов  $T_i$  и их значения

Обозначение	Элемент фактора	Значения термов	Диапазон
T1	Температура воды в двигателе, °C	Низкое	0-30
		Среднее	30-70
		Высокое	70-100
T2	Температура масла, °C	Низкое	0-50
		Среднее	40-100
		Высокое	90-150
T3	Давление масла в двигателе, МПа	Низкое	0-3
		Среднее	2,5-7
		Высокое	7-10
T4	Давление в главном насосе, МПа	Низкое	0-10
		Среднее	9-30
		Высокое	27-40
T5	Давление в контрольном контуре, МПа	Низкое	0-3
		Среднее	2,5-7
		Высокое	6,5-10
T6	Частота вращения двигателя, об/мин	Низкое	0-1000
		Среднее	800-2000
		Высокое	1600-2500
T7	Уровень масла	Низкое	Низкий
		Среднее	Средний
		Высокое	Высокий
T8	Шум в насосе, дБ	Низкое	0-80
		Среднее	75-90
		Высокое	85-110
T9	Поток масла, л/мин	Низкое	0-1200
		Среднее	1000-7000
		Высокое	6500-8280

## Продолжение таблицы 4.6

Обозначение	Фактор	Значения	Диапазон
T10	Уровень загрязненности масла	Низкое	0-8
		Среднее	8-10
		Высокое	Более 10

Допустимые значения термов исследуемых элементов фактора  $K_i$  представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Элементы группы внешних факторов  $K_i$  и их значения

Обозначение	Элемент фактора	Значения термов	Диапазон
K1	Температура воздуха, °C	Низкое	-50-5
		Среднее	0-26
		Высокое	25-50
K2	Запыленность воздуха, мг/м <sup>3</sup>	Низкое	0-2
		Среднее	1,5-10
		Высокое	10-20
K3	Содержание влаги в воздухе, %	Низкое	0-30
		Среднее	30-70
		Высокое	70-100
K4	Крепость породы	Крепкие	7- 20 (группы: в высшей степени крепкие, очень крепкие, крепкие)
		Средние	2-7 (группы: довольно крепкие, средней крепости)
		Мягкие	0,5-2(группы: довольно мягкие, мягкие, землистые, сыпучие, плавучие)

Допустимые значения термов исследуемых элементов фактора  $C_i$  представлены в таблице 4.8.



Таблица 4.8 - Элементы группы текущих характеристики ГС ОКГЭ  $C_i$  и их значения

Обозначение	Элемент фактора	Значения термов	Диапазон
C1	Выработанный ресурс ОКЭ, тыс. часов	Низкое	0-43,8
		Среднее	43,8-87,6
		Высокое	87,6-131,4
C2	Средний выработанный ресурс насоса ГС ОКЭ, тыс. часов	Низкое	0-13,14
		Среднее	13,14-30,66
		Высокое	30,66-43,8
C3	Средний выработанный ресурс приводов ГС ОКЭ, тыс. часов	Низкое	0-13,14
		Среднее	13,14-30,66
		Высокое	30,66-43,8
C4	Средний выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКЭ, тыс. часов	Низкое	0-8,76
		Среднее	8,76-26,28
		Высокое	26,28-30,66
C5	Средний выработанный ресурс клапанов ГС ОКЭ, тыс. часов	Низкое	0-2,19
		Среднее	2,19-6,57
		Высокое	6,57-8,76
C6	Средний выработанный ресурс линий трубопровода ГС ОКЭ, тыс. часов	Низкое	0-2,19
		Среднее	2,19-6,57
		Высокое	6,57-8,76

Аналогичным образом в пакете Fuzzy Logic Toolbox построены функции принадлежности для других элементов факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$ .

## 4.2 Формирование базы правил и построение нечеткой нейронной сети для решения задачи оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора

В данной работе база правил для решения поставленной задачи спроектирована на основании данных, полученных от экспертов. Для упрощения задачи формирования базы правил для каждой категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  создана отдельная база правил – БП( $S_j$ ). Ниже приведен пример формирования базы правил для категории отказа «Отказ насоса – S1».

На рисунке 4.6 представлены коэффициенты влияния факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на категорию отказа «Отказ насоса – S1».

1. Оценка влияния факторов на оценку возможности появления категории отказа «Отказ насоса» - S1								
№	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка		
T1	Температура воды в двигателе	0,019	K1	Температура воздуха	0,195	C1	Выработанный ресурс ОКГЭ	0,097
T2	Температура масла	0,021	K2	Запыленность воздуха	0,523	C2	Выработанный ресурс насоса ГС ОКГЭ	0,237
T3	Давление масла в двигателе	0,012	K3	Содержание влаги в воздухе	0,135	C3	Выработанный ресурс приводов ГС ОКГЭ	0,157
T4	Давление в главном насосе	0,154	K4	Крепость	0,147	C4	Выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКГЭ	0,168
T5	Давление в контрольном контуре	0,105				C5	Выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ	0,174
T6	Частота вращения двигателя	0,229				C6	Выработанный ресурс линий трубопроводов ГС ОКГЭ	0,167
T7	Уровень масла	0,169						
T8	Шум в насосе	0,065						
T9	Расход масла	0,057						
T10	Уровень загрязненности масла	0,170						

Рисунок 4.6 - Коэффициенты влияния элементов факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  на категорию отказа «Отказ насоса – S1»

Из рисунка видно что, в базу правил БП( $S_1$ ) необходимо включить элементы «Давление в главном насосе –  $T_4$ », «Частота вращения двигателя –  $T_6$ », «Уровень масла –  $T_7$ » и «Уровень загрязненности масла –  $T_7$ » фактора  $T_i$ ; «Температура воздуха –  $K_1$ » и «Запыленность воздуха –  $K_2$ » фактора  $K_i$ ; «Выработанный ресурс насоса ГС ОКГЭ –  $C_2$ », «Выработанный ресурс приводов ГС ОКГЭ –  $C_3$ », «Выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКГЭ –  $C_4$ », «Выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ –  $C_5$ » и «Выработанный ресурс линий трубопроводов ГС ОКГЭ –  $C_6$ » фактора  $C_i$ . Данные факторы включены в базу правил БП( $S_1$ ) как так их степень их влияния больше 0.15.

После экспертного анализа полного перечня автоматически сгенерированных правил, была получена база правил категории отказа для категории отказа «Отказ насоса –  $S_1$ ». В таблице 4.9 представлен фрагмент полученной базы правил.

Таблица 4.9 - Фрагмент базы правил для получения возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_1$ .

№ п.п	Правило
1	Если $T_4 - [низкое]$ , $T_6 - [низкое]$ , $T_7 - [низкое]$ , $K_1 - [низкое]$ , $K_2 - [низкое]$ , и $C_2 - [низкое]$ , $C_3 - [низкое]$ , $C_4 - [низкое]$ , $C_5 - [низкое]$ , $C_6 - [низкое]$ тогда возможность появления категории отказа $S_1 - [высокое]$
2	Если $T_4 - [низкое]$ , $T_6 - [низкое]$ , $T_7 - [низкое]$ , $K_1 - [низкое]$ , $K_2 - [низкое]$ , и $C_2 - [среднее]$ , $C_3 - [низкое]$ , $C_4 - [низкое]$ , $C_5 - [низкое]$ , $C_6 - [низкое]$ тогда возможность появления категории отказа $S_1 - [высокое]$
...	...
n	Если $T_4 - [высокое]$ , $T_6 - [высокое]$ , $T_7 - [высокое]$ , $K_1 - [высокое]$ , $K_2 - [высокое]$ , и $C_2 - [высокое]$ , $C_3 - [высокое]$ , $C_4 - [высокое]$ , $C_5 - [высокое]$ , $C_6 - [высокое]$ тогда возможность появления категории отказа $S_1 - [высокое]$

На рисунке 4.7 представлен фрагмент базы правил для выявления категории отказа «Отказ насоса –  $S_1$ » в пакете Fuzzy Logic Toolbox.

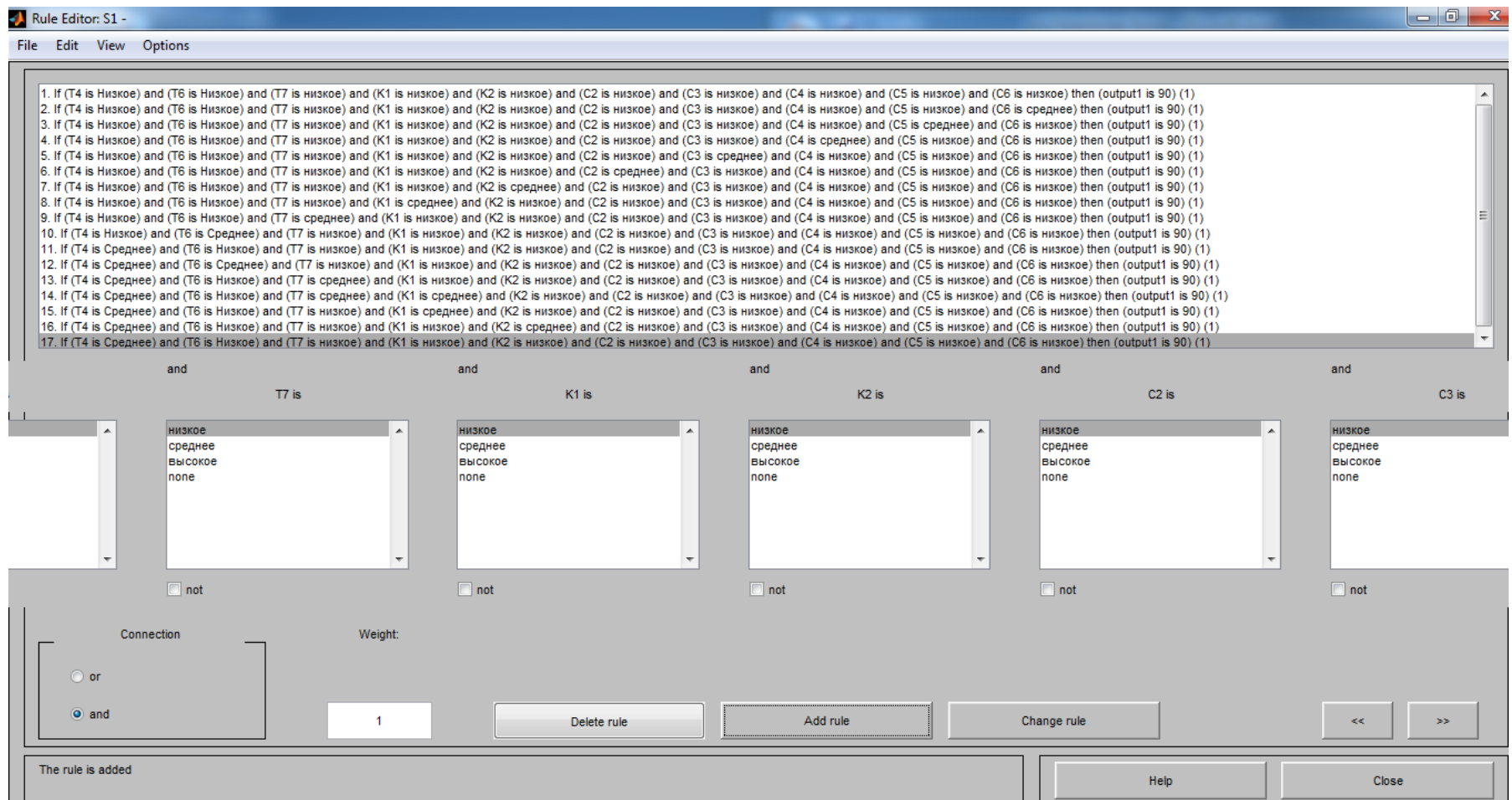


Рисунок 4.7 - Фрагмент базы правил для категории отказа «Отказ насоса – S<sub>1</sub>»

На рисунке 4.8 представлена визуализация поверхности «входы-выход» для входов «Давление в главном насосе –  $T_4$ », «Частота вращения двигателя –  $T_6$ ». Визуализация осуществлена с помощью модуля Surface Viewer.

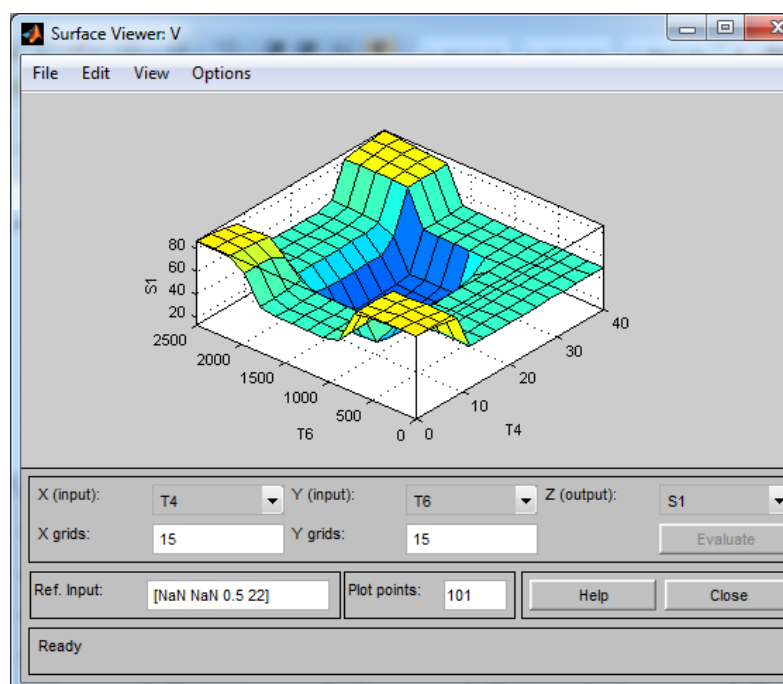


Рисунок 4.8 - Визуализация поверхности «входы-выходы» для категории отказа «Отказ насоса –  $S_1$ »

Аналогичным образом получены и базы правил для оставшихся категорий отказа ГС ОКГЭ  $S_j$ .

В качестве сети была выбрана адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода ANFIS. В пакете ANFIS-редактор в среде MATLAB была построены сети для каждой категории отказа  $S_j$ .

Схема нейронной сети оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ  $S_1$  представлена на рисунке 4.9.

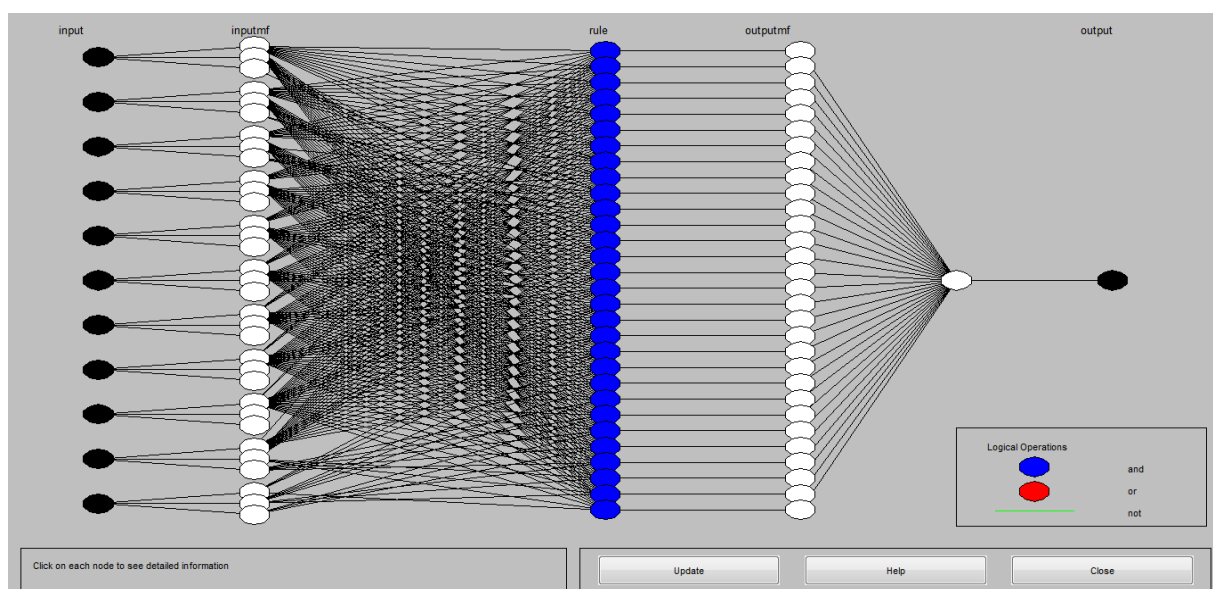


Рисунок 4.9 - Схема нейронной сети оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ S1

Таким образом, для каждой категории категорий отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  спроектированы базы правил и построены адаптивные сети на основе системы нечеткого вывода ANFIS.

Все сети для каждой категории категорий отказа ГС ОКГЭ  $S_j$  обучались методом обратного распространения ошибки. Результат обучения представлен на рисунке 4.10.

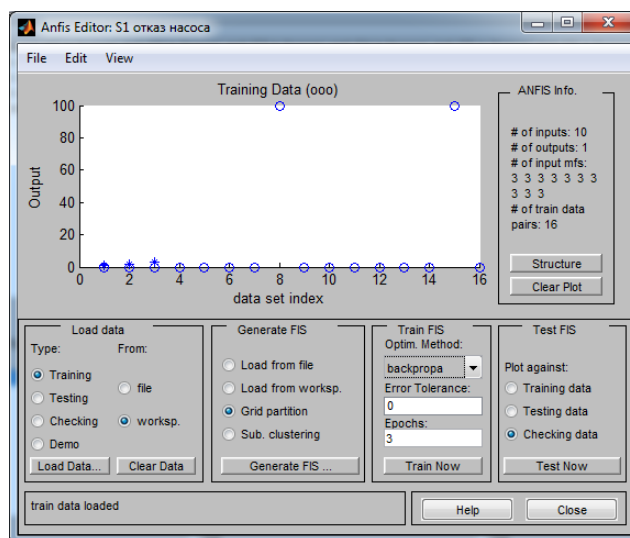


Рисунок 4.10 - Обучение нейронной сети оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ S1

### 4.3 Экспериментальное исследование модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора на контрольном примере

Для контрольного примера расчета модели, поставлено значение фактора «Уровень загрязненности масла –  $T_{10}$ » – «высокий», а для остальных факторов – значение «средний».

Значения факторов для контрольного примера оценки возможности появления категории отказа представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Контрольный пример. Входные данные

Фактор	Значение		Элемент	Значение		Элемент	Значение	
$T_1$	Средний	49,95	$K_1$	Средний	14,00	$C_1$	Средний	71,79
$T_2$	Средний	74,79	$K_2$	Средний	11,83	$C_2$	Средний	21,97
$T_3$	Средний	6,34	$K_3$	Средний	68,06	$C_3$	Средний	21,97
$T_4$	Средний	22,30	$K_4$	Средний	1,00	$C_4$	Средний	14,38
$T_5$	Средний	4,93				$C_5$	Средний	4,24
$T_6$	Средний	1219,24				$C_6$	Средний	4,14
$T_7$	Средний	2,00						
$T_8$	Средний	49,49						
$T_9$	Средний	4345,85						
$T_{10}$	Высокий	5,59						

В итоге получены значения возможностей появления категорий отказов  $S_j$  гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора. Полученные значения представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 - Возможности появления категории отказа  $S_j$ 

Категория отказа	$S_j$
Отказ насоса – $S_1$	10
Отказ гидравлического цилиндра – $S_2$	20
Отказ гидравлического мотора – $S_3$	10
Отказ клапанов регулирования давления – $S_4$	10
Отказ клапанов управления направлением – $S_5$	20
Отказ клапанов регулирования скорости потока масла – $S_6$	20
Отказ линии трубопровода – $S_7$	80

Дальше по теореме сложения возможностей получена общая возможность отказа гидравлической системы ОКГЭ:  $P=0.80$ . В таблице 4.12 представлен результат исследования.

Таблица 4.12 - Результат проведенного эксперимента

Результат	
Общая возможность отказа ГС	80
Диапазон отказа	80 – 100 (Высокая возможность отказа)
Критические категории отказа	«Отказ линии трубопровода – $S_7$ »

Таким образом было проведено экспериментальное исследование модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора и получены возможности появления каждой из категорий отказов ГС ОКГЭ  $S_j$  и общая возможность отказа ГС ОКГЭ  $P$ .



#### 4.4. Оценка на адекватность полученной модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора

Для проверки адекватности построенной модели были использованы экспериментальные данные. В наборе данных представлены значения всех элементов факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  и номер категории отказа –  $j$ . На рисунке 4.11 представлен фрагмент значений опорного набора данных. Опорный набор данных состоял из 247 записей, семь из которых состояли из набора значений факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  при которых произошли отказы, а в остальных случаях не было отказа.

Рисунок 4.11 - Фрагмент значений опорного набора данных

В таблице 4.13 представлены реальные отказы и результаты оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ с помощью разработанной модели.

Таблица 4.13 - Сравнение полученных результатов

№ отказа	Отказ элемента ГС	Результат оценки возможности появления отказа	
		Критическая категория отказа	Оценка
1	$S_7$	$S_7$	80
2	$S_4$	$S_4$	90
3	$S_1$	$S_1$	80
4	$S_6$	$S_6$	90
5	$S_7$	$S_7$	80
6	$S_2$	$S_2$	90
7	$S_7$	$S_7$	90

По данным без отказа, средние значения оценок возможностей появления категорий отказов ГС ОКГЭ  $S_j$  были от 20 - 30.

Таким образом, сравнивая категорию реального отказа с критической категорией отказа, полученной с помощью разработанной модели, можно сделать вывод, что модель оценки возможности появления категории отказа готова к использованию.

#### **4.5. Оценка эффективности внедрения модели оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ**

Разработанная в данной работе модель оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ позволяет перейти от формы ТОиР ППР, к ремонтам оборудования, исходя из его текущего технического состояния ОФС.

Коэффициент технической готовности  $K_{тг}$  при форме ТОиР ППР считается по формуле

$$K_{тг1} = \frac{T_{кал} - (T_{техн} + T_{пр} + T_{ар})}{T_{кал} - T_{техн}} \quad 4.8$$

Коэффициент технической готовности  $K_{тг}$  при форме ТОиР ОФС считается по формуле

$$K_{тг2} = \frac{T_{кал} - (T_{техн} + T_{т.мон.} + T_{кр})}{T_{кал} - T_{техн}} \quad 4.9$$

где  $T_{кал}$  – календарное время в году;

$T_{тех}$  – время простоев по технологическим условиям ведения горных работ;

$T_{пр}$  – продолжительности плановых ремонтов;

$T_{ар}$  – продолжительности аварийных ремонтов;

$T_{т.мон.}$  – время остановки на технический мониторинг;

$T_{кр}$  – продолжительность корректирующего годового ремонта.

По результатам выполненных ранее исследований [104]  
 $K_{тг1} = 0.74; K_{тг2} = 0.81.$

Себестоимость одного условного часа обслуживания ОКГЭ считается как сумма всех затрат на ремонт и обслуживания.

По результатам выполненных ранее исследований [104]  $S_{ппр} = 950,87$  руб./час, а  $S_{офс} = 781,3$  руб./час.

Разработанная в данной работе модель оценки возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ позволяет перейти от регламентированных ремонтов, к ремонтам оборудования, исходя из его текущего технического состояния, что приведет к снижению материальных затрат на 18 %, и увеличению коэффициент технической готовности экскаватора на 9 %.

#### **Выводы по главе 4**

1. Определены функции принадлежности факторов  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $C_i$  и категории отказов  $S_j$ .
2. Разработаны нечеткие базы правил и построены адаптивные сети на основе системы нечеткого вывода для каждой категории отказа ГС ОКГЭ  $S_j$ .
3. Проведено экспериментальное исследование модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора.
4. Проведена оценка на адекватность модели оценки возможности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора.
5. Переход от формы ТОиР ППР к ремонтам оборудования, исходя из его текущего технического состояния обеспечивает снижение затрат на 18%, и увеличивает коэффициент технической готовности экскаватора на 9%.

## Заключение

Результаты выполненных исследований позволило сделать следующие рекомендации и выводы:

- опыт эксплуатации одноковшовых карьерных экскаваторов показывает, что гидравлическое оборудование имеет высокое значение времени простоев (45 %) и предупреждение отказа ГС приведет к повышению эффективности управления системой ТОиР ОКГЭ. Все отказы ГС следует сгруппировать в 7 категорий: «отказ насоса», «отказ гидравлического цилиндра», «отказ гидравлического мотора», «отказ клапанов регулирования давления», «отказ клапанов управления направлением», «отказ клапанов регулирования скорости потока масла» и «отказ линии трубопровода»;

- все факторы, влияющие на работу ГС ОКГЭ, можно разделить на: технические  $T_i$  (температура воды в двигателе, температура и давление масла в системе, уровень загрязнения масла и прочее), внешние  $K_i$  (климатические и горно-геологические условия) и текущие характеристики  $C_i$  (срок эксплуатации ОКГЭ и срок эксплуатации элементов ОКГЭ);

- разработанная модель позволяет оценивать возможность появления категории отказа ГС ОКГЭ на основе значимых для этой категории технических и внешних факторов, а также текущих характеристик ГС ОКГЭ;

- сформировать функции принадлежности каждого фактора, а также спроектировать БП для каждой категории  $S_j$  и получить балльную оценку возможности появления категории отказа ГС ОКГЭ позволяет оценка взаимосвязей факторов и категорий отказов на основе экспертно-моделирующих процедур;

- внедрение данной модели позволит эффективно управлять системой ТОиР, перейдя с формы ППР на форму ОФС, что приведет к снижению материальных затрат на 18 % и увеличению коэффициент технической готовности ОКГЭ на 9 %.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Академик [Электронный ресурс]. URL: <https://dic.academic.ru/> (дата обращения: 11.09.2014).
2. Алферов М. В. Разработка алгоритмов комплексного анализа деятельности угольных предприятий с применением метода нейронных сетей: дис. ... канд. техн. наук: Институт угля и углехимии СО РАН.- Кемерово, 2004. - 160с.
3. Анистратов К. Ю. Анализ рынка карьерных экскаваторов и самосвалов в РФ и странах СНГ // «Горная Промышленность». 2012. - №2. - С. 16-19.
4. Анистратов К. Ю., Конопелько С. А. Оптимальный срок службы карьерных одноковшовых экскаваторов с электрическим приводом // «Горная Промышленность». - 2007. - №2. - С. 21-23.
5. Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М. Применение нейронных сетей для диагностики электромеханических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №4. - С. 132-139.
6. Бажанов Ю. С., Бухнин А. В., Кобляков Д. А. Системы искусственного интеллекта и принятия решений. Оптимизация баз знаний нечетких экспертных систем: учеб.пособие. - Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т.им. Р. Е. Алексеева, 2012. - 84 с.
7. Баранникова И. В., Мажибрада И. Алгоритм прогнозирования вероятности появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного экскаватора. // Горное оборудование и электромеханика. - 2017, № 6. - С. 26–29.
8. Баранникова И. В., Мажибрада И. Проблемы диагностики и предупреждения износа карьерного оборудования // Новая наука: проблемы и перспективы: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (29 сентября 2015 г, г. Стерлитамак). - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. - С. 106-110.

9. Баранникова И. В., Мажибрада И. Прогнозирование отказов одноковшовых экскаваторов на основе метода Сугэно // НОВАЯ НАУКА: ОТ ИДЕИ К РЕЗУЛЬТАТУ: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (29 мая 2016 г, г. Сургут). - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. - С. 184-188.
10. Баранникова И. В., Мажибрада И. Прогнозирование отказов одноковшовых экскаваторов на основе методов искусственного интеллекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - №1. - С. 37-46.
11. Барков А. В. Основные требования к современным средствам мониторинга состояния и диагностики машин и оборудования / А.В. Барков. – М.: 2011. – 716 с.
12. Беляков Ю. И. Выемочно-погрузочные работы на карьерах. - М.: Недра, 1987. - 268 с.
13. Бешелев С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок. - М.: Статистика, 1980. - 263 с.
14. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. - 2 изд. - М.: Статистика, 1980. - 263 с.
15. Бритарев В. А., Замышляев В. Ф. Горные машины и комплексы. Учебное пособие для техникумов. - М.: Недра, 1984. - 288 с.
16. Бродский Г. С., Слесарев Б. В., Повышение надежности гидропривода – средство эффективного внедрения гидравлических экскаваторов на горных предприятиях СНГ Приложение 2 - возможные неисправности и методы их устранения // ООО РИТМ [Электронный ресурс]. URL: [://www.bcritm.ru/stati/opisanie/tehnicheskoe-opisanie-eksavatora-ek-8.php?limit=1&limitstart=55](http://www.bcritm.ru/stati/opisanie/tehnicheskoe-opisanie-eksavatora-ek-8.php?limit=1&limitstart=55) (дата обращения: 31.01.2016).
17. Булес П. Обеспечение надежности работы карьерных гидравлических экскаваторов при их эксплуатации на открытых разработках России: дис. ...

- канд. техн. - ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»», 2016.
18. Васючков Ю. Ф. Горное дело: Учеб. для техникумов. - М.: Недра, 1990. - 512 с.
19. Веб-Механик информационного-инженерный портал [Электронный ресурс]. URL: <http://web-mechanic.ru> (дата обращения: 25.10.2014).
20. Великанов В. С., Исмагилов К. В., Савельев В. И., Габитов И. А. Программная реализация расчета ресурса рукояти экскаватора // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/12/61583> (дата обращения: 02.10.2017).
21. Вентцель Е. С. Теория вероятностей 4-е изд., стереотип. - М.: Наука, Физматгиз, 1969. - 576 с., ил.
22. Вудсон У., Коновер Д. Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов / Пер. с английского А. М. Пашутина - М.: МИР, 1968. - 518 с.
23. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. - 384 с.
24. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей. - М.: ИПРЖР, 2000. - 416 с.
25. Герике Б. Л., Абрамов И. Л., Герике П. Б. Стратегия технического обслуживания горных машин по фактическому состоянию на основе методов вибродиагностики и неразрушающего контроля // Вестник КузГТУ. - 2008. - №1. - С. 11-14.
26. Гетопанов В. Н., Рачек В. М. Проектирование и надежность средств комплексной механизации: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1986. - 208 с.
27. Гидравлические механизмы // ООО "ТЕХНОСЕРВИС" [Электронный ресурс]. URL: [http://www.favoritservis.ru/hydraulic\\_chast2.html](http://www.favoritservis.ru/hydraulic_chast2.html) (дата обращения: 25.10.2014).

28. Гидравлические системы — проблемы эксплуатации. [Электронный ресурс].  
URL: <http://web-mechanic.ru/gidravlika-i-pnevmatika/gidravlicheskie-sistemy/problemy-ekspluatatsii.html> (дата обращения: 20.04.2016).
29. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Высш. шк, 2003. - 479 с.
30. Головкин С. В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. - 2009. - №2. - С. 90-95.
31. Горное оборудование Уралмашзавода / Коллектив авторов, Под ред. Бойко Г. Х. - Екатеринбург: «Уральский рабочий», 2003. - 240 с.
32. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением N 1)
33. ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения
34. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения (с Изменениями N 1, 2)
35. ГОСТ 23660-79. Система технического обслуживания и ремонта техники. Обеспечение ремонтпригодности при разработке изделий.
36. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения
37. Гуцыкова С. В. К вопросу согласованности экспертных оценок профессионально важных качеств // Знание. Понимание. Умение. - 2009. - №4. - С. 200-204.
38. Денисов М. В., Кизим А. В., Давыдова С. В., Давыдов Д. А., Камаев В. А. Использование нечетких нейронных сетей при ТОиР дорожно-строительных машин // Известия ВолгГТУ. - 2014. - №6 (133). - С. 29-34.



- 39.Диагностика неисправностей при индикации кодов ошибки электрооборудования PC400-7 [Электронный ресурс]. URL: [http://komatsusib.ru/images/fls/faq/pc400-7\\_errors.pdf](http://komatsusib.ru/images/fls/faq/pc400-7_errors.pdf) (дата обращения: 10.02.2017).
- 40.Дроздова Л. Г. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. пособие. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. - 235 с.
- 41.Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MATLAB 5 с пакетами расширения. - М.: Нолидж, 2001. - 880 с.
- 42.Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: Пер. с фр.. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с.
- 43.Евменов В. П. Интеллектуальные системы управления: Учебное пособие. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. - 304 с.
- 44.Елтаренко Е. А., Крупнова Е. К. Обработка экспертных оценок. Учебное пособие. - М.: Изд. МИФИ, 1982. - 96 с.
- 45.Ермилов, А. Э. Применение фреймовой модели и нечёткой логики в основе построения инструментариев автоматизированных систем мониторинга / А. Э. Ермилов, П. В. Мисевич // Труды Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е.Алексеева, 2015, №1(108), Нижегород. гос. техн. ун-т.-Н.Новгород, С.71-76
- 46.Ещеркин П. В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Кемерово, 2012. - 149 с.
- 47.Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Пер. с английского Н. И. Ринго - М.: МИР, 1976. - 167 с.
- 48.Заенцев И. В. Нейронные сети: основные модели. - Воронеж: Издательский дом «Воронеж», 1999. - 452 с.

- 49.Зайцева Т. В., Игрунова С. В., Путивцева Н. П., Пусная О. П., Манзуланич М. Ю. Компьютерная технология генерации правил для гибридных продукционно-фреймовых экспертных систем // Вопросы радиоэлектроники. Серия Электронная вычислительная техника. 2011. Вып. 1. С. 105-115.
- 50.Замышляев В. Ф., Русихин В. И., Шешко Е. Е. Эксплуатация и ремонт карьерного оборудования: Учеб. пособие для вузов.– М.: Недра, 1991.–285 с.:ил.
- 51.Иванова О. В., Иванов П. В. Проектирование экспертных систем для диагностики неисправностей // Т-Comm. - 2013. - №10. - С. 51-52.
- 52.Иванченко С. Н., Мамаев Ю. А., Шемякин С. А., Чебан А. Ю., Моторный В. А. Метод оценки работоспособности горных машин при выемке породы // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - №12. - С. 152-162.
- 53.Каид В. А. А. Методы построения функций принадлежности нечетких множеств // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2013. - №2. - С. 144-153.
- 54.Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей.: Пер. с англ.. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. - 291 с.
- 55.Камаев В. А., Мельник В. Ю., Кизим А. В. Применение неметрических методов многокритериального планирования для поддержки принятия решений в задачах технического обслуживания и ремонта // Известия ЮФУ. Технические науки.. - 2012. - №7. - С. 98-106.
- 56.Кантович Л. И., Гетопанов В. Н. Горные машины: Учеб. для техникумов. - М.: Недра, 1989. - 304 с.
- 57.Кириллов К. Г. Основные неисправности гидропривода, их профилактика и методы устранения [Электронный ресурс]. URL: <http://zapchasty.tradicia-k.ru/articles/osnovnye-neispravnosti-gidroprivoda-ikh-profilaktika-i-metody-ustraneniya> (дата обращения: 04.05.2016).

- 58.Классификация методов прогнозирования [Электронный ресурс]. URL: <http://sergey.svetunkov.ru/study/forecasting/files/12.pdf> (дата обращения: 24.10.2016).
- 59.Ключко И. И., Макеев А. Ю., Резник А. В. Эксплуатация карьеров. Конспект лекций. - Донецк: ДонНТУ, 2017. - 160 с.
- 60.Коваль П. В. Гидравлика и гидропривод горных машин: Учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы». - М.: Машиностроение, 1979. - 319 с.
- 61.Корецкий В. Б. Технологичность горно-транспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009. - №12. - С. 226-231.
- 62.Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. - М.: Радио и Связь, 1982. - 431 с.
- 63.Кох А.И. Ремонт экскаваторов. - М.: Недра, 1979. - 200 с.
- 64.Кравченко В. М. Научные основы теории надежности и технического обслуживания горных машин как системы элементов различного ресурса // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2000. - №4. - С. 25.
- 65.Круглов В. В., Длин М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. - М.: ФИЗМАЛИТ, 2001. - 225 с.
- 66.Круглов В. В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. - М.: ФИЗМАЛИТ, 2001. - 221 с.
- 67.Круглов В. В., Борисов В. В. Гибридные нейронные сети. - Смоленск: Русич, 2001. - 224 с.
- 68.Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. - М.: Горячая линия–Телеком, 2001. - 382 с.
- 69.Куприянов В. В., Стадник Д. А., Компаниец Б. И. Оценка остаточного ресурса горно-шахтного оборудования одна из важнейших задач при управлении выемочным участком угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - №2-1. - С. 329-336.

70. Курбатова О. А., Павлюченко В. М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования: Учеб. пособие. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. - 286 с.
71. Курбатова, О. А. Надежность горных машин: учеб. пособие /О. А. Курбатова, Л. С. Ксендзенко, Д. Н. Николайчук. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 119 с.
72. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. - 736 с.:ил.
73. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта: Пер. с франц. - М.: Мир, 1991. - 568 с.
74. Мажибрада И. Использование методов искусственного интеллекта в системах технического обслуживания и ремонта карьерного оборудования // Новая наука: проблемы и перспективы: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (04 октября 2015 г, г. Стерлитамак). - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. - С. 111-115.
75. Мажибрада И. Экспертный анализ степени влияния факторов на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - №9. - С. 220-225.
76. Мажибрада И., Баранникова И. В., Бондаренко И. С. Анализ факторов, влияющих на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора// Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 13-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. Т.1: материалы конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. - С.162-167

- 77.Матковская М. О. Исследование алгоритмов нечёткого вывода в моделях принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. №3. С.240-244
- 78.Методы экспертных оценок // Хабрахабр [Электронный ресурс]. URL: <https://habrahabr.ru/post/189626/> (дата обращения: 17.03.2015).
- 79.Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / Под ред. Боровикова В. П. - 2 изд. - М.: Горячая линия – Телеком, 2008. - 392 с.
- 80.Нечёткая логика: алгебраические основы и приложения: Монография / Блюмин С. Л., Шуйкова И. А., Сараев П. В., Черпаков И. В. – Липецк:ЛЭГИ, 2002. - 111 с.
- 81.Новикова Т. Б. Опыт моделирования диаграммы «дерево отказов»// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. –№12-7.–С.1296-1300 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=11032> (дата обращения: 31.01.2017)
- 82.Обзор программного обеспечения для статистического анализа данных [Электронный ресурс]. URL: [http://tsput.ru/res/informat/mop/lections/lection\\_8.htm](http://tsput.ru/res/informat/mop/lections/lection_8.htm) (дата обращения: 20.01.2018).
- 83.Орлов А. И. Теория принятия решений: Учебное пособие. - М.: Издательство "Март", 2004. - 656 с.
- 84.Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. - М.: Наука, 1981. - 206 с.
- 85.Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского - М.: Финансы и статистика, 2002. -344 с.
- 86.Островский М. С., Масляков Н. С. Информационная поддержка технологии ремонта деталей горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №5. С.62-70

- 87.Паклин Н. Нечеткая логика – математические основы // BaseGroup Labs [Электронный ресурс]. URL: <https://basegroup.ru/community/articles/fuzzylogic-math> (дата обращения: 05.03.2015).
- 88.Пивкин В. Я., Бакулин В. П., Кореньков Д. И. Нечеткие множества в системах управления. - Новосибирск: изд-во НГУ, 1998. - 75 с.
- 89.Повышение надежности и совершенствование управления эксплуатацией карьерных гидравлических экскаваторов с использованием измерительно-информационных комплексов // AGA Group Inc. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.againc.net/media/3791/article\\_jakutia2004\\_1.pdf](http://www.againc.net/media/3791/article_jakutia2004_1.pdf) (дата обращения: 25.05.2014).
- 90.Подэрни Р. Ю. Горные машины и комплексы для открытых горных работ: Учебное пособие. В 2 т. Т. 1. – 4-е изд., стер. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. - 422 с.
- 91.Подэрни Р. Ю. Современные методы и оборудование для открытых горных разработок // Конференция «Машины и оборудование для открытых горных работ». Сборник тезисов. - 2003. - С. 5-8.
- 92.Полковникова Н. А., Курейчик В. М. Разработка модели экспертной системы на основе нечёткой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2014. - №1(150). - С. 83-92.
- 93.Порцевский А. К., Анистратов Ю. И. Открытые горные работы: Учебное пособие. - М.: Московская государственная геологоразведочная академия, 1999. - 74 с.
- 94.Потапов А. С. Искусственный интеллект и универсальное мышление. - СПб.: Политехника, 2012. - 711 с.
- 95.Представление знаний и экспертные системы. Экспертная система компьютерного познания // Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН [Электронный ресурс]. URL:

- [http://www.math.nsc.ru/AP/ScientificDiscovery/pages/lecture\\_12.pdf](http://www.math.nsc.ru/AP/ScientificDiscovery/pages/lecture_12.pdf) (дата обращения: 24.10.2016).
96. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. - 1408 с.
  97. Ремонт экскаваторов HITACHI [Электронный ресурс]. URL: [http://www.favoritservis.ru/hydraulic\\_chast2.html](http://www.favoritservis.ru/hydraulic_chast2.html) (дата обращения: 18.12.2017).
  98. Репин Н. Я., Репин Л. Н. Процессы открытых горных работ: Учебник. - М.: Издательство «Горная книга», 2015. - 518 с.
  99. Ржевский В. В. Открытые горные работы. Часть I. Производственные процессы: Учебник для вузов. — 4-е изд., перепаб. и доп.- М.: Недра, 1985.- 509 с.
  100. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 384с.:ил.
  101. Сайт группы компаний Форклифт [Электронный ресурс]. URL: <http://komatsusib.ru> (дата обращения: 25.10.2014).
  102. Сайт компании ГидроТехСервия [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hts.by> (дата обращения: 25.10.2014).
  103. Семейкин В. Д., Скупченко А. В. Моделирование искусственных нейронных сетей в среде Matlab // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. - 2009. - №1. - С. 159-164.
  104. Сергеев В. Ю. Обоснование и разработка новой технологии фирменного сервисного обслуживания карьерных экскаваторов: дис. ... канд. техн. наук: ГОУ ВПО «Московский государственный горный университет». - М., 2010. - 159 с.
  105. Сергеев С. Ф. Инженерная психология и эргономика: Учебное пособие. - М.: НИИ школьных технологий, 2008. - 176 с.

106. Синицкий А. Какой экскаватор выгоднее? На российском рынке гидравлических экскаваторов формируются новые сегменты [Электронный ресурс]. URL: <https://os1.ru/article/5514-kakoy-ekskavator-vygodnee-na-rossiyskom-rynke-gidravlicheskih-ekskavatorov-formiruyutsya-novye-segmenty> (дата обращения: 24.11.2017).
107. Системы нечеткого вывода [Электронный ресурс]. URL: [http://fuzzy-group.narod.ru/files/Fuzzy\\_Modeling/Lecture08.1.Fuzzy.inference.system.pdf](http://fuzzy-group.narod.ru/files/Fuzzy_Modeling/Lecture08.1.Fuzzy.inference.system.pdf) (дата обращения: 16.04.2016).
108. Системы нечеткого вывода [Электронный ресурс]. URL: <http://nrsu.bstu.ru/chap27.html> (дата обращения: 17.04.2015).
109. Смолин Д. В. Введение в искусственный интеллект: конспект лекций. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 208 с.
110. Солод Г. И., Морозов В. И., Русихин В. И. Технология машиностроения и ремонт горных машин. - М.: Недра, 1988. - 424 с.
111. Соломахо В. Л., Цитович Б. В., Соколовский С. С. Номирование точности и технические измерения: Учебник – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 376 с.:ил.
112. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа: Учеб. пособие. – СПб.: «Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000 г. – 326 с.
113. Стукач О. В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - 163 с.
114. Тарасян В. С. Пакет Fuzzy Logic Toolbox for Matlab: учеб. пособие. - Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. - 112 с.
115. Техническое обслуживание и ремонт [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Техническое\\_обслуживание\\_и\\_ремонт](https://ru.wikipedia.org/wiki/Техническое_обслуживание_и_ремонт) (дата обращения: 25.12.2015).



116. Техническое обслуживание по фактическому состоянию // ООО «Систематика» [Электронный ресурс]. URL: [http://tsput.ru/res/informat/mop/lections/lection\\_8.htm](http://tsput.ru/res/informat/mop/lections/lection_8.htm) (дата обращения: 15.10.2017).
117. Техническое описание и инструкция по эксплуатации экскаватора ЕК-8 Приложение 2 - возможные неисправности и методы их устранения // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bcrtm.ru/stati/opisanie/tehnicheskoe-opisanie-eks-kavatora-ek-8.php?limit=1&limitstart=55> (дата обращения: 31.01.2016).
118. Тинякова В. И. Математические методы обработки экспертной информации. Учебное пособие. - Воронеж: ВГУ, 2006. - 67 с.
119. Ульянов С., Литвинцева Л., Добрынин В, Мишин А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – 1-е изд. – М.: Pronetlabs, 2011. - 406 с
120. Хорешок А. А., Кудреватых А. В. Механика или гидравлика? // «Уголь Кузбасса». - 2011. - №3. - С. 74-78.
121. Хорешок А. А., Кудреватых А. В., Кузнецов В. В Характеристика методов технического обслуживания горно-транспортного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №55. - С. 48-61.
122. Черников Ю. Г. Системный анализ и исследование операций: Учебное пособие для вузов. - М.: МГГУ, 2006. - 370 с.
123. Чернов В. Г. Нечеткие контроллеры. Основы теории и построения: Учеб. пособие по курсу «Интеллектуальные системы управления». - Владимир: Владим. гос. ун-т, 2003. - 148 с.
124. Чиликин А. А., Трушин Н. Н. Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2014. - №3. - С. 117-127.

125. Шибанов Д. А. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ-18р/20к, для планирования технического обслуживания и ремонтов: дис. канд. техн. наук. ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, 2015.
126. Шибанов Д. А. Перспективы совершенствования системы технического обслуживания и ремонта карьерных экскаваторов производства ООО «Из-кэртэкс имени П. Г. Коробкова» // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2013. - №8. - С.128-135.
127. Шилов, П. М. Технология производства и ремонт горных машин. - М.: Высшая школа, 1986. - 398 с.
128. Шпрехер Д. М. Экспериментальное исследование диагностирования электромеханических систем горных машин в нейросетевом базисе // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №S4. - С. 250-254.
129. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс]. URL: [http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/1\\_7\\_5\\_7.php](http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/1_7_5_7.php) (дата обращения: 16.06.2017).
130. Щадов М. И., Анистратов К. Ю., Фёдоров А. В. Метод формирования структуры парка карьерной техники на действующем предприятии // «Горная Промышленность». - 2009. - №5(87). - С. 10-13.
131. Эксплуатационные требования к гидросистемам с применением гидромашин // ОАО «Пневмостроймашина» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bcritm.ru/stati/gidravlika/psm-1.php> (дата обращения: 10.02.2017).
132. Электронный учебник КарМТУ «Обслуживание и ремонт транспортных средств» [Электронный ресурс]. URL: <http://lib.kstu.kz:8300/tb/books/2016/PT/Balabaev%20i%20dr%201/> (дата обращения: 17.03.2015).

133. ABC Consulting [Электронный ресурс]. URL: [http://www.abc.org.ru/deductor\\_ap.html](http://www.abc.org.ru/deductor_ap.html) (дата обращения: 20.01.2018).
134. Felix Ng, Jennifer A. Harding, Jacqueline Glass, Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring //Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 83,2017, p. 176-193
135. Hang Qingwei, Zhang Ying, The design of an expert system on diagnosing the malfunction of hydraulic excavator //China Modern Educational Equipment, Volume 15, 2010, p. 58- 60.
136. Jang, Juh-Shing Roger, Neuro-fuzzy and soft computing : a computational approach to learning and machine intelligence / Juh-Shing Roger Jang, Chuen-Tsai Sun, Eiji Mizutani. 1997
137. Li Guoping, Zhang Qingwei, Ma Xiao Combination of Fault Tree and Neural Networks in Excavator Diagnosis / TELKOMNIKA, Vol. 11, 2013, p. 1787-1796
138. M.Jocanović, V.Karanović, A.Ivanišević, D.Knežević, Hydraulic hammer excavator failure due to solid particle contamination /Military Technical Courier, 2014, Vol.62, No. 1, p. 112-129
139. Peijiang Chen, Research on engineering machinery fault diagnosis based on neural network /Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 2013, Vol. 49 Issue 2, p. 771-777
140. S. C. Liu, S. Y. Liu, An Efficient Expert System for Machine Fault Diagnosis, /International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, Vol. 21, p. 691–698.
141. Statistica. Статистический учебник // StatSoft, Inc. [Электронный ресурс]. URL:[http://www.systematic.ru/tehnitcheskoe\\_obs\\_luzhivanie\\_po\\_faktitcheskomu\\_so\\_stoyaniyu.html](http://www.systematic.ru/tehnitcheskoe_obs_luzhivanie_po_faktitcheskomu_so_stoyaniyu.html) (дата обращения: 13.02.2016).
142. Su Xinping, Wu Xueshen, Yang Chengyu, Xiao Hui, Yang Gang, Study on Fault Diagnosis for the Forklift Hydraulic System Based on Fuzzy Tree Analysis Method /Machine Tool & Hydraulics, Vol. 39, no. 17, 2011, p. 138-139.

**СПИСОК ПРИЛОЖЕНИЙ**

А Шкала проф. М.М. Протоद्याконова .....	125
Б Бланк «Степень влияния фактора на категорию отказа» .....	126
В Бланк «Степень принадлежности объекта к нечеткому множеству».....	127
Г Система критериев оценки эксперта .....	128
Д Справка о внедрении.....	129

## Приложение А

Таблица А.1 - Шкала проф. М.М. Протоद्याконова

Категория	Степень крепости	Порода	<i>f</i>
I	В высшей степени крепкие породы	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительные по крепости другие породы.	20
II	Очень крепкие породы	Очень крепкие гранитовые породы: кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец, менее крепкие, нежели указанные выше кварциты. Самые крепкие песчаники и известняки.	15
III	Крепкие породы	Гранит (плотный) и гранитовые породы. Очень крепкие песчаники и известняки. Кварцевые рудные жилы. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды.	10
IIIa	То же	Известняки (крепкие). Некрепкий гранит. Крепкие песчаники. Крепкий мрамор, доломит. Колчеданы. Обыкновенный песчаник.	8
IV	Довольно крепкие породы	Железные руды. Песчанистые сланцы.	6
IV	То же	Сланцевые песчаники	5
V	Средние породы	Крепкий глинистый сланец. Некрепкий глинистый сланец и известняк, мягкий конгломерат	4
		Разнообразные сланцы(некрепкие). Плотный мергель	3
VI	Довольно мягкие породы	Мягкий сланец, очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс. Мерзлый грунт: антрацит. Обыкновенный мергель. Разрушенный песчаник, сцементированная галька и хрящ, каменистый грунт	2
VIa	То же	Крепкий каменный уголь	1,5
VII	Мягкие породы	Глина (плотная). Мягкий каменный уголь, крепкий наносо-глинистый грунт	1

## Приложение Б

Бланк «Степень влияния фактора на категорию отказа»

Дата заполнения \_\_\_\_\_

ФИО эксперта \_\_\_\_\_

1. Оценка влияния факторов на вероятность появления категории отказа «Отказ насоса» - S1						
№	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка
1	Температура воды в двигателе		Температура воздуха		Выработанный ресурс ОКГЭ	
2	Температура масла		Запыленность воздуха		Выработанный ресурс насоса ГС ОКГЭ	
3	Давление масла в двигателе		Содержание влаги в воздухе		Выработанный ресурс приводов ГС ОКГЭ	
4	Давление в главном насосе		Крепость		Выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКГЭ	
5	Давление в контрольном контуре				Выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ	
6	Частота вращения двигателя				Выработанный ресурс линий трубопроводов ГС ОКГЭ	
7	Уровень масла					
8	Шум в насосе					
9	Расход масла					
10	Уровень загрязненности масла					

2. Оценка влияния факторов на вероятность появления категории отказа «Отказ гидравлического цилиндра» - S2						
№	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка	Фактор	Оценка
1	Температура воды в двигателе		Температура воздуха		Выработанный ресурс ОКГЭ	
2	Температура масла		Запыленность воздуха		Выработанный ресурс насоса ГС ОКГЭ	
3	Давление масла в двигателе		Содержание влаги в воздухе		Выработанный ресурс приводов ГС ОКГЭ	
4	Давление в главном насосе		Крепость		Выработанный ресурс бака хранения масла ГС ОКГЭ	
5	Давление в контрольном контуре				Выработанный ресурс клапанов ГС ОКГЭ	
6	Частота вращения двигателя				Выработанный ресурс линий трубопроводов ГС ОКГЭ	
7	Уровень масла					
8	Шум в насосе					
9	Расход масла					
10	Уровень загрязненности масла					

Рисунок Б.1 - Фрагмент бланка «Степень влияния фактора на категорию отказа»

## Приложение В

### Бланк «Степень принадлежности объекта к нечеткому множеству»

Дата заполнения

ФИО эксперта

## 1) Температура воды в двигателе

Термы	Диапазон									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
низкое										
среднее										
высокое										

## 2) Температура масла

Термы	Диапазон									
	0-15	15-30	30-45	45-60	60-85	85-100	100-115	115-130	130-145	145-150
низкое										
среднее										
высокое										

## 3) Давление масла в двигателе

Термы	Диапазон									
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
низкое										
среднее										
высокое										

## 4) Давление в главном насосе

Термы	Диапазон								
	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24	24-28	32-36	36-40
низкое									
среднее									
высокое									

## 5) Давление в контрольном контуре

Термы	Диапазон									
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
низкое										
среднее										
высокое										

Рисунок В.1 - Фрагмент бланка «Степень принадлежности объекта к нечеткому множеству»

## Приложение Г

Для оценки степени квалификации в данной предметной области была построена система критериев оценки. В эту систему вошли критерии: образование, должность, стаж работы с ОКГЭ, вовлеченность в проблемную область. Компетенция экспертов определена согласно системе критериев:

- Образование: Ученая степень (10 баллов), магистр (9 баллов), специалист (9 баллов), бакалавр (8 баллов), среднее (7 баллов).
- Количество публикаций: Более 5 (10 баллов), от 3 до 5 (9 баллов), от 1 до 2 (8 баллов) и нет (7 баллов).
- Стаж работы с ОКГЭ: более 20 лет (10 баллов), от 15 до 20 лет (9 баллов), от 10 до 15 (8 баллов) и от 5 до 10 (7 баллов).
- Вовлеченность в предметную область: постоянно (10 баллов), периодически (7 баллов) и редко (4 балла).

В качестве экспертов были приглашены три группы: персонал горнодобывающего предприятия ОАО «Раменский ГОК» и ОА «Богаевский карьер» и преподаватели кафедры «ГОТиМ» НИТУ МИСиС. По каждой группе экспертов посчитана общая оценка компетенции. Общая средняя оценка каждой группы достаточно высокая, что говорить о высокой вероятности получения достоверных результатов анализа.



## Приложение Д

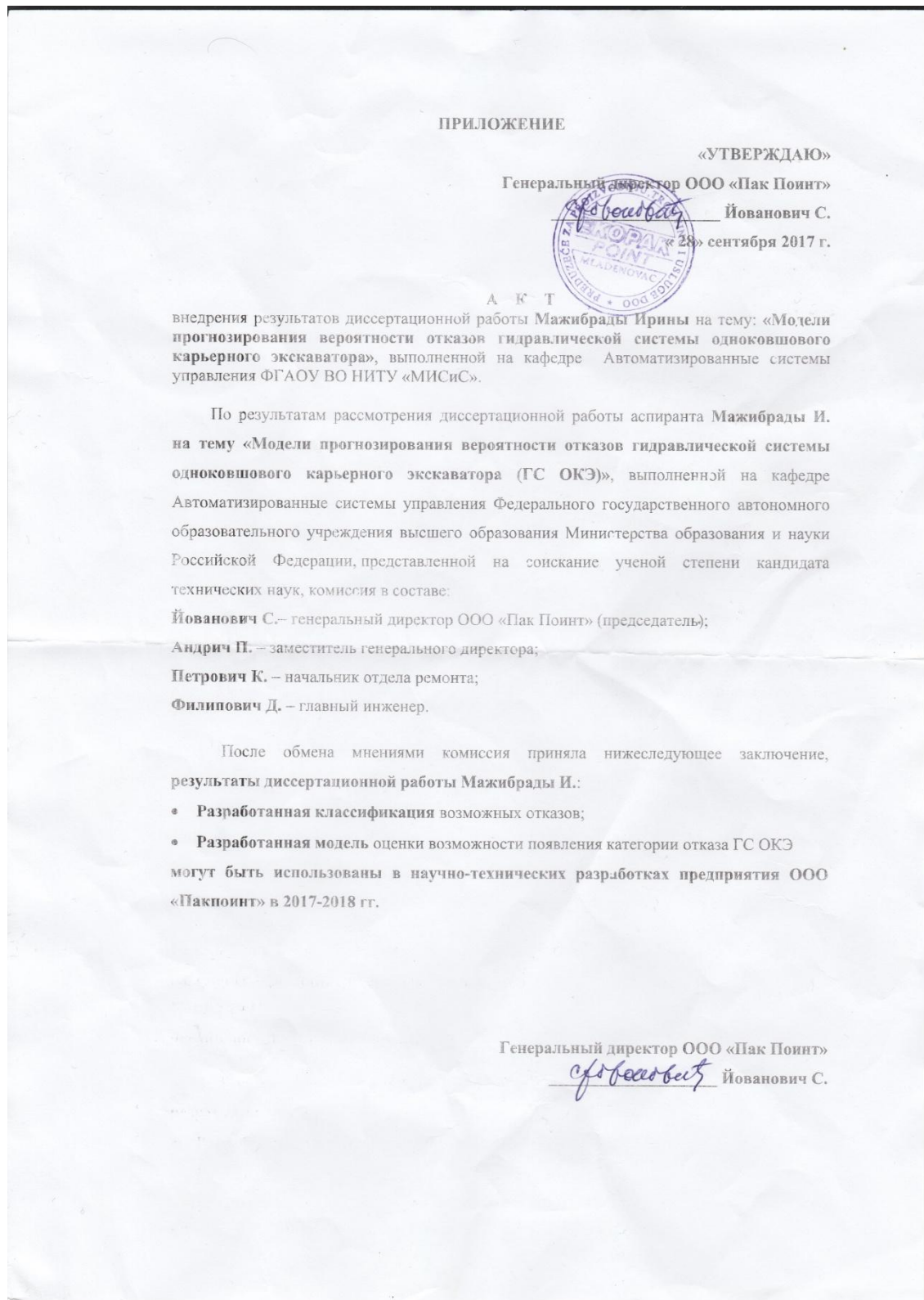


Рисунок В.1 - Справка о внедрении