

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

на правах рукописи

ИЛЬЯ ПАВЛОВИЧ СЕЛЕТКОВ
МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ (НА ПРИМЕРЕ
ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НЕФТЕДОБЫЧИ)

Специальность 05.13.01. – Системный анализ, управление и обработка
информации (технические и информационные системы)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Л.Н. Ясницкий

доктор физ.-мат. наук, профессор М.А. Марценюк

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Анализ предметной области обслуживания технологического оборудования добычи нефти и газа	15
1.1. Введение к главе 1	15
1.2. Краткое описание процесса обслуживания технологического оборудования нефтедобычи	15
1.3. Существующие в предметной области информационные системы	16
1.4. Типы технологического оборудования добычи нефти и газа.....	19
1.5. Обслуживание нефтедобывающих скважин с установленным центробежным насосом.....	21
1.6. Обслуживание нефтедобывающих скважин с установленным штанговым глубинным насосом	23
1.7. Анализ потоков данных при принятии решений по обслуживанию технологического оборудования.....	24
1.8. Выбор интеллектуальной модели	26
1.9. Требования к информационной системе	28
1.10. Выводы к главе 1.....	28
Глава 2. Матричное представление нечетких логических выводов.....	30
2.1. Введение к главе 2	30
2.2. Приложения нечеткой логики	32
2.3. Нечеткие комбинационные схемы в задачах управления	33
2.4. Нечеткие логические переменные	34
2.5. Операции над нечеткими переменными.....	38
2.6. Нечеткие множества	42

2.7. Нечеткие предикаты	44
2.8. Корреляция нечетких предикатов	51
2.9. Лингвистические переменные.....	52
2.10. Представление лингвистических переменных с использованием нечетких предикатов	53
2.11. Оценка степени неопределенности лингвистической переменной	54
2.12. Алгоритмы нечеткого вывода	54
2.13. Матричная реализация нечеткого логического вывода с использованием нечетких предикатов.....	61
2.14. Связь с «упрощенным» алгоритмом дефаззификации	63
2.15. Сравнение численной сложности алгоритмов	65
2.16. Транзитивность нечеткой импликации.....	67
2.17. Заключение к главе 2	68
Глава 3. Нечеткие логические автоматы.....	70
3.1. Введение к главе 3	70
3.2. Представление «четкого» автомата в виде модифицированной комбинационной схемы.....	71
3.3. Нечеткий автомат.....	75
3.4. Модифицированная нечеткая комбинационная схема	78
3.5. Построение модифицированной нечеткой комбинационной схемы по заданному нечеткому автомату с конечной памятью.....	80
3.6. Выводы к главе 3.....	82
Глава 4. Разработка и внедрение интеллектуальной системы поддержки принятия решений в процессе обслуживания технологического оборудования добычи нефти и газа.....	84

4.1. Проект информационной системы.....	84
4.2. Описание программы для ЭВМ «Мобильное рабочее место оператора (МИРМ оператора)».....	105
4.3. Внедрение интеллектуальной системы поддержки принятия решений	114
4.4. Выводы к главе 4.....	122
Основные результаты и выводы.....	123
Список сокращений и условных обозначений	125
Список литературы	127
Приложение А	136
Приложение Б.....	137
Приложение В	138
Приложение Г.....	140

Введение

Актуальность темы

В настоящее время в соответствии с указом президента РФ одним из приоритетных направлений научно-технологического развития РФ является «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта» [1].

С целью реализации этой стратегии во многих отраслях промышленности внедряются системы поддержки принятия решений (СППР) при осуществлении технологических процессов. В частности, такие системы высоко востребованы в процессах обслуживания и управления нефтегазодобывающими скважинами.

Значительная часть месторождений углеводородов обладает малой степенью автоматизации процессов сбора данных и управления, вызванной высокой пространственной распределенностью объектов добычи и низкой степенью их покрытия сетями телекоммуникаций [2]. В связи с этим наблюдается широкое использование ручного труда для осуществления обходов, сбора параметров, изменения режимов работы технологического оборудования. При этом отсутствие связи вынуждает в случае возникновения отклонений текущих значений параметров от плановых величин, либо принимать управленческие решения на месте оператором (обходчиком), который обладает низкими компетенциями и не обладает знаниями о истории и режимах работы всех смежных скважин, либо передавать информацию лично в технологическую службу, что подразумевает большие задержки в цепи управления.

Кроме того, современные нефтедобывающие скважины являются высокотехнологичными объектами, представляющими собой трудно формализуемые сложные системы, состоящие из большого числа взаимодействующих компонентов. Для построения эффективных алгоритмов управления и процедур обслуживания таких систем приходится прибегать к

использованию новых языков и методов моделирования, способных охватить сложность, сделать ее описание и алгоритмизацию простой.

Одним из таких математических аппаратов является предложенная Л. А. Заде нечеткая логика [3–6]. Этот аппарат позволяет моделировать человеческие рассуждения и строить алгоритмы управления сложными системами на языке высокого уровня. Применение методов нечеткой логики для построения систем поддержки принятия решений операторов при обслуживании скважин целесообразно еще и потому, что опыт управления в настоящий момент накоплен в виде знаний экспертов-технологов и может быть сформулирован в виде набора правил на естественном языке.

Научным руководителем автора, профессором М. А. Марценюком предложено и математически обосновано возможность представления нечетких логических операций и нечеткого логического вывода в виде векторов и матриц [7]. Преимуществом такого представления является возможность определения области значений входных параметров, при которых заключение о значениях результирующих параметров не соответствует ни одному из исходных правил эксперта. Помимо этого, устраняется проблема выбора моделей теоретико-множественных операций. Эти обстоятельства определили выбор используемого математического аппарата в настоящем исследовании. Однако, на момент начала диссертационной работы, отсутствовал способ применения данного подхода для решения прикладных задач управления и принятия решений в технических и организационно-технических системах.

Высокая значимость нефтедобывающей отрасли для экономики страны и необходимость адаптации матричного аппарата нечеткой логики определили **актуальность** разработки специальных методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений в задаче обслуживания технологического оборудования нефтедобычи.

Степень разработанности темы исследования в части существующих информационных систем. В исследуемой предметной области уже существуют информационные системы класса АСУ ТП для удаленного сбора параметров

работы оборудования и управления им (например, iWell B-1336), системы хранения и автоматизированной отчетности (например, АСОДУ, Honey well, Wonderware Historian), системы класса ТОРО для управления ремонтами (SAP, OIS), системы для планирования технологических режимов работы (OIS), система для моделирования режимов скребкования скважин (НОЦ ПНИПУ). Но все перечисленные системы не обеспечивают процесс обслуживания оборудования в условиях отсутствия связи. Конкурирующая система для автономного обслуживания оборудования НОЦ ПНИПУ только начинает развиваться, что свидетельствует об актуальности данной темы.

Одним из способов реализации автономной системы поддержки принятия решений является применение аппарата нечеткой логики. Однако информационных систем, работающих на базе аппарата нечеткой логики, пока не существует. Причину отсутствия таких систем мы видим в том, что математический аппарат нечеткой логики является сравнительно новым и недостаточно развитым.

Степень разработанности темы исследования в части математического аппарата. В развитие аппарата нечеткой логики большой вклад внесли как зарубежные, так и российские ученые: Круглов В.В.[8], Борисов В.В.[9], Хижняков Ю.Н.[10], Кудинов Ю.И., Мелихов А.Н., Поспелов Д.А., Новиков Д.А., Мамдани М. [11], Такаги-Сугено [12], Пегат А.[13; 14], Kumar S. [15], Chiu М.Н., Fatemeh F, Lee С.Н., Pandey А., Pandey К. К, Parhi D., Yang S.X., Zhu А. Широкое применение нечеткие алгоритмы нашли в задачах управления промышленными процессами, примеры описаны в [11; 15–18]. Разработано несколько вариантов реализации нечетких логических операций и основанных на них алгоритмов, а также способов получения информации с использованием нечетких систем [5; 11; 12; 19; 20].

Однако, при использовании аппарата нечеткой логики разработчик встречается с необходимостью выбора моделей нечетких логических операций – конъюнкции, дизъюнкции, импликации. В литературе предложено большое количество моделей этих операций (например, перечень есть в [10; 13; 21]), но

все они выбраны из эмпирических соображений, что затрудняет построение алгоритмов решений конкретных прикладных задач, в частности, задачи автоматизации процесса обслуживания скважин.

В связи с этим существует необходимость разработки нового, более обоснованного представления операций нечеткой логики, а также новых моделей алгоритмов нечеткого вывода, направленных на упрощение реализации, повышение быстродействия, расширение области применения.

Для формирования адекватных решений в нечеткой СППР при обслуживании скважин требуется анализ истории изменения параметров работы скважин. Для этого хорошо подходят нечеткие автоматы [22–24]. Но при построении таких систем, кроме описанных выше проблем нечетких моделей, здесь добавляются проблемы формализации понятия нечеткого состояния автомата, минимизации числа состояний автомата и нечеткого описание переходов между состояниями автомата [25]. Это обстоятельство также вызывает дополнительные затруднения у экспертов и разработчиков СППР, в частности СППР для обслуживания технологического оборудования добычи нефти и газа. Таким образом, актуальным является совершенствование нечетких алгоритмов и их применение для автоматизации процесса обслуживания технологического оборудования нефтедобычи.

Объект исследования: системы поддержки принятия решений на основе нечетких алгоритмов.

Предмет исследования: матричное представление нечеткой логики и алгоритмы нечеткого вывода.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности и применимости матричного представления алгоритмов нечеткого вывода.

Основные задачи исследования

1. Разработать способ формализации лингвистических правил для возможности применения матричного представления нечеткого логического вывода.

2. Адаптировать матричное представление нечеткого логического вывода для решения прикладных задач принятия решений.
3. Предложить метод обработки ретроспективной информации с использованием матричного представления нечеткой логики без оценки нечеткого состояния объекта управления.

Положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной:

1. Предложен способ формализации лингвистических правил, отличающийся использованием нечетких векторных предикатов, позволяющий численно обрабатывать эти правила с применением матричного аппарата нечеткой логики (*п.13 «Методы получения, анализа и обработки экспертной информации» паспорта специальности 05.13.01*).
2. Предложена матричная реализация алгоритма нечеткого логического вывода, отличающаяся использованием векторных нечетких предикатов, применимая для решения любых прикладных задач принятия решений (*п.2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» паспорта специальности 05.13.01*).
3. Предложена алгоритмическая модель работы нечеткого логического автомата с конечной памятью, отличающаяся использованием для вычислений модифицированной нечеткой комбинационной схемы, анализирующей внешний блок памяти, и матричного представления нечеткого логического вывода, позволяющая избежать оценки трудно формализуемого нечеткого состояния анализируемого объекта (*п.4. «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» паспорта специальности 05.13.01*).

Теоретическая значимость работы заключается в

- развитии матричного аппарата нечеткой логики;

- разработке новых алгоритмических моделей интеллектуальной обработки текущей и ретроспективной информации и поддержки принятия решений;
- разработке новых моделей представления экспертных знаний.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования процессов обслуживания широкого набора промышленного оборудования.

Практическая значимость работы:

Математическое обоснование моделей нечетких логических операций позволит сократить трудоемкость выбора и построения нечетких алгоритмов при решении конкретных прикладных задач управления и принятия решений.

Алгоритмы нечеткого логического вывода с использованием векторных предикатов позволят применить матричное представление нечеткой логики для решения прикладных задач, в т.ч. поддержки принятия решений, что, в свою очередь, позволит сделать управление и принимаемые решения более адекватными и точно соответствующими знаниям экспертов.

Алгоритмическая модель работы нечеткого автомата с памятью позволит строить интеллектуальные системы управления на основе текущей, ретроспективной и, одновременно, экспертной информации.

Разработанная система поддержки принятия решений, реализованная в виде ПО для мобильных устройств «Мобильное информационное рабочее место оператора (МИРМ Оператора)» позволила сократить время выработки оператором и повысить качество и адекватность управляющих воздействий на технологическое оборудование ДНГ. В свою очередь это позволило на пилотном проекте внедрения на 588 скважинах ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

- повысить коэффициент эксплуатации добывающих скважин на 1%;
- снизить количество недоборов нефти по непредвиденным причинам на 50%;
- повысить производительность труда операторов на 10%.

Научные и практические результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе кафедры «Компьютерных систем и телекоммуникаций» ПГНИУ в рамках дисциплины «Искусственный интеллект (для физиков)» и кафедры «Прикладной математики и информатики» ПГНИУ в рамках дисциплины «Методы искусственного интеллекта».

Методы исследований основаны на использовании положений теории систем, теории нечетких множеств, теории управления, теории принятия решений, теории экспертных систем, а также методов моделирования с помощью имитации и объектно-ориентированного программирования.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается результатами ручной проверки соответствия результатов заложенным правилам, внедрением разработанных методов, моделей, алгоритмов в составе системы «МИРМ» в рамках пилотного проекта в процесс обслуживания технологического оборудования добычи нефти и газа ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

Апробация результатов. По теме диссертации сделаны следующие доклады:

1. На конференции «Актуальные проблемы механики, математики, информатики» (ПГНИУ, Пермь, 2012 г.);
2. На конференции «Современные системы искусственного интеллекта и их приложения в науке» (Казань, 2013 г.);
3. На конференции «Современные проблемы математики и ее прикладные аспекты» (ПГНИУ, Пермь, 2013 г.);
4. На конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование VIII» (МГУ, 2013 г.);
5. На конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование IX» (МГУ, 2014 г.);
6. На конференции «Преподавание информационных технологий в Российской Федерации XIII» (ПГНИУ, Пермь, 2015 г.);
7. На конференции «Физика для Пермского края VIII» (ПГНИУ, Пермь, 2015 г.);

8. На конференции «XXIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов математическое моделирование в естественных науках», (ПНИПУ, Пермь, 7-10 октября 2015 г.);
9. На Пермском городском гидродинамическом семинаре (ПГНИУ, Пермь, 16 сентября 2016 г.);
10. На ряде научных семинаров на кафедрах «компьютерных систем и телекоммуникаций» (ПГНИУ), «автоматики и телемеханики» (ПНИПУ), «математического моделирования систем и процессов» (ПНИПУ), Пермь, 2012 - 2019 гг.);
11. На международной конференции «The 2018 International Conference on Digital Science DSIC18 (Будва, Черногория, 19 – 21 октября, 2018 г.);
12. На IV всероссийской научно-практической конференции «Искусственный интеллект в решении актуальных социально-экономических проблем XXI века» (ПГНИУ, Пермь, 21-23 мая 2019 г.);
13. На XVIII всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (МГППУ, 17 марта 2020 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных и приравненных к ним работ, в том числе: 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 статьи в журналах, входящих в Перечень рекомендованных ВАК РФ, из них 1 – в издании, индексируемом в базе Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 87 наименований и четырех приложений. Общий объем работы составляет 141 страницу, из которых 135 страниц занимает основной текст диссертации, включающий 35 рисунков, 18 таблиц.

В главе 1 дан обзор предметной области процесса обслуживания технологического оборудования ДНГ: описание процесса обслуживания, виды технологического оборудования, существующие информационные системы.

Для повышения эффективности разработки предложено сконцентрировать усилия на работе только с определенными типами оборудования – УЭЦН, УШГН – в связи с тем, что они обладают пространственной распределенностью и высокой сложностью, обеспечивают наибольшую долю добываемой нефти, а также имеет наибольшую численность.

Среди существующих информационных систем выбраны те, с которыми необходима интеграция в процессе обслуживания, выбраны данные для обмена, намечены пути интеграции.

Показано, что существующие источники данных о фактическом выполнении работ по обслуживанию – сменные журналы и журналы выполненных операций – ведутся на бумажных носителях, в связи с чем их использование для обучения популярных нейросетевых интеллектуальных моделей затруднительно. Предложено решать задачу с помощью аппарата нечеткой логики, для чего можно использовать знания экспертов в виде набора логических правил.

В конце главы произведена постановка задачи автоматизации, сформулированы требования к разрабатываемой системе.

В главе 2 дан аналитический обзор существующих «классических» методов нечеткой логики и предлагаемого в [7; 26] матричного подхода. Указываются недостатки и преимущества подходов. Производится развитие матричного подхода нечеткой логики. Нечеткие множества, необходимые для нечеткого вывода, описываются с помощью понятия нечеткого предиката, предложенного в [27]. Вводятся модели матричных операций для нечетких предикатов. Предлагается представление нечеткого вывода с использованием предикатов в виде решения матричной системы линейных уравнений. Описываются условия существования решения. Демонстрируется возможность учета нечеткости логических правил и возможность прямого применения метода резолюции.

В главе 3 вводится матричная модель нечеткого автомата. На традиционных для автоматов задачах управления [28; 29] демонстрируются преимущества использования матричного подхода при построении автоматов.

Демонстрируется, что в случае, когда нечеткий автомат обладает конечной памятью, он может быть сведен к модифицированной нечеткой комбинационной схеме с явно выделенным блоком памяти. Формулируются условия (ограничения), при которых нечеткий автомат может быть сведен к комбинационной схеме. Обсуждаются преимущества предложенной модели, в частности пропадает необходимость введения понятия состояний и их описания. Ставятся проблемы дальнейшего расширения метода.

В главе 4 показан процесс проектирования и разработки ПО «МИРМ», в которое внедряются описанные выше модели, методы и алгоритмы. Затем описан пилотный проект использования разработанного ПО «МИРМ» на технологическом оборудовании ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», произведена оценка эффективности работы ПО «МИРМ» в части поддержки принятия решений по обслуживанию технологического оборудования ДНГ.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА

1.1. Введение к главе 1

Предметная область представляет собой производственный процесс добычи нефти, попутного газа и природного газа, их сбор, учет, сепарацию и транспортировку до магистральных трубопроводов. На всех этапах выполнения этого процесса используются специфические технологическое оборудование и информационные системы. В настоящей главе дано описание бизнес-процесса, используемого оборудования и существующих информационных систем. Выявлены проблемы, возникающие в процессе обслуживания оборудования. В конце главы, на основании выполненного анализа, сформулированы требования к проектируемой интеллектуальной системе поддержки принятия решений.

Все описание сделано на примере ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», в котором выполнен пилотный проект внедрения проектируемой системы.

1.2. Краткое описание процесса обслуживания технологического оборудования нефтедобычи

Процесс добычи нефти и газа состоит из трех основных этапов.

1. Разработка месторождения – это комплекс мероприятий, направленных на обеспечение притока нефти и газа из залежи к забою скважин [30].
2. Эксплуатация скважин – это комплекс мероприятий по подъему нефти и газа от забоя скважин на поверхность, к устью. Для этого используется насосное оборудование (ЭЦН, ШГН и т.д.), нагревательное оборудование и т.д.
3. Сбор продукции скважин и подготовка нефти и газа – это комплекс мероприятий по сбору, предварительной фильтрации и

транспортировке нефти и газа до потребителей или для дальнейшей переработки. Основное используемое оборудование – трубопроводы, АГЗУ, ДНС.

В связи с пространственным распределением технологического оборудования нефтедобычи, его обслуживание требует выполнения периодических обходов. Специалисты, выполняющие обходы называются операторами, а специалисты, выполняющие непосредственное руководство и принятие оперативных решений – мастерами.

Обходы выполняются периодически по расписанию, 1-2 раза в сутки.

На конкретной скважине операторы производят визуальный осмотр оборудования, записывают в блокнот параметры работы оборудования, выявленные отклонения в работе оборудования, нарушения со стороны обслуживающих подрядных организаций, выполняют операции обслуживания – запуск, остановку, скребкование, чистку и т.д.

На территории некоторых месторождений может полностью отсутствовать связь, поэтому операторы вынуждены либо самостоятельно принимать решения по выполнению операций обслуживания, либо возвращаться к месту, где есть мобильная связь, для обсуждения ситуации с мастерами.

В конце обхода операторы заполняют бумажные журналы, в которые заносят из блокнота значения параметров работы оборудования и информацию о выполнении операций обслуживания.

1.3. Существующие в предметной области информационные системы

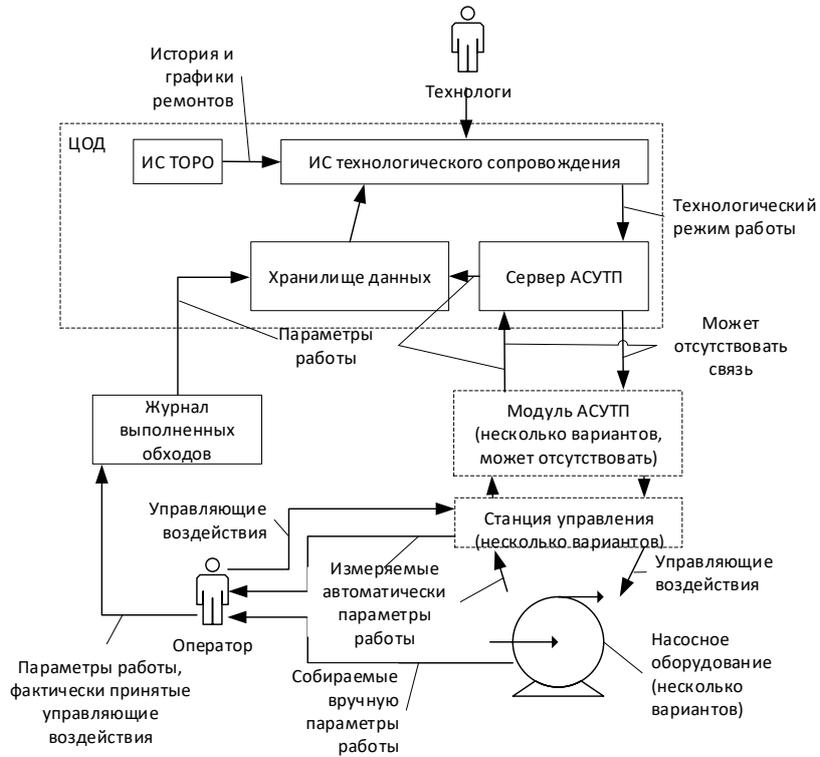
Одной из специфических особенностей процесса нефтедобычи является высокая пространственная распределенность месторождений, и, следовательно, технологического оборудования. Управление большим количеством распределенного оборудования без использования информационных технологий потребовало бы очень больших затрат. Поэтому с момента появления информационных технологий и по настоящее время происходит активная

автоматизация и информатизация отрасли нефтедобычи. Уже накоплен большой опыт построения и эксплуатации специализированных систем. Среди информационных систем, которые в данный момент активно эксплуатируются ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» можно отметить следующие [31].

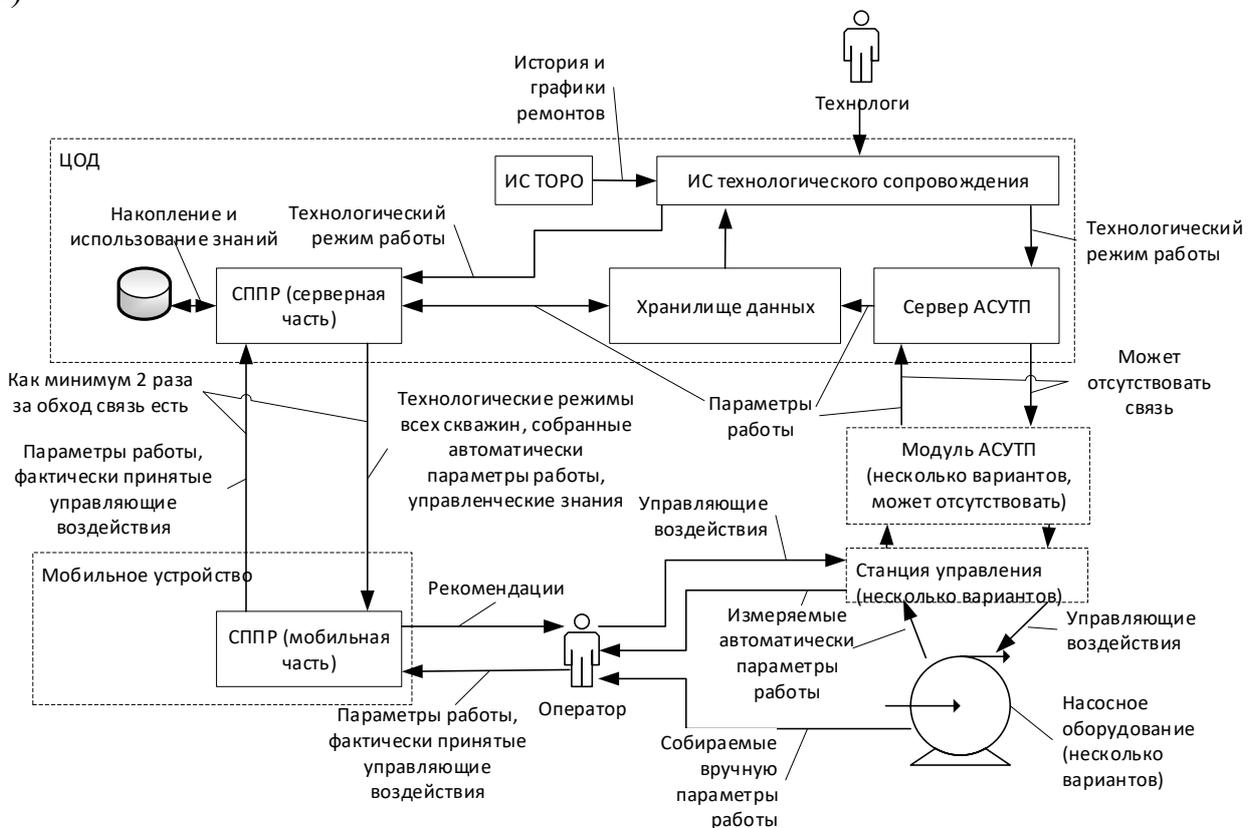
- Системы для удаленного сбора параметров работы и управления оборудованием (АСУТП) – «iWell» производителя В-1336.
- Диспетчерские системы (АСОДУ) – от производителя Honeywell, «Диспетчерский WEB-Портал» от Wonderware.
- Системы планирования ремонтных работ (ТОРО, ТОиР) – «SAP ТОРО», «OIS Ремонты».
- Системы интегрированного планирования, например, OIS «iField», которые позволяют, в частности, рассчитывать оптимальные режимы работы установок – периодичность запуска, глубину спуска насоса и т.п.
- Гидродинамические модели пластов от производителя ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (филиал «ПермНИПИнефть»), позволяющие готовить данные для расчета режимов работы.
- Модели работы скважин, например, «инженерный симулятор» от НОЦ ПНИПУ.

Все перечисленные информационные системы не обеспечивают процесс обслуживания оборудования в условиях полного или частичного отсутствия связи на месторождениях.

Для реализации новой информационной системы, позволяющей автоматизировать процесс обслуживания, необходимо понять ее место в общем ландшафте систем, необходимые информационные ресурсы, предоставляемые смежными системами, способы интеграции с ними. Основные значимые потоки данных в процессе обслуживания без использования мобильных систем поддержки операторов приведены на рисунке 1.а) и с использованием системы для автоматизации работы операторов на рисунке 1.б).



а)



б)

Рисунок 1 – Информационные системы и потоки данных в процессе обслуживания технологического оборудования ДНГ а) без использования систем автоматизации работы операторов и б) с использованием системы автоматизации работы операторов

Из схем видно, что система автоматизации процессов обслуживания технологического оборудования должна иметь мобильную и серверную часть и иметь возможность интегрироваться с локальными компонентами систем АСУТП, серверными компонентами систем хранения истории значений показателей, систем планирования технологических режимов работы оборудования, систем диспетчерского управления.

1.4. Типы технологического оборудования добычи нефти и газа

Основные типы технологического оборудования, используемые в процессе добычи нефти и газа, приведены на рисунке 2.

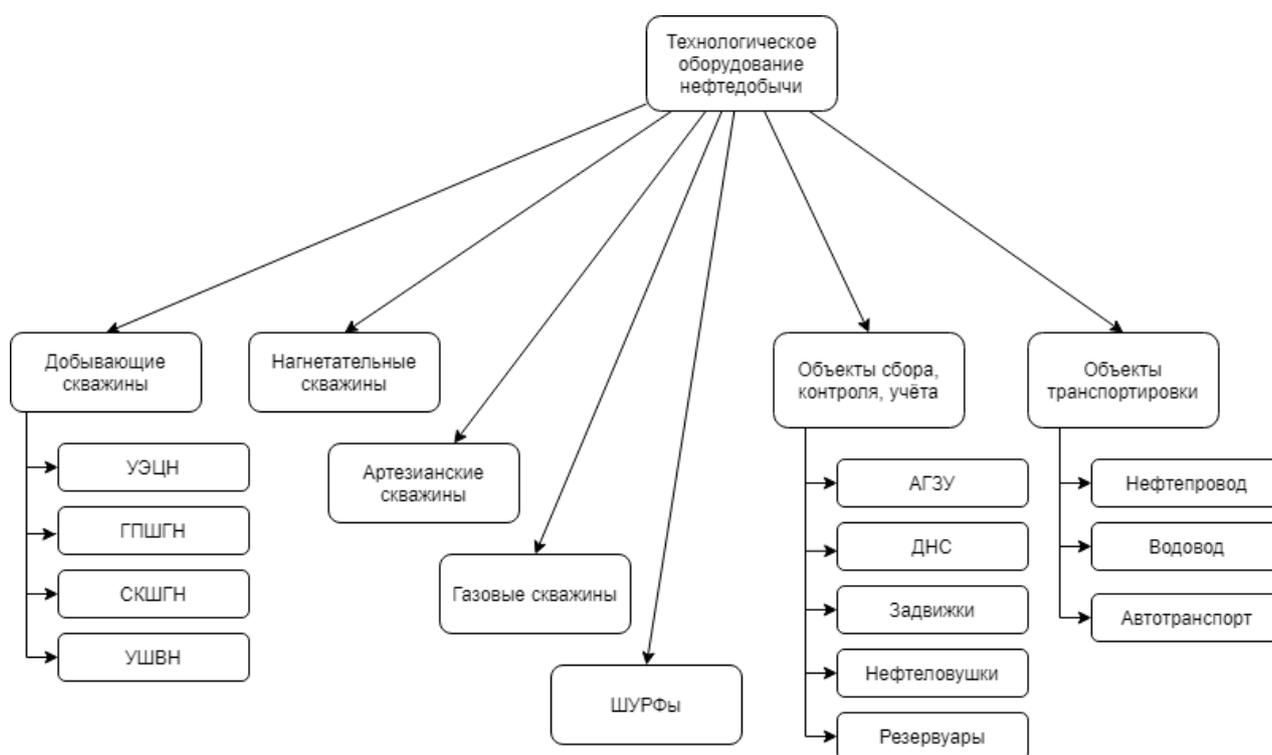


Рисунок 2 – Типы технологического оборудования нефтедобычи

Система для автоматизации обслуживания всего возможного оборудования, в виду его разнообразия, будет очень сложной в реализации. Для повышения эффективности разработки необходимо (на первом этапе) ограничиться обслуживанием конкретного вида оборудования, но при этом выбрать такое вид оборудования, где автоматизация обслуживания будет наиболее эффективной.

Из перечисленного на рисунке 2 оборудования высоким пространственным распределением отличаются скважины, АГЗУ, задвижки, трубопроводы. А из них, в свою очередь, наибольшей сложностью в обслуживании отличаются добывающие скважины.

Рассмотрим вклады всех видов насосного оборудования в добычу нефти ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» [32], рисунок 3. Из рисунка видно, что наибольшее количество нефти добывается с помощью скважин, оборудованных центробежным насосом, а на втором месте – штанговым насосом. Доли винтовых насосов, фонтанов и прочих видов незначительны.

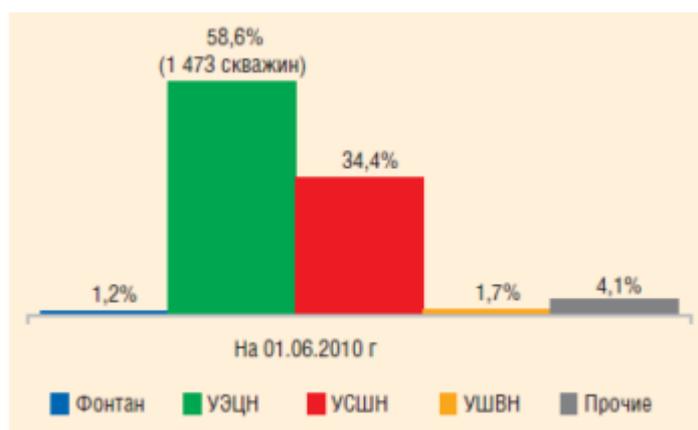


Рисунок 3 – Распределение добываемой нефти ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» по типам насосов

Рассмотрим статистику по количеству установок в разрезе видов насосного оборудования [33], таблица 1. Из таблицы видно, что наиболее часто используемым типом насосного оборудования является штанговый глубинный насос, а затем – центробежный насос.

Таблица 1 – Статистика использования основных типов насосного оборудования ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

Тип насоса	2015 г., шт.	2016 г., шт.	Изменение, %
Всего	6638	6748	2
УЭЦН	2038	2113	4
УШГН	4148	4273	3
Винтовые	298	276	-7
Прочие	154	86	-44

Из вышесказанного можно сделать вывод, что максимальной эффективности от разработки системы автоматизации обслуживания можно достичь, если в первую очередь реализовать модели для УЭЦН и УШГН.

1.5. Обслуживание нефтедобывающих скважин с установленным центробежным насосом

Как уже говорилось выше, процесс обслуживания одной скважины состоит из нескольких этапов: визуальный осмотр оборудования и прилегающей территории, занесение параметров работы (в блокнот или в проектируемое мобильное приложение), выполнение операций обслуживания (запуск, остановка, скребкование, чистки, перевязки и т.д.), контроль работы подрядных организаций.

Результаты осмотра, текущие значения параметров работы, собранные на месте, а также история изменения параметров и плановые значения используются при выборе необходимых операций обслуживания.

Все параметры работы УЭЦН, значения которых используются при принятии решения о необходимости выполнения тех или иных операций обслуживания приведены в базе данных режимов работы оборудования для ПО «МИРМ Оператора» [34], основные из них с единицами и способами измерения перечислены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры работы технологического оборудования ДНГ-ЭЦН, используемые при принятии решений при обслуживании

Наименование параметра	Единицы измерения	Область значений	Способ измерения
Состояние скважины		Работает или остановлена	Автоматически/ вручную
Нагрузка, ПЭД	Ампер	[5;35]	Автоматически
Загрузка, ПЭД	%	[0;120]	Автоматически
Частота, ПЭД	Гц	[0;60]	Автоматически
Напряжение на СУ	В	[0;500]	Автоматически
Давление буферное	МПа	[0;8]	Автоматически/ вручную
Давление линейное	МПа	[0;4]	Вручную

Давление затрубное	МПа	[0;10]	Автоматически/ вручную
Давление на приеме	МПа	[0;10]	Автоматически/ вручную
Температура ПЭД	°С	[20;70]	Автоматически
Сопротивление изоляции	КОм	[0;9999]	Автоматически
Вибрация ПЭД	мм / с	[0;200]	Автоматически
Расход жидкости	м ³ / ч	[0;200]	Расчет
Работа УОК НКТ		Есть или нет отклонения	Автоматически
Глубина спуска скребка	м	[0;12000]	Автоматически
Пропарка АГЗУ		Проводилась или нет	Загрузка с сервера
Ревизия АГЗУ		Проводилась или нет	Загрузка с сервера

В таблице 2 автоматический способ измерения означает измерение данных с помощью локальных систем АСУТП, например, станции управления скважиной, а расчет – вычисление одних параметров на основании значений других.

Все основные операции обслуживания, которые выполняет оператор на скважинах типа УЭЦН, перечислены в базе данных режимов работы оборудования для ПО «МИРМ Оператора» [34], и в таблице 3.

Таблица 3 – Возможные действия при обслуживании технологического оборудования ДНГ-ЭЦН

Наименование	Комментарии
Пропарка АГЗУ	Позволяет повысить пропускную способность нефтепровода после установки с насосом
Ревизия АГЗУ	Позволяет выявить проблемы нефтепровода после установки с насосом, выполняется, если пропарка не помогла.
Опрессовка НКТ	Позволяет выявить проблемы в трубопроводах
Встряхивание установки ЭЦН изменением частоты	Изменение скорости потока нефти позволяет частично устранить накопления парафинов трубах
Встряхивание вращением	Изменение скорости потока нефти позволяет частично устранить накопления парафинов трубах
Встряхивание частотой и вращением	Изменение скорости потока нефти позволяет частично устранить накопления парафинов трубах
Подача заявки на устранение проблем с напряжением	Позволяет продлить срок бесперебойной работы оборудования
Пропарка нефтепровода	Позволяет повысить пропускную способность нефтепровода после установки с насосом

Чистка штангера	Позволяет повысить пропускную способность нефтепровода после установки с насосом
Обход нефтепровода, поиск прорыва	
Ревизия/пропарка обратного клапана АФК	Позволяет повысить пропускную способность нефтепровода после установки с насосом
Ревизия/замена обратного клапана АФК	Позволяет повысить пропускную способность нефтепровода после установки с насосом
Сообщение в технологическую службу для принятия решения о промывке скважины	Позволяет повысить пропускную способность нефтепроводов
Подача заявки на измерение сопротивления и замену изоляции	Позволяет продлить срок бесперебойной работы оборудования

1.6. Обслуживание нефтедобывающих скважин с установленным штанговым глубинным насосом

Процесс обслуживания скважин с штанговым глубинным насосом состоит из тех же основных этапов, что и обслуживание УЭЦН. Отличия заключаются в параметрах работы и необходимых операциях обслуживания. Также необходимо отметить, что установки ШГН могут иметь 2 типа привода: гидравлический привод (ГПШГН) и станок-качалку (СКШГН), которые также отличаются друг от друга некоторыми параметрами работы.

В таблице 4 приведены мгновенные параметры работы ГПШГН, которые нужно использовать при выборе необходимых операций обслуживания [34].

Таблица 4 – Параметры работы технологического оборудования ДНГ-ГПШГН, используемые при принятии решений при обслуживании

Наименование параметра	Единицы измерения	Область значений	Способ измерения
Состояние скважины		Работает или остановлена	Автоматически/ вручную
Давление линейное	МПа	[0;4]	Вручную
Давление затрубное	МПа	[0;10]	Автоматически/ вручную
Нагрузка на штоке вниз	т	[0;10]	Автоматически
Нагрузка на штоке вверх	т	[0;10]	Автоматически
Давление в штоковой плоскости вниз	МПа	[0;8]	Автоматически

Давление в штоковой плоскости вверх	МПа	[0;8]	Автоматически
Температура масла	°C	[20;70]	Автоматически
Расход жидкости	$m^3 / ч$		Расчет
Пропарка АГЗУ		Проводилась или нет	Загрузка с сервера
Ревизия АГЗУ		Проводилась или нет	Загрузка с сервера

В таблице 5 приведены мгновенные параметры работы СКШГН, которые нужно использовать при выборе необходимых операций обслуживания [34].

Таблица 5 – Параметры работы технологического оборудования ДНГ-ГПШГН, используемые при принятии решений при обслуживании

Наименование параметра	Единицы измерения	Область значений	Способ измерения
Состояние скважины		Работает или остановлена	Автоматически/ вручную
Давление линейное	МПа	[0;4]	Вручную
Давление затрубное	МПа	[0;10]	Автоматически/ вручную
Расход жидкости	$m^3 / ч$		Расчет
Пропарка АГЗУ		Проводилась или нет	Загрузка с сервера
Ревизия АГЗУ		Проводилась или нет	Загрузка с сервера

1.7. Анализ потоков данных при принятии решений по обслуживанию технологического оборудования

Если проводить аналогию поставленной задачи с задачами из теории управления, то можно сказать, что операции обслуживания являются управляющими воздействиями. Для формирования адекватных управляющих воздействий необходимо анализировать не сами текущие значения параметров объекта управления, а отклонения их значений от целевых (уставок). Соответственно, в данной задаче кроме мгновенных значений параметров работы оборудования, приведенных в таблицах 2, 4, 5, необходимо использовать историю изменения этих параметров и их плановые значения.

Плановые значения параметров можно загрузить из систем моделирования работы скважин и расчетов технологических режимов – «OIS плюс». Историю изменения автоматически измеряемых параметров в части добычи нефти можно загрузить из систем хранения исторических данных –

Wonderware «Historian» и из БД SCADA и АСУТП систем. Значения собираемых вручную параметров необходимо хранить в оцифрованном виде и использовать уже на стороне проектируемой системы.

Для понимания технического состояния самого оборудования необходимо использовать историю и планы проведения ремонтов, которые по конкретной единице оборудования можно получить из систем SAP TOPO и «OIS Ремонты».

Для получения данных из всех перечисленных систем необходимо настроить каналы интеграции между витринами данных этих систем и серверной частью проектируемой системы. Для использования этих данных в условиях отсутствия связи необходимо выполнять их предварительную загрузку на мобильные устройства в момент начала обхода, или обновлять каждый раз, когда оператор находится в зоне связи.

Диаграмма в нотации «черный ящик» с описанием всех входных и выходных потоков проектируемой системы приведена на рисунке 4.

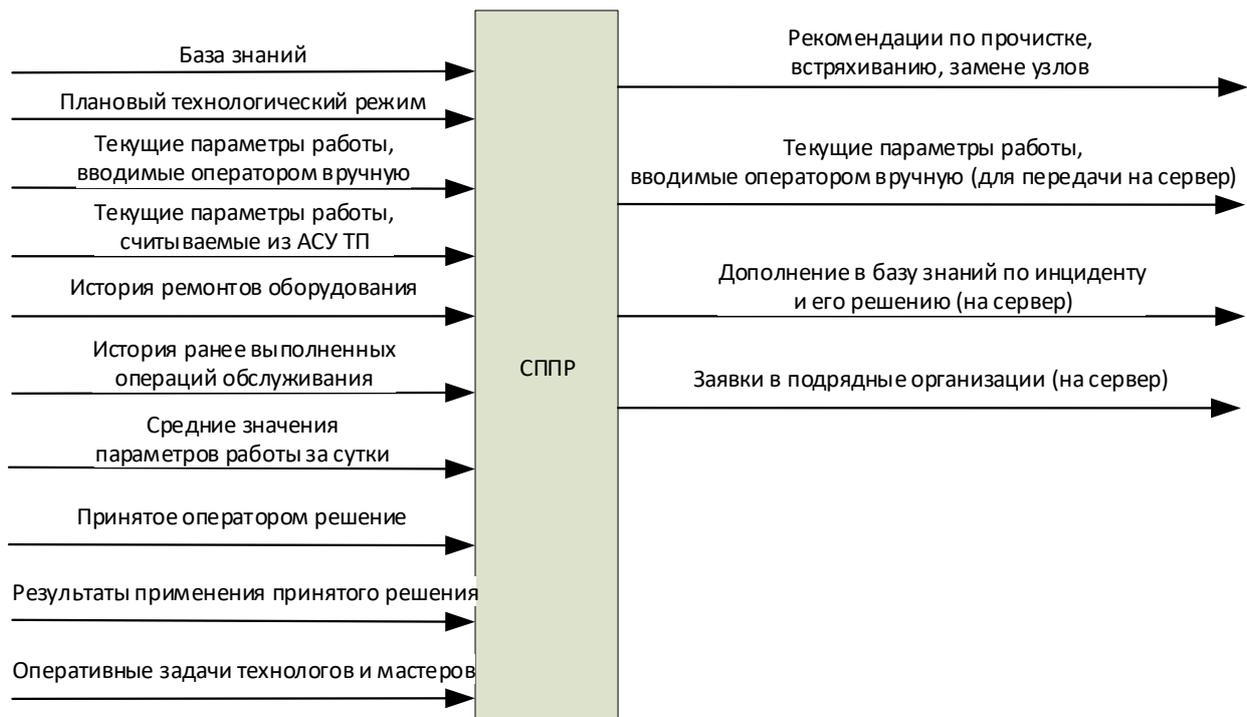


Рисунок 4 – Диаграмма входных и выходных потоков информации в СППР для обслуживания технологического оборудования ДНГ

1.8. Выбор интеллектуальной модели

Задача выбора необходимых операций обслуживания может быть интерпретирована как задачи классификации – соотнесения текущего состояния объекта (скважины) с одним или несколькими классами – возможными операциями обслуживания. Для решения задачи классификации существует большое количество разнообразных алгоритмов [35]. В качестве популярных примеров из них можно отметить нейронные сети и деревья решений. Но для всех перечисленных моделей в том или ином виде требуется обучающая выборка, содержащая оцифрованные данные о состоянии объекта (установки) и соответствующем классе (операции обслуживания).

Как отмечено в описании процесса обслуживания технологического оборудования в конце смены операторы вносят собранные вручную данные – фактические значения параметров работы, информацию о выполненных операциях и их результатах в бумажные журналы. В результате эти журналы содержат достаточно данных для обучения моделей, но не являются цифровыми. В связи с этим, для тренировки нейросетевых моделей или моделей с использованием деревьев решений, потребуется оцифровать большое количество бумажных журналов, что является весьма трудоемким процессом. Намного более простой способ получить знания о работе операторов на скважинах – провести опрос экспертов мастеров и технологов, которые также обладают всеми необходимыми знаниями.

Формулировка знаний экспертов в виде набора логических правил позволит с относительно небольшими трудозатратами использовать для решения данной задачи аппарат нечеткой логики. Но при этом останется проблема субъективности экспертных знаний. Одним из вариантов решения этой проблемы является усреднение знаний сразу нескольких экспертов, другим – дообучение в процессе работы.

В дальнейшем, в процессе эксплуатации СППР, реализованной с помощью нечеткой логики, можно собирать и накапливать данные о параметрах работы оборудования и выполненных операциях обслуживания сразу в

цифровом виде. Собранные данные позволят обучить другие интеллектуальные модели и построить гибридную каскадную модель для повышения объективности рекомендуемых к выполнению операций обслуживания.

1.9. Требования к информационной системе

По результатам проведенного анализа предметной области можно сформулировать следующие требования к проектируемой информационной системе:

- архитектура в виде серверной части и приложения для мобильных устройств на базе ОС Android;
- возможность автономной работы мобильного приложения, в т.ч. модуля поддержки принятия решений;
- интеграция серверной части системы с существующими информационными системами SAP TOPO, OIS «Ремонты», «OIS плюс», Wonderware «Historian», АСОДУ, iWell;
- интеграция приложения для мобильных устройств с локальными компонентами АСУТП iWell;
- возможность просмотра истории параметров работы, плановых значений параметров работы, выполненных и планируемых ремонтов;
- возможность ввода значений всех параметров работы оборудования;
- возможность ввода информации о выполнении операции обслуживания;
- накопление собранных данных в БД;
- возможность дообучения с использованием вновь получаемых данных, обратных отзывов от операторов;
- реализация интеллектуальной части СППР с помощью аппарата нечеткой логики.

1.10. Выводы к главе 1

На основании выполненного анализа предметной области выбраны типы оборудования, обслуживание которых в первую очередь требует применения интеллектуальных автоматизированных систем, составлен перечень смежных информационных систем и ресурсов, с которыми необходима интеграция, выбрана оптимальная интеллектуальная модель для выработки рекомендаций,

сформулированы требования к проектируемой информационной системе, намечены дальнейшие пути развития информационной системы.

ГЛАВА 2. МАТРИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ЛОГИЧЕСКИХ ВЫВОДОВ

2.1. Введение к главе 2

Классическая «четкая» логика является формальной основой для решения большого круга задач современной математики, вычислительных систем, а также широко применяется в повседневной жизни [36]. Однако, по мере расширения использования информационных технологий и ресурсов в промышленности и гуманитарной сфере все чаще возникают задачи по автоматизации систем, в которых принимает участие человек. Методы классической «четкой» логики в таких задачах приводят к «искусственной точности», что не всегда уместно. В 1965 г. Л. Заде ввел в работе [3] понятие нечетких множеств. Новый аппарат позволил формализовать лингвистические понятия [6], и правила, сформулированные на естественном языке [4; 5; 12; 19; 20; 37].

Для формализации процесса вывода новой информации из нечетких предпосылок были также введены понятия функции принадлежности, лингвистической переменной, нечеткого логического вывода. Построенный аппарат позволил решать широкий круг задач автоматизации систем, использующих знания человека.

Одновременно с этим построенный аппарат нечеткой логики обладает рядом недостатков, которые ограничивают его развитие и расширение круга решаемых задач: сложность реализации на ЭВМ, сложность проведения многоэтапного вывода (резолуции), сложность оценки степени нечеткости переменных и др.

Примечание. Далее в работе операции над нечеткими множествами, введенные Л. Заде в [3; 5], называются «классическими».

В работах [7; 38] М.А. Марценюк предложил использовать матричный аппарат для реализации логических операций над нечеткими множествами и

показал, что алгоритм нечеткого вывода для высказываний может быть реализован как решение матричной системы линейных уравнений с известными условиями существования решения.

Как показано в настоящей диссертационной работе (и опубликовано в [26; 31]), это дает ряд преимуществ перед традиционными алгоритмами. В частности, появляется возможность напрямую использовать метод резолюций, оценивать качество получаемых результатов. Также достигается более точное соответствие результата знаниям экспертов.

Рассмотрим основные элементы теории нечетких множеств на примере «классического» и матричного подхода и сравним их.

Основной особенностью «классических» подходов нечеткой логики является то, что в большинстве случаев для реализации нечетких логических операций над нечеткими множествами используются операции *min* и *max*. Например, предложенные Л. Заде [4] нечеткая конъюнкция и дизъюнкция: $x(u) \wedge y(v) = \min(\mu_x(u), \mu_y(v))$, $x(u) \vee y(v) = \max(\mu_x(u), \mu_y(v))$, где *u* и *v* принадлежат некоторым универсальным множествам из предметной области. Такие формулы хорошо подходят для вычислений по заданным логическим связям между входными и выходными параметрами, что и используется в подавляющем числе задач моделирования и управления (подробный обзор представлен в книге А. Пегата [14]). Но на практике также большое значение имеют задачи нечеткого логического вывода. В этом случае неизвестная величина фигурирует под знаком логической операции и требуется ее найти. Например, для правил вывода *modus ponens* вида «Если ... то...» $x \rightarrow y = z$ предполагается, что нам известны нечеткая предпосылка *x* и степень справедливости правила *z*, и требуется найти степень истинности следствия правила *y*. Эту задачу проблематично решить с помощью операций, предложенных Л. Заде. Также, в таком варианте нечеткого логического вывода явно используются нечеткие переменные, которые по смыслу не эквивалентны нечетким множествам.

Предложенный М.А. Марценюком в работе [7] матричный аппарат нечеткой логики подразумевает использование матричных моделей логических операций, естественным образом обобщающих их «четкие» прототипы на область нечетких переменных. Это позволяет свести задачи нечеткого логического вывода по высказываниям к решению системы линейных алгебраических уравнений с известными условиями существования и единственности решений [26].

2.2. Приложения нечеткой логики

Начало развития нечеткой логики было положено Л. Заде в 1965 в работе [3]. Однако появление и развитие в этот период компьютерных вычислительных устройств создавало мнение, что все задачи можно решить с помощью обычной двоичной логики, и нечеткая логика не получила широкого распространения [14].

В дальнейшем, в процессе развития и информатизации промышленных производств, стали возникать задачи, требующие использование знаний экспертов, которые оказывалось затруднительно решать только с помощью двоичной логики. Начали появляться первые промышленные решения с использованием нечеткой логики, например управление карусельной печью [11], управление котельными установками электростанций [18].

Следующим этапом развития нечеткой логики стало активное ее использование японскими инженерами. В качестве ярких примеров здесь можно назвать: управление поездами метрополитена в городе Сендай [39], автоматические автомобильные трансмиссии [40], управление положением считывающей головки в жестких дисках [41].

После бурного развития в Японии приложений нечеткой логики, она начала применяться в Европе, а затем повсеместно.

В это же время появляется еще одно направление способов обработки неточных данных – грубые множества [42]. Основное отличие заключается в том, что для задания множества вместо функции принадлежности используются

два набора элементов – элементы, которые точно принадлежат множеству, и элементы, которые «возможно» принадлежат данному множеству [43]. Наиболее яркой областью применения грубых множеств оказался поиск и извлечение данных (data mining) [44]. Также грубые множества применяются в гибридных интеллектуальных системах.

В настоящее время методы нечеткой логики широко применяются во многих областях человеческой деятельности. В частности, большое количество примеров описано в литературе: в промышленности – управление электрическими двигателями [15; 16]; на транспорте – управление транспортными потоками [17] и создание автопилотов [45; 46]; в медицине – [47; 48]; обработке изображений – [49]; экономике – [50; 51]; системах поддержки принятия решений [52] и многих других.

В последнее время активно начинает развиваться направление нечетких гибридных систем [53; 54], включающих в себя сразу несколько методов искусственного интеллекта, таких как, нечеткие экспертные системы, нейронные сети, нечеткие генетические алгоритмы и пр. Также прикладными направлениями нечеткой логики, вызвавшими большой интерес, становятся [55]:

- исследование нечетких баз данных, нечетких временных рядов;
- интеллектуальный анализ данных и текстов (Data and Text Mining);
- построение интеллектуальных информационных систем.

2.3. Нечеткие комбинационные схемы в задачах управления

Наиболее применимый на практике класс задач – управление некоторым объектом – подразумевает анализ изменений состояния объекта с течением времени и формирование соответствующего управляющего воздействия. Алгоритмы решения таких задач называются логическими автоматами [56]. В общем случае, автоматы анализируют историю изменения состояния управляемого объекта с течением времени и формируют соответствующий управляющий сигнал. Частным случаем автоматов являются комбинационные

схемы, которые формируют управляющее воздействие на основе данных только о текущем состоянии управляемого объекта.

Именно в таком виде чаще всего встречаются задачи нечеткого логического вывода. Правила вида «Если..., то...», описывающие непосредственную зависимость выходных параметров от входных, понятны экспертам и не вызывают затруднений при формулировке.

Кроме того, в большинстве практических задач требуется предварительное исследование и формализация предметной области. Необходимо рассмотреть будущую систему как «черный ящик», выделить входные и выходные параметры. Затем необходимо совместно с экспертами сформулировать правила, по которым будет функционировать система; формализовать все лингвистические термины, которые используются в текстовой формулировке правил. После чего уже можно, собственно, реализовывать численный нечеткий расчет.

2.4. Нечеткие логические переменные

2.4.1. Понятие о нечетких переменных в «классических» работах

В классической математической логике все переменные x, y, z, \dots могут принимать только два значения: «истина» $x=1$ и «ложь» $x=0$. Говорят, что такие переменные принадлежат бинарному множеству $\mathbb{B} = \{0, 1\}$ ($x, y, z \in \mathbb{B}$). Основными операциями алгебры логики над такими переменными являются отрицание $\neg x$, конъюнкция $x \wedge y$, дизъюнкция $x \vee y$, и импликация $x \rightarrow y$, которые задаются в таблице 6. Для двух переменных $x, y \in \mathbb{B}$ существует всего 16 операций, и все они могут быть выражены через конъюнкцию, дизъюнкцию и отрицание.

Таблица 6 – Табличное задание основных функций, использующихся в математической логике

x	y	$\neg x$	$x \wedge y$	$x \vee y$	$x \rightarrow y$
0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	1	1
1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	1	1

Но, как было отмечено выше, возникают случаи, когда нельзя точно судить о достоверности явления, которое характеризует переменная. В таких случаях необходимо использовать «нечеткие» логические переменные, которые могут принимать любые значения на отрезке $[0,1]$. Множество точек отрезка $[0,1]$ обозначают символом $F = [0,1]$ ($x, y, z \in F$).

Например, оценка справедливости утверждения «человек молодой в 20 лет» не может быть дана исключительно в терминах «справедливо» и «не справедливо». Корректнее будет сказать «выражение справедливо с некоторой степенью уверенности».

2.4.2. Векторное представление нечетких переменных

Как уже отмечалось, в матричном представлении нечеткой логики, предложенным М.А. Марценюком [7; 38] для описания достоверности явлений вместо нечетких переменных используются нечеткие векторы $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$. Если ввести базисные векторы $\mathbf{e}^{(0)}$ и $\mathbf{e}^{(1)}$, то нечеткий вектор \mathbf{x} может быть представлен в виде

$$\mathbf{x} = x_0 \mathbf{e}^{(0)} + x_1 \mathbf{e}^{(1)} \quad (1)$$

причем координаты вектора \mathbf{x} – числа x_0, x_1 – удовлетворяют условиям

$$0 \leq x_0, x_1 \leq 1. \quad (2)$$

т.е. принадлежат множеству $F = [0,1]$. Кроме того, они удовлетворяют условию нормировки

$$x_0 + x_1 = 1. \quad (3)$$

Компоненты нечеткого вектора описывают степень ложности ($x_0 \mathbf{e}^{(0)}$) и степень истинности ($x_1 \mathbf{e}^{(1)}$) явления.

Сами базисные векторы $\mathbf{e}^{(0)}$ и $\mathbf{e}^{(1)}$ описывают явления, обладающие достоверностью 0 и 1 соответственно.

В дальнейшем удобно использовать понятие пространства нечетких векторов \mathbb{V} , состоящее из всех возможных нечетких векторов $\mathbf{x} \in \mathbb{V}$. Размерность пространства \mathbb{V} равна двум: $\dim(\mathbb{V}) = 2$.

Векторы $\mathbf{e}^{(0)}$ и $\mathbf{e}^{(1)}$ образуют ортонормированный базис этого пространства. Любой нечеткий вектор может быть представлен в виде разложения по базису с помощью (1). Координаты нечеткого вектора \mathbf{x} – величины x_0, x_1 принадлежат введенному выше пространству \mathbb{F} , $x_0, x_1 \in \mathbb{F}$.

Условие нормировки (3) означает, что концы любого нечеткого вектора \mathbf{x} лежат на отрезке, соединяющем точки $(1, 0)$ и $(0, 1)$ (Отрезок АВ на рисунке 5).

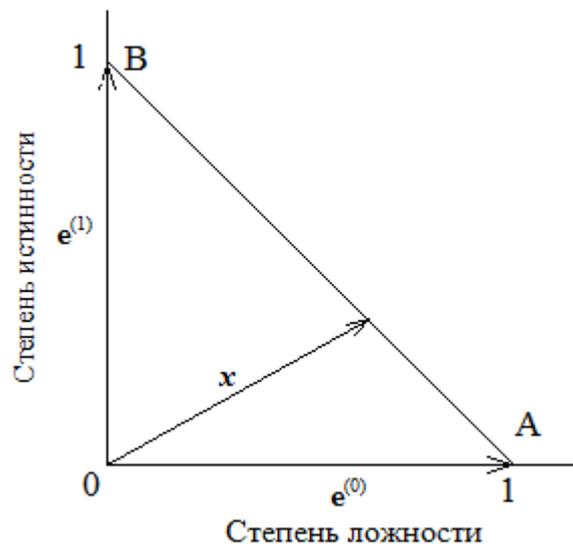


Рисунок 5 – Пространство нечетких векторов \mathbb{V} включает вектора, отложенные от начала координат и заканчивающиеся на отрезке АВ

Таким образом, пространство V образовано всеми векторами, начинающимися в начале координат (точке $(0, 0)$) и заканчивающимися на отрезке АВ. Отметим. Что в пределе четкой логики пространство V сводится к двум векторам $e^{(0)}$ и $e^{(1)}$.

2.4.3. Оценка степени нечеткости логических переменных

В «классической» нечеткой логике (по Л. Заде) оценка неопределенности явлений вызывает затруднения [57; 58]. Представление нечеткой переменной в векторном виде позволяет вычислять ее неопределенность с помощью известной формулы теории информации [7]:

$$S(\mathbf{x}) = -x_0 \log_2 x_0 - x_1 \log_2 x_1. \quad (4)$$

Функция $S(\mathbf{x})$ с учетом условия нормировки (3) может быть представлена как функция от x_1 :

$$S(\mathbf{x}) = S(x_1). \quad (5)$$

Зависимость (5) при выполнении условий (2) и (3) имеет следующий вид:

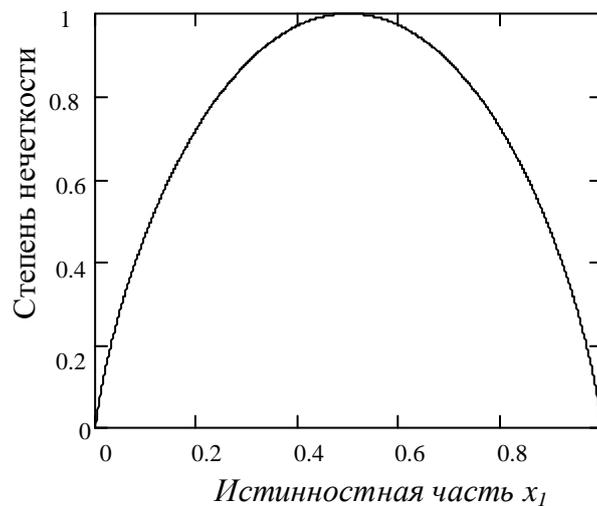


Рисунок 6 – Степень нечеткости векторной переменной \mathbf{x} в зависимости от истинностной части x_1

Из графика хорошо видно, что, как и должно быть, нечеткость явления становится максимальной, когда степень истинности и степень ложности равны друг другу.

Оценка степени нечеткости оказывается полезной при решении задач, в которых накладываются ограничения на достоверность результата. В процессе нечеткого вывода можно учитывать только такие результаты обработки логических правил, которые не превышают заданного предела нечеткости. Конкретные примеры показаны ниже.

2.5. Операции над нечеткими переменными

2.5.1. Реализация операций в «классических» работах

Операции над нечеткими переменными в работе [4] определяются следующим образом:

$$\neg x = 1 - x, \quad x \wedge y = \min(x, y), \quad x \vee y = \max(x, y). \quad (6)$$

Не сложно убедиться подстановкой, что в пределах четких аргументов значения этих операций совпадают со значениями логических операциями для четких переменных. Однако все предложенные в литературе на данный момент операции не имеют последовательного обоснования, в отличие, например, от предложенного в работе [7] при разработке матричного варианта нечеткой логики. Поэтому у пользователей вызывает затруднения реализация в области нечеткой логики всех других логических операций (кроме конъюнкции и дизъюнкции) и правил логического вывода.

2.5.2. Операции над нечеткими векторными переменными

Операции отрицания векторной переменной соответствует перестановка компонент вектора \mathbf{x} : $\neg \mathbf{x} = x_1 \mathbf{e}^{(0)} + x_0 \mathbf{e}^{(1)}$. Для представления этой операции в матричном виде потребуется матрица

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Логические операции над нечеткими векторными переменными – конъюнкцию, дизъюнкцию и импликацию – также можно представить в матричном виде [7].

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 1 & x_0 \\ 0 & x_1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{D}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} x_0 & 0 \\ x_1 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{I}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

С помощью этих матриц логические операции над нечеткими векторами могут быть представлены в виде

$$\neg \mathbf{x} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{x}; \quad \mathbf{x} \wedge \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y}; \quad \mathbf{x} \vee \mathbf{y} = \mathbf{D}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y}; \quad \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{I}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y} \quad (9)$$

где точка обозначает обычное матричное умножение. Результатом логических операций, сформулированных в таком виде, тоже будет нечеткий вектор.

В явном виде уравнения (9) имеют вид:

$$\begin{aligned} \neg \mathbf{x} &= \neg \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \mathbf{N} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_0 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{x} \wedge \mathbf{y} &= \begin{pmatrix} 1 & x_0 \\ 0 & x_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 + x_0 y_1 \\ x_1 y_1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{x} \vee \mathbf{y} &= \begin{pmatrix} x_0 & 0 \\ x_1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 y_0 \\ x_1 y_0 + y_1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y} &= \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 y_0 \\ x_0 y_0 + y_1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Детальное обоснование матриц (8) представлено в работе [7].

Автором диссертационной работы показано, что предложенный способ реализации операции отрицания сохраняет свойство «двойного отрицания», присущего ее «четкому» аналогу:

$$\neg\neg\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \mathbf{N} \cdot \left(\mathbf{N} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} \right) = \mathbf{N} \cdot \left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Предложенный способ реализации конъюнкции и дизъюнкции сохраняет коммутативные свойства, присущие их «четким» аналогам:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} \wedge \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y} = \begin{pmatrix} 1 & x_0 \\ 0 & x_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 + x_0 y_1 \\ x_1 y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_0 + x_1) y_0 + x_0 y_1 \\ x_1 y_1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} x_0 + x_1 y_0 \\ x_1 y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & y_0 \\ 0 & y_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \mathbf{C}(\mathbf{y}) \cdot \mathbf{x} = \mathbf{y} \wedge \mathbf{x}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} \vee \mathbf{y} &= \mathbf{D}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x_0 & 0 \\ x_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 y_0 \\ x_1 y_0 + y_1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} x_0 y_0 \\ x_1 y_0 + y_1 (x_0 + x_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 y_0 \\ x_0 y_1 + x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 & 0 \\ y_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \mathbf{D}(\mathbf{y}) \cdot \mathbf{x} = \mathbf{y} \vee \mathbf{x}. \end{aligned} \quad (13)$$

Предложенный способ реализации нечеткой импликации сохраняет дизъюнктивное представление в таком же виде, как и у четкой импликации:

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{x}) \vee \mathbf{y} = \neg \mathbf{x} \vee \mathbf{y}. \quad (14)$$

Можно также записать

$$\mathbf{I}(\mathbf{x})\mathbf{y} = \mathbf{D}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{x}), \quad (15)$$

где подразумевается, что вектор $\mathbf{N} \cdot \mathbf{x}$ является аргументом операции \mathbf{D} .

В процессе логического вывода потребуется найти значение операнда \mathbf{y} , стоящего под знаком импликации $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{z}$. Для численной реализации такой операции используется матрица, обратная матрице операции импликации:

$$\mathbf{I}^{-1}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{x_1} & 0 \\ -\frac{x_0}{x_1} & 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

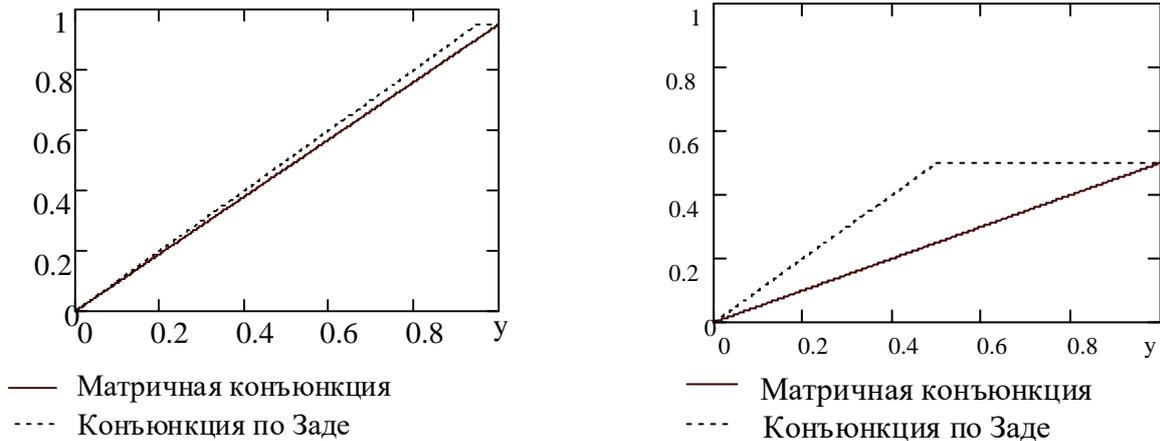
Если заданы значения нечетких векторов \mathbf{x} и \mathbf{z} , тогда значение вектора \mathbf{y} может быть найдено как:

$$\mathbf{y} = \mathbf{\Gamma}^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{z}. \quad (17)$$

Следует отметить, что введенные матричные операции отличаются от «классических» формул Л. Заде и, в большой степени, соответствуют вероятностному или алгебраическому подходу [21; 59]. Например, согласно (10), истинностная компонента конъюнкции $[\mathbf{x} \wedge \mathbf{y}]_1 = x_1 y_1$, в то время как формулы Л. Заде для этой величины дают $\min(x_1, y_1)$. В матричном представлении нечеткой логики отражаются различия истинностей высказываний A («Выиграть миллион»), задаваемой вектором \mathbf{x} , и $B = A \wedge A$ («Выиграть миллион **И** снова Выиграть миллион»), задаваемой вектором $\mathbf{x} \wedge \mathbf{x}$. В общем случае $\mathbf{x} \wedge \mathbf{x} \neq \mathbf{x}$. Равенство $\mathbf{x} \wedge \mathbf{x} = \mathbf{x}$ выполняется только когда \mathbf{x} равно одному из базисных векторов $\mathbf{e}^{(0)}$ или $\mathbf{e}^{(1)}$.

Следует также отметить, что хотя координаты x_0 и x_1 удовлетворяют условию нормировки (3), это не значит, что они описывают вероятность наступления некоторых событий A и \bar{A} . Как отмечено в книге А. Пегата [14] выделяют два вида неопределенности – стохастическую (вероятностную) и лингвистическую (нечеткую). Стохастическая неопределенность проявляется в виде вероятности возникновения конкретного, точно определенного события. Лингвистическая неопределенность заключается в словах высказывания, которые описывают явление «примерно», неточно, нечетко. Другими словами, при вероятностном описании, событие либо полностью наступает, либо не наступает вообще, а при нечетком – событие может наступить «частично».

В частном случае «четких» (и близких к ним) значений формулы Л. Заде и матричного аппарата дают одинаковый результат, рисунок 7.а., однако при $x_1 \sim y_1 \sim 0.5$ расхождение велико, рисунок 7.б.



а)

б)

Рисунок 7 – Результаты нечетких конъюнкций $\mathbf{z} = \mathbf{x} \wedge \mathbf{y}$ в соответствии с (10)

и Л. Заде, (а) в приближении «четких» векторов $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} 0.05 \\ 0.95 \end{pmatrix}$, и (б) в случае

наибольшей нечеткости или неопределенности $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}$

Вышесказанное не означает приоритета одних моделей перед другими. Формулы Л. Заде обоснованы их повсеместным использованием, но они являются лишь одним из возможных вариантов реализаций нечетких операций, предложенных в литературе [4; 5; 8; 12; 14; 19–21; 37]. Необходимо также отметить, что операции конъюнкции и дизъюнкции в матричной реализации численно совпадают с операциями, предложенными в [19].

Особенность матричного подхода [7; 26; 31] заключается в его математическом обосновании: используются те же матрицы нечетких логических операций, что и для их «четких» прототипов. Во многих случаях это позволяет точно моделировать нечеткие рассуждения.

2.6. Нечеткие множества

Кроме нечетких переменных, в нечеткой логике вводится понятие нечеткого множества и подмножества [3]. Рассмотрим некоторое множество U , которое далее мы будем называть «универсальным» множеством. Множество U

само является подмножеством некоторого пространства $\mathbb{R}^n: U \in \mathbb{R}^n$. Элементы множества U будем обозначать символом u , т.е. $u \in U$.

«Четкое» подмножество A множества U может быть задано с помощью функции принадлежности $\mu_A(u)$ точек u подмножеству A . Функция принадлежности определяется следующим образом:

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 0, & \text{если } u \notin U, \\ 1, & \text{если } u \in U. \end{cases} \quad (18)$$

Таким образом, область значений функции $\mu_A(u)$ для «четкого» множества принадлежит бинарному пространству \mathbb{B} .

Нечеткое подмножество C универсального множества U также может быть задано с помощью функции $\mu_C(u)$, только теперь область значений этой функции принадлежит пространству $\mathbb{F} = [0,1]$. Смысл этой функции состоит в том, что ее значение описывает степень принадлежности элемента u приведенному нечеткому подмножеству C . Совокупность универсального множества элементов U и характеристики (функции) принадлежности элементов называется подмножеством с нечеткими границами или нечетким подмножеством: $C = \langle U, \mu_C(u) \rangle$ [3].

Приведем пример. Пусть есть универсальное множество A всех возможных возрастов человека $A = [0,100]$ (лет). Каждый человек характеризуется своим возрастом $a \in A$. На данном универсальном множестве A можно выделить нечеткое подмножество «возраст молодых людей» YH . Подмножество YH , в свою очередь, может численно задаваться функцией принадлежности $\mu_{YH}(a)$, изображенной на рисунке 8. Для примера, значение μ_{YH} в точке 30 (лет) $\mu_{YH}(30) = 0.5$ говорит о том, что степень принадлежности возраста $a = 30$ лет к «множеству возрастов молодых людей» равна 0.5. Или, другими словами, про человека в 30 лет можно с уверенностью 0.5 сказать, что он «молодой».

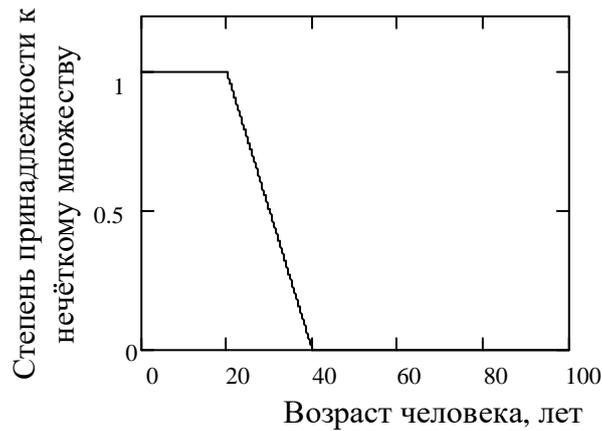


Рисунок 8 – График функции принадлежности $\mu_{YH}(a)$ нечеткого подмножества YH «возраст молодых людей», где по горизонтали отложен возраст людей в годах $a \in A$ (элементы универсального множества)

Построенные таким образом нечеткие подмножества можно применять для описания нечетких понятий, которые встречаются в задачах управления и задачах искусственной интеллектуальности.

2.7. Нечеткие предикаты

В «классическом» подходе [3; 14; 60] значение функции принадлежности $\mu(u)$ элементов u универсального множества U заданному нечеткому подмножеству U_x является свойством этих элементов u . Такое описание соответствует определению предикатов [61], использование которых в нечеткой логике введено М.А. Марценюком в работе [27].

В этой работе предлагается задавать нечеткий предикат $\mathbf{x}(u)$ функцией истинности, определяемой на универсальном множестве U и принимающей значения в пространстве нечетких векторов \mathcal{V} . При этом, координаты нечеткого вектора $\mathbf{x}(u)$ выражаются через функцию принадлежности $\mu_x(u)$ следующим образом:

$$\mathbf{x}(u) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_x(u) \\ \mu_x(u) \end{pmatrix}, \quad (19)$$

и удовлетворяют условиям (2) и (3).

Как видно из этого определения нечеткого предиката, он полностью задается функцией истинности $\mu_x(u)$, которая соответствует функции принадлежности элементов u некоторому нечеткому подмножеству U_x . В матричном подходе на этапе реализации решения задачи намного удобнее оперировать именно предикатами, заданными в форме (19) [26], а не функциями принадлежности нечетких множеств.

2.7.1. Оценка степени неопределенности нечеткого предиката

Матричный подход позволяет оценивать степень нечеткости предикатов. Для каждого конкретного значения аргумента предиката она может быть рассчитана по формуле (4). Для количественной оценки степени нечеткости всего предиката автором диссертационной работы предложена следующая формула:

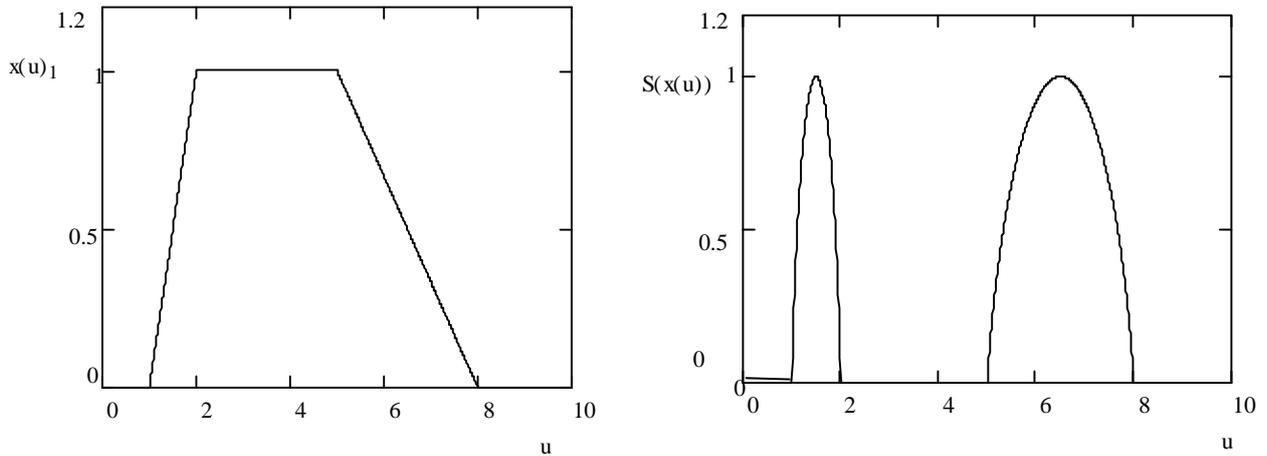
$$S = \int_U S(\mathbf{x}(u)) du. \quad (20)$$

Или в случае, если область определения предиката является дискретной:

$$S = \sum_U S(\mathbf{x}(u)). \quad (21)$$

где $S(\mathbf{x}(u)) = -x_0(u) \log_2 x_0(u) - x_1(u) \log_2 x_1(u)$ – локальная нечеткость предиката.

На рисунке 9 для наглядности приведены график функции истинности некоторого предиката и оценка соответствующей степени нечеткости значений этого предиката.



а)

б)

Рисунок 9 – Пример графика функции истинности нечеткого предиката (а) и степень локальной нечеткости его значений (б)

В приведенном примере интегральная степень нечеткости всего предиката, рассчитанная по формуле (20) составляет $S = 2.885$ бит.

Оценка степеней нечеткости предикатов позволяет при решении конкретных задач осуществлять дополнительный выбор правил таким образом, чтобы отбрасывать наименее значимые правила, и оставлять только правила, несущие максимальную информацию. Кроме того, с помощью такой оценки можно осуществлять выбор функций истинности, содержащих максимальное количество информации об исследуемом объекте.

2.7.2. Операции над нечеткими предикатами

В связи с тем, что предикаты, используемые при реализации конкретных задач, фактически являются функциями, требуется некоторое переосмысление нечетких логических операций. Для этого автором диссертационной работы предложены следующие формулировки.

Для каждого конкретного значения аргумента u предикат $x(u)$ принимает значение из векторного пространства V . Операции над векторами были описаны в разделе 2.5.2. Т.е. в каждой конкретной точке производится операция над двумя векторами, в результате получается вектор. Для совокупности всех значений параметров результатом является векторная

функция или, по определению, новый предикат. Это обстоятельство хорошо согласуется с классическими понятиями предикатов в математической логике и операций над ними [61]. Реализация операций над предикатами с помощью матриц (8) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \neg \mathbf{x}(u) &= N \cdot \mathbf{x}(u) \\
 \mathbf{z}(u, v) = \mathbf{x}(u) \wedge \mathbf{y}(v) &= C(\mathbf{x}(u)) \cdot \mathbf{y}(v) = C(\mathbf{y}(v)) \cdot \mathbf{x}(u), \\
 \mathbf{z}(u, v) = \mathbf{x}(u) \vee \mathbf{y}(v) &= D(\mathbf{x}(u)) \cdot \mathbf{y}(v) = D(\mathbf{y}(v)) \cdot \mathbf{x}(u), \\
 \mathbf{z}(u, v) = \mathbf{x}(u) \rightarrow \mathbf{y}(v) &= I(\mathbf{x}(u)) \cdot \mathbf{y}(v).
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

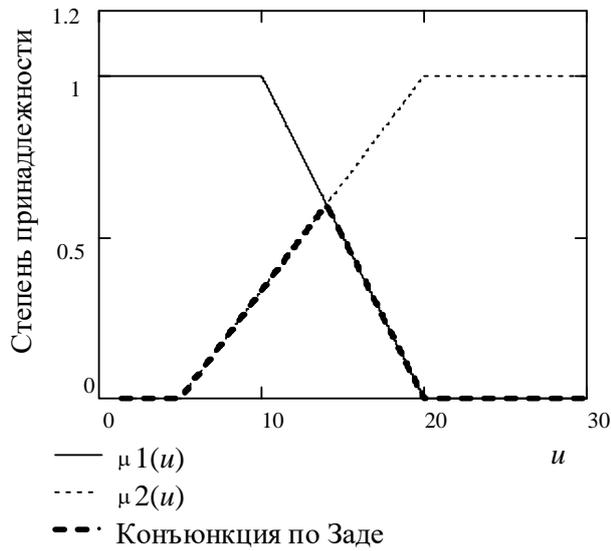
где u и v – элементы некоторых универсальных множеств U и V .

2.7.3. Сравнение логических операций над нечеткими множествами и предикатами

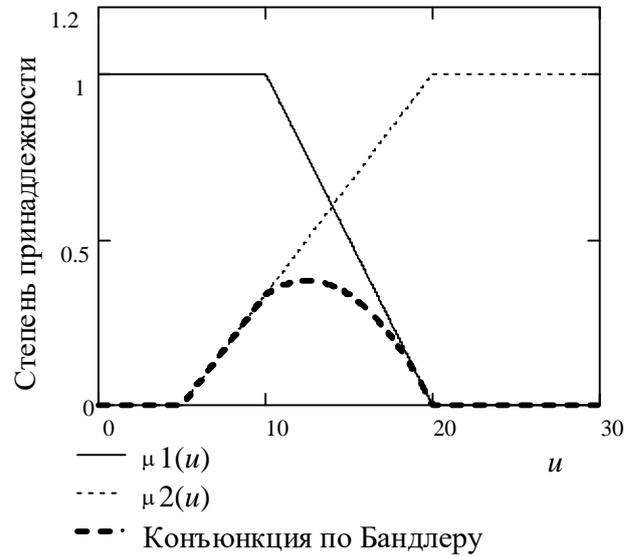
В литературе предложено большое количество реализаций основных операций над нечеткими множествами. Для примера построим на универсальном множестве U два нечетких подмножества $U1$ и $U2$, задаваемых численно функциями принадлежности $\mu_{U1}(u)$ и $\mu_{U2}(u)$ соответственно. Функции принадлежности приведены на рисунке 10. Эти же функции задают предикаты $\mathbf{p1}(u)$ и $\mathbf{p2}(u)$, соответствующие подмножествам $U1$ и $U2$.

Конъюнкция $U1 \cap U2$

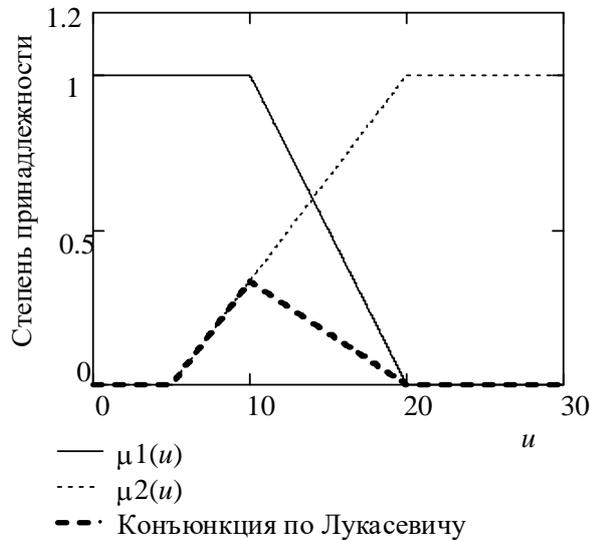
Кроме классического логического произведения Л. Заде $\mu_{U1}(u) \wedge \mu_{U2}(u) = \min(\mu_{U1}(u), \mu_{U2}(u))$ [5], рисунок 10.а, предложены еще алгебраическое произведение $\mu_{U1}(u) \wedge \mu_{U2}(u) = \mu_{U1}(u) \cdot \mu_{U2}(u)$ [62], рисунок 10.б, граничное произведение [63], рисунок 10.в.



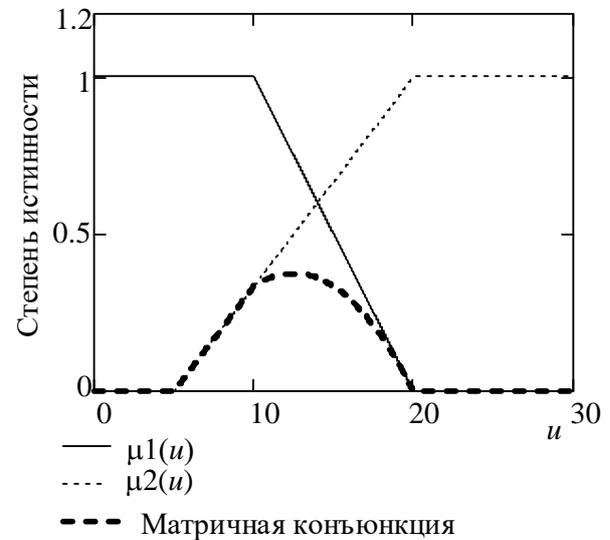
а)



б)



в)



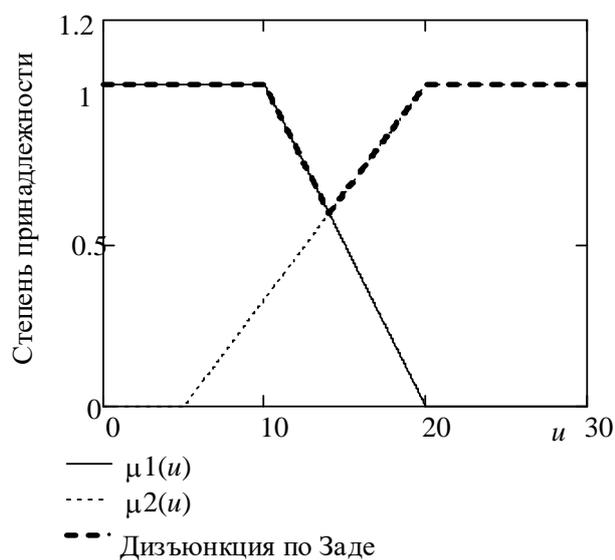
г)

Рисунок 10 – Графики функции принадлежности результатов нечеткой конъюнкции $U1 \cap U2$ в а) соответствии с [4], б) в соответствии с [62], в) в соответствии с [63], г) в соответствии с (10)

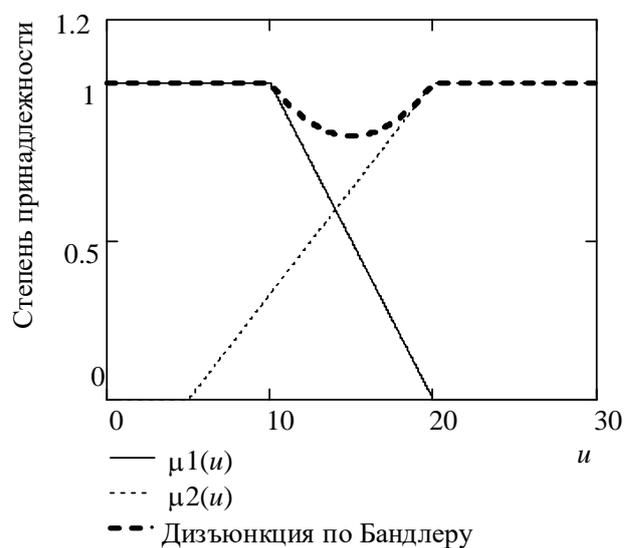
График функций истинности предиката, полученного в результате матричной конъюнкции двух предикатов $\mathbf{p1}(u) \wedge \mathbf{p2}(u) = C(\mathbf{p1}(u)) \cdot \mathbf{p2}(u)$, показан на рисунке 10.г.

Дизъюнкция $U1 \cup U2$

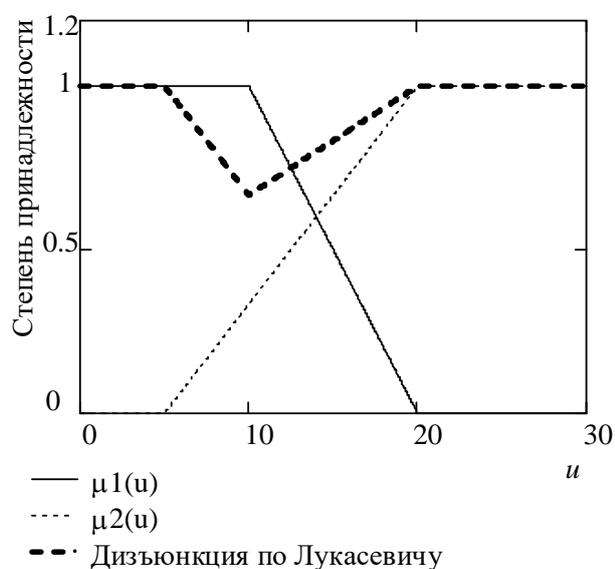
Кроме классической логической суммы Л. Заде $\mu_{U_1}(u) \vee \mu_{U_2}(u) = \max(\mu_{U_1}(u), \mu_{U_2}(u))$ [4], рисунок 11.а., предложены еще алгебраическая сумма $\mu_{U_1}(u) \wedge \mu_{U_2}(u) = \mu_{U_1}(u) + \mu_{U_2}(u) - \mu_{U_1}(u) \cdot \mu_{U_2}(u)$ [62], рисунок 11.б., граничная сумма $\mu_{U_1}(u) \wedge \mu_{U_2}(u) = \max(0, \mu_{U_1}(u) + \mu_{U_2}(u) - 1)$ [63], рисунок 11.в.



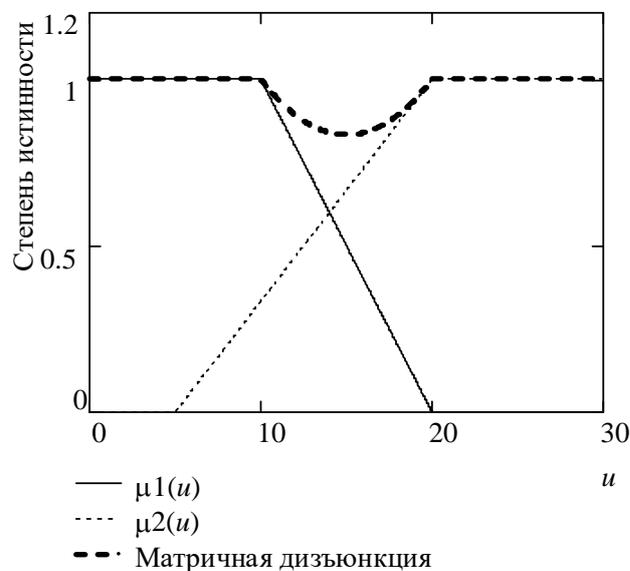
а)



б)



в)



г)

Рисунок 11 – График функций принадлежности результатов нечеткой дизъюнкции $U1 \cup U2$ а) в соответствии с [4] б) в соответствии с [62], в) в соответствии с [63], г) в соответствии с (10)

График функции истинности предиката, полученного в результате матричной дизъюнкции двух предикатов $\mathbf{p1}(u) \vee \mathbf{p2}(u) = D(\mathbf{p1}(u)) \cdot \mathbf{p2}(u)$, показан на рисунке 11.г.

Подробно все предложенные в литературе функции сравниваются в [21]. Из графиков видно, что истинностные части результатов конъюнкции и

дизъюнкции в матричной реализации численно совпадают с результатами конъюнкции и дизъюнкции, предложенными в [62]. Результирующий предикат является аналитическим, во всех точках отражает свойства обоих исходных предикатов. Нечеткость такого предиката легко вычисляется, как это показано в разделе 2.7.1.

2.8. Корреляция нечетких предикатов

Пусть есть универсальное множество U с элементами u . На этом множестве с помощью функций истинности $\mu_{p_1}(u)$ и $\mu_{p_2}(u)$ заданы два предиката $p_1(u)$ и $p_2(u)$.

В случае, когда функции истинности ни для одного значения аргумента u одновременно не принимают значения, отличные от 0, предикаты не коррелируют, рисунок 12.а. Если функции истинности в одной и той же точке принимают отличные от 0 значения, предикаты коррелируют друг с другом, рисунок 12.б, на интервале $(40,60)$.

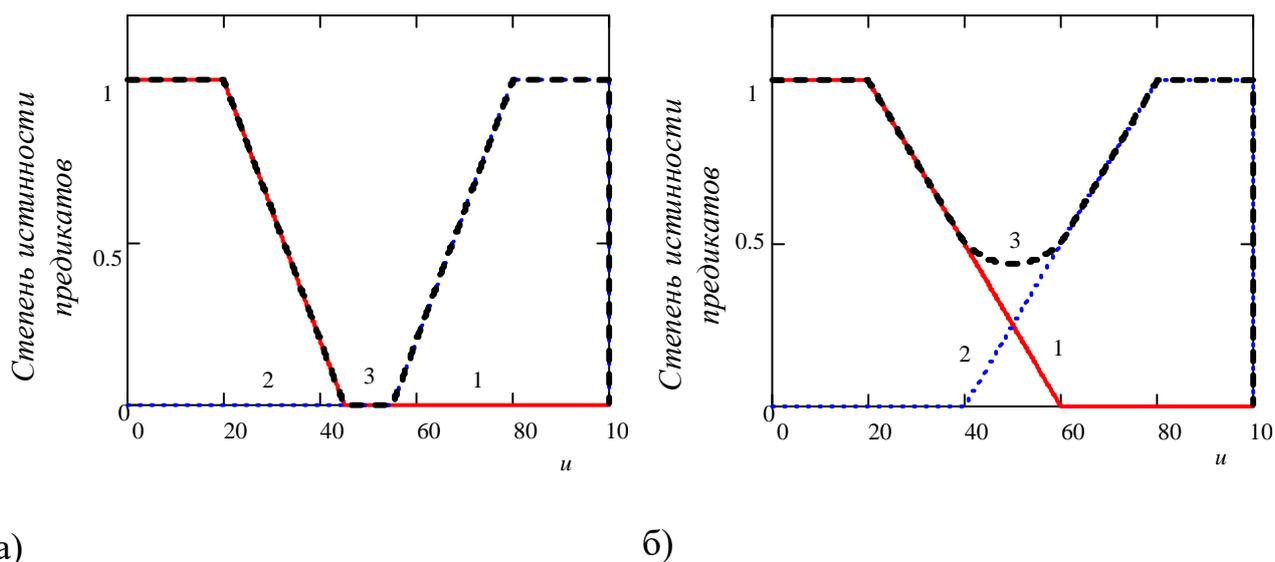


Рисунок 12 – Примеры функций истинности предикатов $p_1(u)$ и $p_2(u)$ а) в случае отсутствия корреляции и б) в случае наличия корреляции, где 1 – $\mu_{p_1}(u)$, 2 – $\mu_{p_2}(u)$, 3 – функция истинности дизъюнкции предикатов –

$$D(p_1(u))p_2(u)$$

Как видно из рисунка 12.б, в случае корреляции возникает дополнительный вклад в значение дизъюнкции и, аналогично, конъюнкции. В случае же отсутствия корреляции операцию дизъюнкции можно заменить операцией суммы векторов, которую можно определить следующим образом:

$$\mathbf{x} + \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - x_1 - y_1 \\ x_1 + y_1 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Это означает, что сложный предикат, состоящий из дизъюнкции нескольких простых предикатов с одной областью определения, между которыми отсутствует корреляция, можно представить в виде суммы независимых предикатов. Примеры таких предикатов очень часто встречаются на практике при описании искомых параметров.

2.9. Лингвистические переменные

Существует большое количество предметных областей, законы и правила развития которых формулируются экспертами-людьми на естественном языке. Естественный язык подразумевает использование словесных фраз или лингвистических термов, которые трудно поддаются формализации средствами обычной двоичной логики. В работе [6] предложен способ формализации лингвистических термов с использованием нечетких множеств для построения алгоритмов управления системами в таких предметных областях.

Пусть α – лингвистическая переменная, набор словесных термов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ составляет ее возможные значения. Например α – это «уровень внешнего воздействия» со значениями α_1 – «уровень низкий», α_2 – «уровень средний», α_3 – «уровень высокий». «Лингвистической переменной» называется переменная, которая принимает значения из набора словесных термов α_i . Каждый терм α_i лингвистической переменной формализуется нечетким множеством с соответствующей функцией принадлежности $\mu_{\alpha_i}(u)$, причем все функции истинности всех термов α_i определены на одном и том же универсальном множестве U .

Термы лингвистической переменной и соответствующие им нечеткие множества также называются гранулами информации [64].

В качестве еще одного примера можно рассмотреть лингвистическую переменную α «температура среды». Универсальным множеством U можно считать допустимый диапазон изменения температуры среды. Элементами этого множества будут значения температуры среды в конкретные моменты времени или в конкретной точке пространства. Температуру среды можно охарактеризовать набором термов α_1 «низкая», α_2 «средняя», α_3 «высокая» (и многими другими). Каждый терм должен быть количественно задан с помощью нечеткого множества и соответствующей функции принадлежности. Пример нечеткого множества приведен выше.

2.10. Представление лингвистических переменных с использованием нечетких предикатов

Как показано автором диссертационной работы в разделе 2.7 ([26]), каждому нечеткому подмножеству U_x универсума U можно поставить в соответствие предикат, задающийся той же функцией принадлежности. Тогда лингвистическую переменную α можно описать как совокупность предикатов $\alpha = \{p^{(\alpha_1)}(u), p^{(\alpha_2)}(u), \dots, p^{(\alpha_n)}(u)\}$, заданных на одном универсальном множестве U .

На языке предикатов рассмотренная ранее лингвистическая переменная α «температура среды», описывающая температуру среды, с универсальным множеством U и набором термов α_1 «низкая», α_2 «средняя», α_3 «высокая» (и многими другими) может быть количественно описана с помощью набора нечетких предикатов $p_{\alpha_1}(T), p_{\alpha_2}(T), p_{\alpha_3}(T)$. В свою очередь, каждый нечеткий предикат задается собственной функцией истинности или функцией принадлежности соответствующему нечеткому множеству.

2.11. Оценка степени неопределенности лингвистической переменной

Оценка степени нечеткости лингвистической переменной и ее значений оказывается полезной в тех случаях, когда необходимо знать, насколько качественно входные параметры описываются заданными в условии задачи лингвистическими термами, и есть ли необходимость введения дополнительных термов. Также, с помощью этой характеристики можно оценить надежность значений выходных переменных и понять, насколько стоит доверять таким значениям.

В связи с тем, что лингвистическая переменная в матричном представлении описывается набором предикатов, общая оценка ее нечеткости зависит от нечеткостей каждого из предикатов. В том случае, когда все предикаты являются независимыми (отсутствует корреляция, раздел 2.8), степень нечеткости можно считать аддитивной и рассчитать следующим образом:

$$S_{\alpha} = \sum_i S_{\alpha i}, \quad (24)$$

где S_{α} – степень нечеткости лингвистической переменной α , $S_{\alpha i}$ – степень нечеткости предиката $\mathbf{p}^{(\alpha i)}(u)$, рассчитанная по формулам (20) или (21).

В случае, когда предикаты оказываются зависимыми друг от друга (раздел 2.8), необходимо введение функции корреляции, что требует отдельного исследования и выходит за рамки данной диссертационной работы.

2.12. Алгоритмы нечеткого вывода

2.12.1. «Классические» алгоритмы нечеткого вывода

В литературе по нечеткой логике очень подробно описаны процедуры и алгоритмы для оценки значений искомых величин по значениям заданных величин с использованием набора правил (базы знаний) в лингвистической формулировке (например, в обзорных работах [8; 14; 21; 60]). Чаще всего

используются алгоритм Мамдани [11], импликация Ларсена [19], алгоритм Такаги-Сугено [12], алгоритм Тсукамото [20]. Далее в данной работе существующие алгоритмы нечеткого вывода других авторов будем называть «классическими».

Обычно, правила формулируются в виде «Если ..., то ...», что соответствует гипотетическому силлогизму *modus ponens* в обычной математической логике. Также, но реже, могут использоваться правила вывода *modus tollens* и др. [8; 14]. Предпосылки и следствия правил являются термами лингвистических переменных и численно формализуются функциями принадлежности нечетких множеств. Набор правил вывода в данной предметной области представляет собой базу знаний, которая формируется человеком-экспертом.

Примеры реализаций нечеткого логического вывода в «классической» формулировке по алгоритмам Мамдани, Ларсена и др. описаны во многих источниках, например, [8; 14; 21; 60]. В этом подходе предлагается задавать правила базы знаний с помощью отношений $\mu_U(u) \rightarrow \mu_V(v) = R(u, v)$, где $\mu_U(u)$ – функция принадлежности нечеткого множества U , описывающего предпосылку правила (условие для значения исходного параметра u), $\mu_V(v)$ – функция принадлежности нечеткого множества V , описывающего следствие правила (условие для искомой величины v). Матрица R эмпирически задается на множестве $U \times V$ (здесь знак « \times » обозначает прямое произведение значений функций принадлежности нечетких множеств U, V):

$$\mu_R(u, v) = R(\mu_U(u) \times \mu_V(v)), \quad (25)$$

где каждый автор предлагает свой вариант реализации операции « \times ».

Использование эмпирической матрицы R при реализации решения задач на ЭВМ оказывается затруднительно [26]. В связи с этим авторы многих алгоритмов нечеткого вывода предлагают упрощенную реализацию правил. В

частности, алгоритм Мамдани подразумевает использование напрямую функции принадлежности $\mu_V(v)$ вместо $\mu_R(u, v)$:

$$\mu_R(u, v) = \mu_V(v). \quad (26)$$

Заданная матрица R позволяет построить функцию принадлежности $\mu_V(u_0, v)$ вспомогательного нечеткого множества V , которое описывает следствие правила при заданном фактическом значении аргумента правила u_0 . В «классических» подходах эта зависимость реализуется следующим образом:

$$\mu_V(u_0, v) = \mu_U(u_0) \wedge \mu_R(u_0, v), \quad (27)$$

где аргумент u_0 имеет заданное фактическое «четкое» значение, $\mu_V(u_0, v)$ – функция искомого параметра v .

Результатом использования такой формулировки правил является отображение степеней принадлежности аргументов правил множествам, описанным в предпосылках правил, на область значений результатов. Другими словами, задается функциональная зависимость степени истинности $\mu_V(u_0, v)$ от «четкого» значения искомого параметра v . Эта функциональная зависимость позволяет с помощью методов дефаззификации [8; 14; 21; 60; 65–67] найти конкретное «четкое» значение искомого параметра \bar{v} .

С другой стороны, такая формулировка не позволяет добиться точного соответствия требованиям правила *modus ponens* в областях значений параметров, в которых нечеткость максимальна, а также, в особых точках. Например, в качестве модели логической импликации может использоваться конъюнкция [5; 19; 37]. В результате, в областях, про которые ничего не сказано в базе знаний, может получиться решение, корректность которого вызывает сомнения.

Другим недостатком такого подхода является невозможность прямого применения правила резолюции:

$$x(u) \rightarrow y(v) \rightarrow z(w). \quad (28)$$

Если искомый результирующий параметр зависит от ряда промежуточных параметров, каждый из которых, в свою очередь, зависит от входных параметров, то для расчета результата приходится применять излишнюю фаззификацию и дефаззификацию к промежуточным параметрам.

Третьим недостатком «классических» подходов является тот факт, что справедливость или нечеткость правил задается с помощью эмпирической матрицы R , численная реализация которой при решении конкретных задач на ЭВМ с помощью операций Л. Заде *min*, *max* оказывается не простой задачей, требует большого количества программного кода и вычислений. «Упрощенные версии» нечеткого вывода в алгоритмах Мамдани, Ларсена, Тсукамото, Сугено вообще не позволяют учесть степени нечеткости правил.

Четвертый недостаток «классических» подходов состоит в том, что нельзя указывать степень истинности самих правил. Определение правила *modus ponens* в математической логике звучит как «Если выполняется предпосылка, и правило справедливо, то выполняется и следствие» [36; 61]. В указанных «классических» алгоритмах в явном виде степень истинности правил не используется, и считается, что все правила всегда одинаково справедливы. Из-за этого системы, построенные с применением таких алгоритмов, не используют всю свою потенциальную гибкость в настройках.

2.12.2. Матричная реализация нечеткого логического вывода с использованием нечетких переменных

М.А. Марценюком в работе [7] предложено более точное обобщение правила *modus ponens* на область нечетких переменных. Оно учитывает факт связи между предпосылкой, следствием и степенью истинности правила, а также имеет поведение в особых точках, совпадающее со значениями «четкой» импликации.

Правило *modus ponens* на языке логических операций имеет вид $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{z}$. Заключение о степени истинности высказывания-следствия этого правила, характеризующегося вектором \mathbf{y} , можно сделать из соотношений (8),

(9). Для этого должны быть известны нечеткие векторы $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}$ и $\mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \end{pmatrix}$,

определяющие степени истинности предпосылки правила и справедливости самого правила. Как показано в [7; 26], эта задача сводится к решению матричного линейного алгебраического уравнения $\mathbf{I}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y} = \mathbf{z}$ относительно неизвестного вектора \mathbf{y} . В явной форме записи система уравнений имеет вид:

$$\begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \end{pmatrix} \text{ или } \begin{cases} x_1 y_0 = z_0 \\ x_0 y_0 + y_1 = z_1 \end{cases}. \quad (29)$$

Система линейных алгебраических уравнений имеет решение, если определитель матрицы коэффициентов отличен от нуля. В данном случае должно выполняться условие

$$\det(\mathbf{I}(\mathbf{x})) = \det \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix} = x_1 \neq 0. \quad (30)$$

Другими словами, компонента истинности x_1 вектора \mathbf{x} не должна быть равна нулю ($x_1 \neq 0$). В случае выполнения этого условия компоненты неизвестного вектора \mathbf{y} принимают значения

$$y_0 = \frac{z_0}{x_1}; \quad y_1 = 1 - \frac{z_0}{x_1}. \quad (31)$$

Полученное решение также должно удовлетворять условиям (2), из которых дополнительно следует, что $x_1 \geq z_0$.

Можно видеть, что в случае $x_1 = 1$ и $z_1 = 1$ из (31) вытекает известный результат правила *modus ponens* в четкой логике: $\mathbf{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Построим график истинностной координаты y_1 результирующего вектора \mathbf{y} в зависимости от всех возможных значений истинностной координаты x_1 входного вектора \mathbf{x} и справедливости правила z_1 :

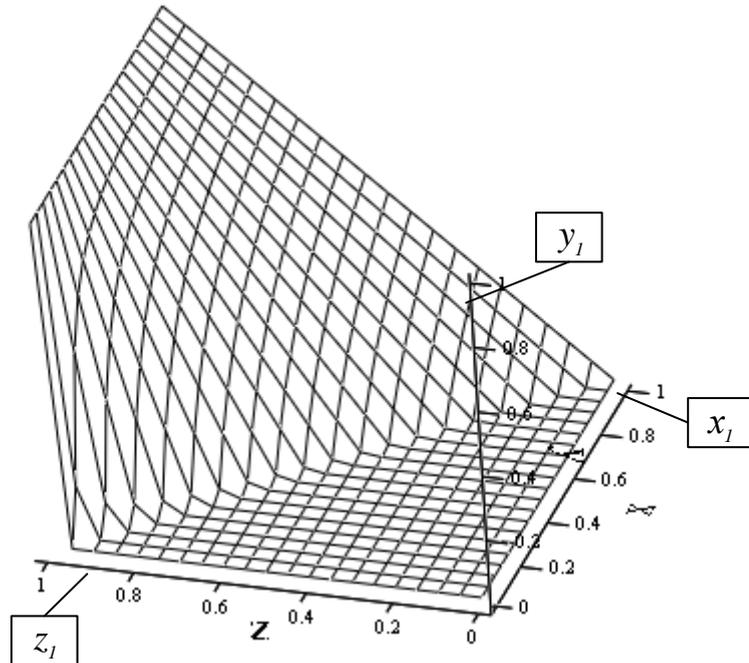


Рисунок 13 – График истинностной координаты y_1 результирующего нечеткого вектора \mathbf{y} для матричной реализации нечеткого вывода, для всех возможных значений истинностной координаты x_1 вектора-предпосылки \mathbf{x} и степени истинности правила z_1

Из графика видно, что корректное решение существует только в ограниченной области, а в точке $x_1=0, z_1=1$ истинностная координата y_1 следствия правила \mathbf{y} принимает сразу бесконечное число значений на полуинтервале $(-\infty, 1]$, что свойственно и «четкой» импликации.

Как было сказано выше, результат вывода (31) принимает корректные по условиям (2) значения в области, показанной на рисунке 14:

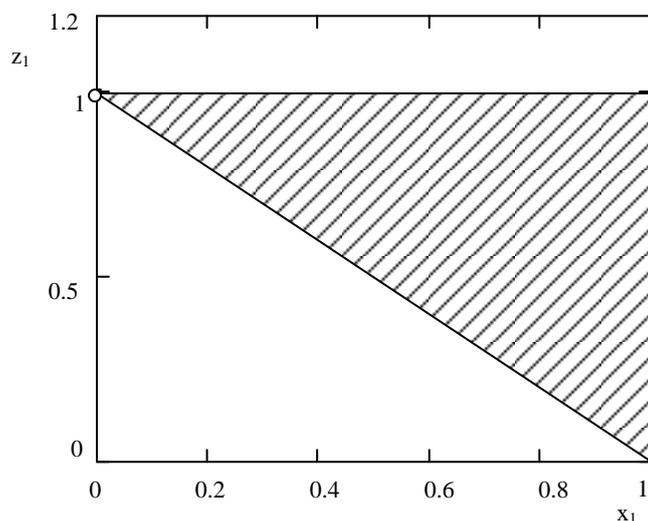
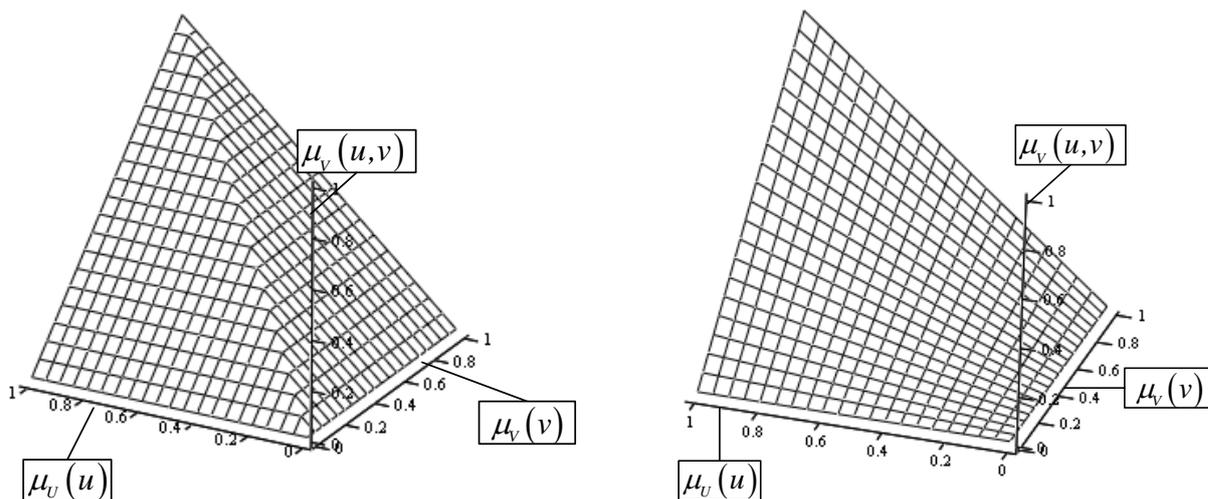


Рисунок 14 – Область, в которой результат логического вывода по формуле (31) принимает корректные значения (2). Точка $x_1 = 0, z_1 = 1$ выколота

Для сравнения приведем графики результатов нечеткого вывода по правилам Мамдани и Ларсена:



а)

б)

Рисунок 15 – График функции принадлежности $\mu_v(u, v) = \mu_u(u) \wedge \mu_v(v)$ вспомогательного нечеткого множества (а) в соответствии с Мамдани [37] и (б) с Ларсеном [19], где по оси X отложены значения $\mu_x(u)$, по оси Y – значения $\mu_y(v)$, по оси Z – значения $\mu_z(u, v)$

Из графиков на рисунке 15 видно, что результирующий параметр нечеткого вывода по алгоритмам Мамдани и Ларсена принимает корректные

значения с точки зрения принадлежности пространству $\mathbb{F} = [0,1]$ на всей области определения, что не соответствует информации, заложенной в исходное правило *modus ponens*.

Таким образом, в отличие от других алгоритмов, в матричном представлении не только реализован нечеткий логический вывод, но и строго указана область, в которой возможно его применение. Как показано в [7], другие известные правила логического вывода могут быть обобщены на область нечетких переменных аналогичным образом.

Дополнительно можно отметить, что в таком варианте вывода в явном виде используется степень справедливости правила, что позволяет сделать некоторые правила более важными, значимыми, а влияние других уменьшить. Это приводит к появлению дополнительной гибкости системы.

2.13. Матричная реализация нечеткого логического вывода с использованием нечетких предикатов

В большинстве практических задач управления и поддержки принятия решений недостаточно вывода на основе отдельных высказываний (и переменных), т.к. все знания формулируются в виде правил на языке лингвистических переменных. В связи с этим автором диссертационной работы предложено обобщение матричной реализации нечеткого вывода на область нечетких множеств, предикатов и лингвистических переменных [31].

Для построения алгоритма вывода используется база знаний, состоящая из правил вида «Если ..., То...», сформулированных на естественном языке, т.е. с использованием значений лингвистических переменных, например, α и γ , описывающих входной и выходной параметры алгоритма соответственно. Формализуем значения этих лингвистических переменных с помощью векторных предикатов следующим образом:

$\alpha = \{ \mathbf{x}_{\text{малый}}(u), \dots, \mathbf{x}_{\text{большой}}(u) \}$ – характеризует входной параметр $u \in U$,

$\gamma = \{ \mathbf{y}_{\text{малый}}(v), \dots, \mathbf{y}_{\text{большой}}(v) \}$ – характеризует результат $v \in V$.

Для каждого правила указывается степень истинности или справедливости \mathbf{z} . Кроме того, должны быть установлены области значений входного u и искомого v параметров задачи – универсальные множества U и V , задано четкое численное значение входного параметра u_0 .

Лингвистические правила схематически можно записать в виде зависимостей между значениями лингвистических переменных α и γ , а также степенью истинности/справедливости правил:

$$\gamma_k = \Gamma(\alpha_i, \mathbf{z}_{i,k}). \quad (32)$$

Каждое правило имеет степень нечеткости $\mathbf{z}_{i,k}$. В общем случае, матрица степеней истинности/справедливости может быть многомерной. В случае, если нет правила, устанавливающего зависимость между значением входного параметра α_i и значением результата γ_k , соответствующее значение $\mathbf{z}_{i,k}$ устанавливается равным $\mathbf{z}_{i,k} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$.

С помощью логических операций правила записываются следующим образом:

$$\alpha_i \rightarrow \gamma_k = \mathbf{z}_{i,k}. \quad (33)$$

Задача логического вывода состоит в том, чтобы численно рассчитать значения параметра $v_0 \in V$ по заданному значению параметра $u_0 \in U$.

В первую очередь четкое значение u_0 приводится к нечеткому виду с использованием функций принадлежности $\mu_{\alpha_i}(u)$ нечетких предикатов $\mathbf{x}_i(u_0)$, формализующих все возможные значения α_i лингвистической переменной α .

Правила (33) в матричной реализации операций над предикатами примут следующий вид:

$$I(\mathbf{x}_i(u_0)) \cdot \tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{z}_{i,k}, \quad (34)$$

где \tilde{y}_k – степень фактической реализации правила или степень истинности высказывания γ_k – следствия данного правила [31]. Решение этого уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned}\tilde{y}_k &= \left(I^{-1}(\mathbf{x}_0(u)) \cdot \mathbf{z}_{0,k} \right) \vee \left(I^{-1}(\mathbf{x}_1(u)) \cdot \mathbf{z}_{1,k} \right) \vee \dots = \\ &= D \dots \left(D \left(I^{-1}(\mathbf{x}_0(u)) \cdot \mathbf{z}_{0,k} \right) \cdot \left(I^{-1}(\mathbf{x}_1(u)) \cdot \mathbf{z}_{1,k} \right) \right) \cdot \dots = \\ &= D_{\text{all } i} \left(I^{-1}(\mathbf{x}_i(u)) \cdot \mathbf{z}_{i,k} \right),\end{aligned}\quad (35)$$

где введено обозначение $D_{\text{all } i}$ – дизъюнкция нечетких векторов по всем значениям индекса i , которая возможна благодаря сохранению ассоциативных и дистрибутивных свойств. Чтобы найти четкое значение результирующего параметра строится вспомогательная функция, в которой дизъюнкция реализует композицию значений по всем правилам:

$$\mathbf{r}(v) = \mathbf{D}_{\text{all } k} \left\{ \mathbf{C}[\tilde{y}_k] \mathbf{y}_k(v) \right\}. \quad (36)$$

В конце производится дефаззификация, например, центроидным методом:

$$v_0 = \frac{\int v \cdot \mathbf{r}_1(v) dv}{\int \mathbf{r}_1(v) dv}. \quad (37)$$

Необходимо отметить, что, как было продемонстрировано выше (раздел 2.12.2), формула (35) не всегда дает результат, удовлетворяющий условиям (2). Это означает, что данное правило не может характеризовать величину искомого параметра v_0 при данном значении входного параметра u_0 . На практике в таком случае можно вернуть значение $\tilde{y}_k = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, либо сообщить пользователю о неполноте базы знаний.

2.14. Связь с «упрощенным» алгоритмом дефаззификации

Истинностная часть нечеткого вектора \tilde{y}_k используется в формулах (36) и (37) как весовой коэффициент для предиката (или функции принадлежности)

$\mathbf{y}_k(w)$. В качестве результата вывода используется координата на области определения центра масс функции $\mathbf{r}(v)$, равной дизъюнкции «масштабированных» предикатов $\mathbf{y}_k(v)$. Численный расчет центра масс по формуле (37) сводится к циклу суммирований, что является самой затратной операцией во всем нечетком логическом выводе.

В работах [65–67] предложены различные методики для оптимизации процесса дефаззификации при условии использования операций Л. Заде и алгоритмов Мамдани, Тсукамото, Ларсена.

В матричной реализации, в случае отсутствия корреляции между предикатами $\mathbf{y}_k(v)$ (раздел 2.8) автором диссертационной работы предложено использование следующей модели [26].

Отсутствие корреляции между предикатами $\mathbf{y}_k(v)$ приводит к упрощению формулы (36):

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(v) &= \mathbf{D}_{all\ k}(\mathbf{C}(\tilde{\mathbf{y}}_k) \cdot \mathbf{y}_k(v)) = \sum_{all\ k} (\mathbf{C}(\tilde{\mathbf{y}}_k) \cdot \mathbf{y}_k(v)) = \\ &= \mathbf{C}(\tilde{\mathbf{y}}_0) \cdot \mathbf{y}_0(v) + \mathbf{C}(\tilde{\mathbf{y}}_1) \cdot \mathbf{y}_1(v) + .. \end{aligned} \quad (38)$$

где введено обозначение $\sum_{all\ k}$ – сумма нечетких векторов по всем значениям индекса k , численная реализация суммы по формуле (23).

Тогда интегралы в (37) распадаются на отдельные составляющие:

$$\begin{aligned} \int_v v \cdot \mathbf{r}_1(v) dv &= \sum_{all\ k} \int_v v (\mathbf{C}(\tilde{\mathbf{y}}_k) \cdot \mathbf{y}_k(v))_1 dv = \\ &= \sum_{all\ k} \left((\tilde{\mathbf{y}}_k)_1 \cdot \int_v v \cdot (\mathbf{y}_k(v))_1 dv \right). \end{aligned} \quad (39)$$

Аналогично и для интеграла в знаменателе (37). В свою очередь, все интегралы $\int_v v \cdot (\mathbf{y}_k(v))_1 dv$ и $\int_v (\mathbf{y}_k(v))_1 dv$ определяются только функциями истинности предикатов $\mathbf{y}_k(v)$, которые задаются экспертами на этапе построения решения задачи или обучения нечеткой системы. Другими словами, все самые длительные вычисления можно осуществить при построении решения

задачи, а в процессе эксплуатации вместо интегрирования использовать заранее рассчитанные центры масс, что существенно сокращает время работы.

Примечание. Использованное в (39) соотношение (40) справедливо только для матричной реализации операций нечеткой логики и в случае применения модели импликации Ларсена [19]. Модели импликаций других авторов [21] не позволяют использовать такой подход.

$$\left(\mathbf{C}(\tilde{\mathbf{y}}_k) \cdot \mathbf{y}_k(v) \right)_1 = (\tilde{\mathbf{y}}_k)_1 \cdot (\mathbf{y}_k(v))_1 \quad (40)$$

Использование в качестве заключений в правилах центров масс функций истинности/принадлежности вместо самих функций соответствует «упрощенному» нечеткому логическому выводу.

2.15. Сравнение численной сложности алгоритмов

Как было сказано выше, возможность сведения нечеткого логического вывода в матричном представлении к упрощенному алгоритму дефаззификации позволяет избежать вычислений интеграла из центроидного метода, точность которого пропорциональна количеству конечных сумм и времени вычислений.

Произведем сравнение времени выполнения вычислений нечеткого логического вывода в матричном представлении и наиболее популярных алгоритма Мамдани с использованием центроидного метода дефаззификации и «упрощенного» алгоритма нечеткого вывода. Для этого составим модель регулятора температуры.

- 7 правил вида «Если температура низкая (нормальная/высокая...), то мощность нагревателя высокая (средняя/выключен...)».
- Треугольные, кусочно-заданные функции истинности/принадлежности.
- Язык разработки: python 3.
- Среда разработки: google colab.
- Программно-аппаратные характеристики вычислительного устройства: серверный ускоритель python 3 на базе Google Compute Engine, Процессор 2x2.3 ГГц, 12 Гб ОЗУ всего, 0.79 Гб ОЗУ фактически задействовано.

- Время выполнения вычислений рассчитывается средним по 100 запускам, чтобы уменьшить влияние аппаратной оптимизации.

Результаты расчетов времен выполнения программы приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнение времени выполнения расчетов нечеткого вывода с использованием матричного алгоритма и алгоритма Мамдани

Количество узловых точек в интеграле центроидного метода, шт.	Среднее время выполнения расчетов нечеткого логического вывода, мс		
	Алгоритм Мамдани + непрерывный центроидный метод дефаззификации	«Упрощенный» алгоритм нечеткого вывода	Матричный алгоритм + сведение к упрощенной дефаззификации
10	0.189	0.003	0.004
100	1.704	0.003	0.004
1000	15.514	0.006	0.006

Как видно из таблицы, исключение интеграла из расчетов (упрощенная дефаззификация) позволяет сократить время на их выполнение на 2 и более порядка. Аналогичные результаты могут быть получены и в сравнении с численной реализацией ПИД-регулятора, т.к. в нем тоже требуется расчет интеграла.

С другой стороны, даже в самом длительном сценарии расчеты занимают несколько миллисекунд, что никак не сказывается на быстродействии систем поддержки принятия решений, в которых человек будет принимать окончательное решение значительно дольше, в том числе и в процессе обслуживания оборудования нефтедобычи.

Максимальная выгода от такого подхода может быть достигнута в случае его применения для систем управления высокоскоростными летательными или космическими аппаратами, где задержки в миллисекунды могут привести к серьезным изменениям траектории движения.

Незначительно большее время работы матричного представления нечеткого алгоритма по сравнению с «упрощенным» алгоритмом связано с отсутствием в «упрощенном» алгоритме степеней истинности правил. По мнению автора работы, если в «упрощенный» алгоритм внести дополнительные весовые коэффициенты, время на его вычисления также немного вырастет.

2.16. Транзитивность нечеткой импликации

Еще одной положительной особенностью предложенного в [7; 26] подхода является то, что искомый параметр $\tilde{y}_{i,k}$ получается в виде нечеткого вектора. Это позволяет использовать данный параметр напрямую в правиле резолюции для вычисления зависимых от него параметров. В отличие от классических подходов, здесь не требуются дополнительные дефаззификация и фаззификация, что существенно сокращает время вычислений.

Для примера можно рассмотреть систему, в которой необходимо поддерживать постоянную температуру объекта, но тепло от нагревателя передается (или забирается охладителем) через промежуточную систему теплопередачи, наполненную теплоносителем. База знаний для управления такой системой состоит из правил вида:

- Если температура объекта «низкая», то необходимо подать «высокую» мощность на нагреватель с уверенностью $\mathbf{z}_1 = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.9 \end{pmatrix}$.
- Если нагреватель включен на «высокую» мощность, то скорость подачи теплоносителя нужно сделать «высокой» с уверенностью $\mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.8 \end{pmatrix}$.

Пусть степень истинности высказывания «температура объекта низкая» описывается в зависимости от текущей температуры предикатом $\mathbf{x}(T)$, который в данный момент имеет значение $\mathbf{x}(T_0) = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.75 \end{pmatrix}$, тогда с уверенностью

$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{I}^{-1}(\mathbf{I}^{-1}(\mathbf{x}(T_0)) \cdot \mathbf{z}_1) \cdot \mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} 0.231 \\ 0.769 \end{pmatrix}$ можно сказать, что скорость, с которой необходимо прокачивать теплоноситель, должна быть «высокой».

2.17. Заключение к главе 2

Анализ работ по нечеткой логике показывает, что востребованность исследований в данной области постоянно растет, решается большое количество конкретных прикладных задач [14; 55; 60; 68].

В тоже время, существующие методы являются эмпирическими, не системными, не позволяют использовать весь потенциал нечеткой логики и затрудняют расширение набора задач, которые можно решать с помощью этого аппарата, в частности:

- Основные «классические» операции над нечеткими множествами определены не систематически и не позволяют осуществить вывод нечетких аналогов всех возможных «четких» операций над двумя переменными.
- Развиваемый автором диссертационной работы матричный подход позволяет естественным образом обобщить все 16 операций математической логики для двух аргументов на область нечетких переменных.
- «Классические» методы нечеткого вывода не обладают точным соответствием результата и знаний, заложенных в правилах *modus ponens* или *modus tollens*: они приводят к формальному результату даже в тех областях, про которые исходные правила не содержат никакой информации, и, следовательно, такой результат может оказаться некорректным.
- Ограничения на решения в матричном виде позволяют более точно использовать информацию, заложенную в базу знаний, находить те наборы предпосылок, при которых база знаний не позволяет сделать корректные выводы.
- «Классические» методы нечеткого вывода не позволяют напрямую использовать правило резолюции, для этого требуются дополнительные операции фаззификации и дефаззификации.
- В матричном методе нечеткого вывода есть возможность напрямую использовать правило резолюции, осуществлять без применения дополнительных операций сложные, многоуровневые выводы.

- В «классических» методах нечеткого вывода при реализации на ЭВМ затруднительно учитывать степени нечеткости правил, либо они вообще не учитываются, что лишает аппарат всей его гибкости и функциональности.
- Матричное представление нечеткого логического вывода с использованием векторных предикатов позволяет свести решение задач вывода к решению системы линейных алгебраических уравнений, что дает возможность быстро и наглядно реализовывать сложные алгоритмы управления или поддержки принятия решений.
- Описание нечетких множеств в виде векторных предикатов позволяет упростить разработку программных решений задач нечеткой логики.
- Матричные операции легко обобщаются на область нечетких предикатов.
- Векторное представление степеней истинности следствий правил позволяет легко рассчитывать степень нечеткости результатов с помощью известной формулы Шеннона из теории информации. Это дает возможность не учитывать при выводе правила, обладающие слишком большой степенью нечеткости, и повысить корректность результата.
- Моделирование логических операций в «классических» подходах с помощью операций минимума и максимума не позволяет осуществить обратный вывод исходных предпосылок по известным результатам. Это делает невозможным автоматизированное обучение нечетких систем с помощью алгоритмов обратного распространения ошибки. Матричный подход позволяет производить такое обучение.

ГЛАВА 3. НЕЧЕТКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ АВТОМАТЫ

3.1. Введение к главе 3

Теория нечетких множеств Л. Заде [3], кроме алгоритмов логического вывода, привела к активному развитию моделей «нечетких автоматов с памятью» [22–24] для решения задач анализа ретроспективной информации. В настоящее время для нечетких автоматов построено несколько видов моделей, которые характеризуются наличием нечетких состояний и нечетких переходов между ними [69–71]. При конкретной реализации этих моделей разработчики сталкиваются с некоторыми трудностями, которые препятствуют их широкому применению. Дело в том, что при решении конкретных прикладных задач управления и поддержки принятия решений трудно численно описать нечеткие состояния и сделать выбор их оптимального числа, как это показано в работах [28; 29; 72–75] для четких автоматов и [25; 76; 77] для нечетких автоматов. Другими словами, использование нечетких состояний усложняет анализ предметной области и процедуру расчета выходного сигнала автомата. Автоматы без памяти – комбинационные схемы – не обладают указанным недостатком, но и решать задачи анализа ретроспективной информации не могут.

В связи с этим, научным руководителем автора диссертационной работы М.А. Марценюком в [73] была предложена модель четкого автомата с памятью в виде комбинационной схемы, анализирующей внешний блок памяти, и высказана идея о том, что данный принцип можно применить и в области нечетких логических автоматов.

В данной главе приведена реализация этой идеи, выполненная автором диссертационной работы и опубликованная в [31; 78; 79]. Определяются условия возможности перехода от нечеткого автомата (НА) к модифицированной нечеткой комбинационной схеме (МНКС), анализирующей ретроспективную информацию, содержащуюся во внешнем

блоке памяти (ВБП). Показано, что такое представление позволяет сохранить функциональность нечеткого автомата с конечной памятью (НАКП) но исключить использование понятия нечеткого состояния.

МНКС в каждый момент времени t анализирует содержащуюся во ВБП ретроспективную информацию о входном параметре $x(t)$, взятую в моменты времени $t - k\Delta t$, $k \in \{0, 1, \dots, p\}$. Проблема выбора числа состояний в этом подходе сводится к выбору объема памяти, равного $p + 1$. Также упрощается и выбор функций истинности: они требуются только для описания параметров управляемого объекта, что позволяет добиться большего соответствия нечеткой модели и описываемой предметной области. Кроме того, в этом случае возникает возможность непосредственно использовать известные алгоритмы нечеткого управления и поддержки принятия решений (Глава 2, [4; 19; 37]).

На примере предложенной модели рассматриваются все особенности использования нечеткости в области конечных автоматов и демонстрируются преимущества матричного подхода для уменьшения нагрузок на вычислительные устройства.

Далее описываются алгоритмические модели четкого и нечеткого автоматов с конечной памятью, способы построения аналогичных автоматам модифицированных комбинационных схем, анализирующих текущее содержание внешнего блока памяти.

3.2. Представление «четкого» автомата в виде модифицированной комбинационной схемы

«Четкие» логические автоматы с памятью [28; 29; 72] определяются кортежем $\{x, y, s, F, G\}$, где x - набор значений входных параметров, y - набор значений выходных сигналов, s - набор состояний автомата, а F и G функции переходов и выходов: $s_{t+\Delta t} = F(s_t, x_t)$, $y_t = G(s_t, x_t)$. Автомат

называется конечным, если каждый из его наборов x и y , а также набор состояний s , являются конечными.

В прикладных задачах чаще используются автоматы с конечной памятью (АКП), которые рассмотрены, например, в работе Брауэра [28]. Работа таких автоматов может быть численно описана преобразованием

$$y_t = h(x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t, y_{t-q\Delta t}, \dots, y_{t-2\Delta t}, y_{t-\Delta t}), \quad (41)$$

где $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t$ – значения входного параметра в различные моменты времени; $y_{t-q\Delta t}, \dots, y_{t-2\Delta t}, y_{t-\Delta t}$ – значения выходного сигнала автомата в соответствующие моменты времени; $p, q, q < p$ – конечные положительные целые числа. Легко видеть, что функция выхода конечного автомата (41) может рассчитываться с помощью комбинационной схемы (КС), анализирующей ВБП, хранящий в текущий момент времени t совокупность аргументов функции (41) $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t, y_{t-q\Delta t}, \dots, y_{t-2\Delta t}, y_{t-\Delta t}$.

Далее ограничимся практически более важным случаем, когда отображение (41) имеет вид:

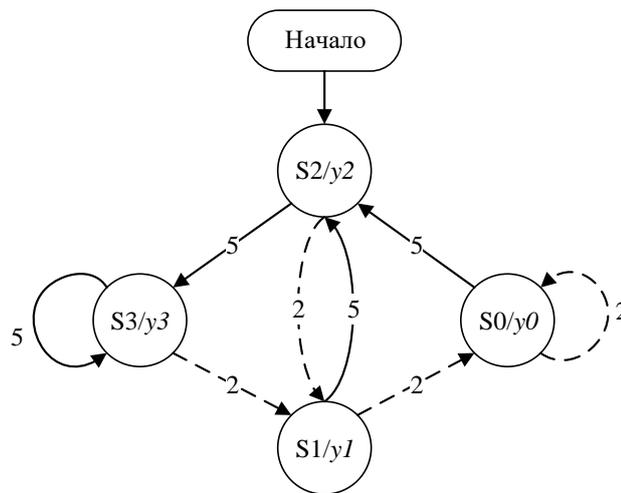
$$y_t = h(x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t). \quad (42)$$

Это значит, что для работы алгоритма в блоке памяти достаточно хранить ретроспективную информацию только о входных параметрах в моменты времени $t - \Delta t > \dots > t - p\Delta t$. Параметр p отвечает за «глубину» памяти. Применение развиваемого подхода для более общего случая (41) будет аналогичным.

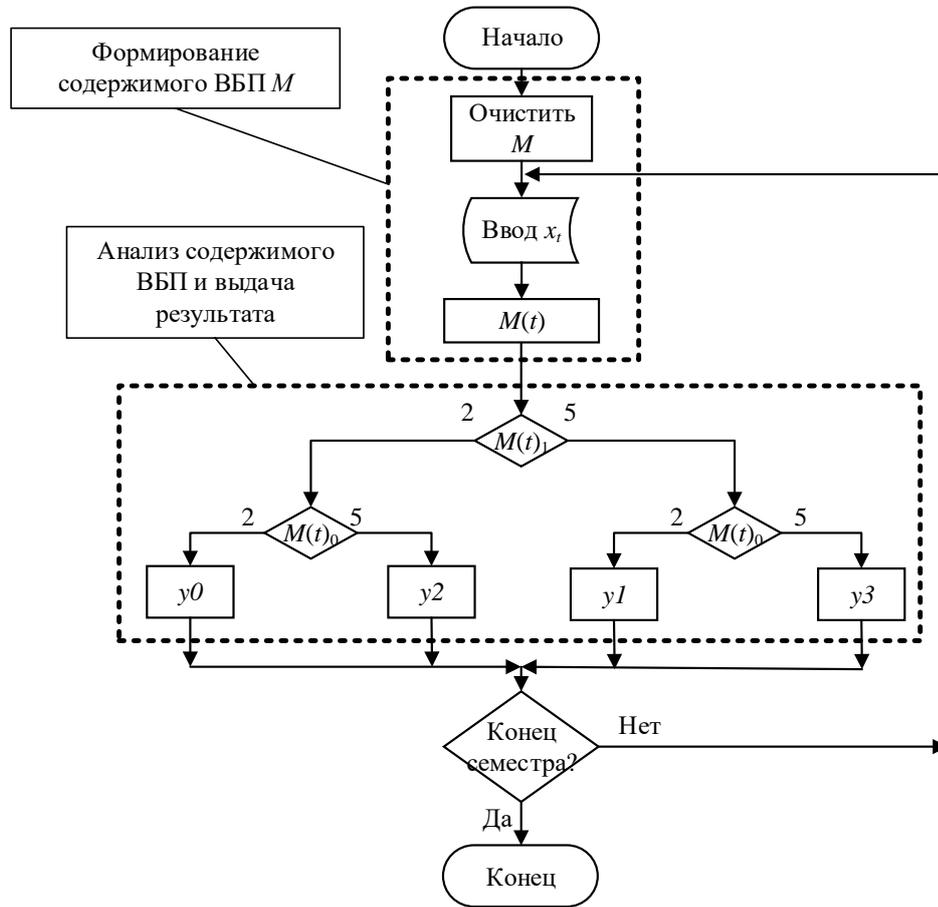
Таким образом, предполагается, что содержанием M ВБП (рисунок 16.б) является последовательность из $p + 1$ входных переменных $M(t) = \{x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t\}$. Содержание памяти M изменяется в порядке очереди по принципу FIFO (первый вошел, первый вышел). Схема анализирует

текущий набор значений входных переменных $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t$ и ставит ему в соответствие определенное значение выходной переменной y_t .

В качестве иллюстрации этого принципа подходит автомат «умный отец» (рисунок 16.а), рассмотренный в книге Ю.Г. Карпова [29]. «Ребенок» может получать оценки $x \in \{2,5\}$. Автомат анализирует историю оценок и предлагает одну из возможных реакций отца: $y0$ - ругать, $y1$ – успокаивать, $y2$ – надеяться, $y3$ – радоваться. В работе [73] предложено представление этого автомата в виде модифицированной комбинационной схемы (рисунок 16.б). Для простоты в данной работе используется модель Мура.



а)



б)

Рисунок 16 – Схема состояний и переходов автомата «умный отец» (а) и блок-схема алгоритма работы соответствующей модифицированной комбинационной схемы (б)

Автомат «умный отец» можно также задать с помощью таблицы переходов между состояниями и выходных сигналов (8).

Таблица 8 – Таблица переходов-выходов «четкого» автомата «умный отец»

x	S			
	$S0$	$S1$	$S2$	$S3$
2	$S0$	$S0$	$S1$	$S1$
5	$S2$	$S2$	$S3$	$S3$
y	$y0$	$y1$	$y2$	$y3$

Путем непосредственной проверки можно убедиться, что в каком бы из состояний $S0, S1, S2, S3$ ни находился автомат в момент времени $t - \Delta t$, при фиксированной последовательности из двух значений входной переменной $x_{t-\Delta t}, x_t$ автомат выдает один и тот же сигнал y_t . Т.е., в данном случае работа

автомата задается отображением $y_t = h(x_{t-\Delta t}, x_t)$, показанным в таблице 9, а глубина памяти составляет 2 значения. Отсюда следует, что автомат может быть реализован в виде комбинационной схемы, анализирующей внешний блок памяти с двумя последними оценками «ребенка» $M(t) = \{x_{t-\Delta t}, x_t\}$ (рисунок 16.б).

Таблица 9 – Зависимость реакции комбинационной схемы «умный отец» от последовательности значений входного параметра x_{k-1}, x_k

$x_{t-\Delta t}, x_t$	Реакция «отца»
2, 2	y_0
5, 2	y_1
2, 5	y_2
5, 5	y_3

3.3. Нечеткий автомат

Модель нечеткого автомата может быть эффективно применена в ситуациях, когда:

1. Предметная область описывается экспертом правилами на естественном языке с использованием лингвистических переменных;
2. Трудно разработать достаточно простую точную математическую модель предметной области;
3. Необходима высокая гибкость в настройках системы управления или поддержки принятия решений;
4. Требуется заменить дискретные значения входных параметров «четкого» автомата на непрерывные без введения дополнительных состояний.

В данной работе предполагается, что нечеткий автомат с конечной памятью (НАКП) работает аналогично некоторому четкому автомату с конечной памятью (АКП) [31; 79]. Как сделано выше, для описания четкого автомата вводятся переменные x, y, s , обозначающие входы, выходы и состояния автомата соответственно, и принимающие значения на конечных

множествах A, B, C ($x \in A, y \in B, s \in C$). Для АКП также задаются функции переходов $s_{t+\Delta t} = F(s_t, x_t)$ и выходов $y_t = G(s_t, x_t)$, например, табличным способом.

При переходе к описанию нечеткого автомата, множества A, B, C считаются «универсальными» множествами для определения нечетких подмножеств, формализующих лингвистические переменные.

Для описания алгоритма работы НАКП вводятся «лингвистические» переменные α, β , описывающие входной и выходной параметры, и γ , описывающая состояние автомата. Переменные α, β и γ принимают значения из наборов термов $\{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_u\}, \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_v\}, \{\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_w\}$. Термы лингвистических переменных $\alpha_i, i \in [0, u], \beta_j, j \in [0, v], \gamma_k, k \in [0, w]$, количественно описываются нечеткими подмножествами введенных выше универсальных множеств A, B, C с помощью функций принадлежности $\mu_{\alpha_i}(x), \mu_{\beta_j}(y)$ или $\mu_{\gamma_k}(s)$.

Переходы между состояниями автомата и значение выходного сигнала выражаются нечеткими автоматными функциями с использованием термов лингвистических переменных

$$\gamma_{t+\Delta t} = \Gamma(\alpha_t, \gamma_t), \beta_t = B(\alpha_t, \gamma_t). \quad (43)$$

Функции переходов Γ и выходов B могут быть заданы табличным способом (пример в [73]). Таблицы совпадают с аналогичными таблицами автоматных функций четкого автомата, но в их ячейках должны стоять соответствующие термы лингвистических переменных. С помощью индексных обозначений и логических операций автоматные функции НАКП задаются следующим образом:

$$\sum_{all\ i,n} \varepsilon_{i,n,m} \alpha_i \wedge \gamma_n \rightarrow \gamma_m; \sum_{all\ i,n} \delta_{i,n,j} \alpha_i \wedge \gamma_n \rightarrow \beta_j, \quad (44)$$

где $\varepsilon_{i,n,m}$ и $\delta_{i,n,j}$ – матрицы переходов и выходов автомата, компоненты которых принимают значения из множества $\{0, 1\}$ в зависимости от заданных

экспертами конкретных логических правил «если ..., то...». В таком же виде могут быть выражены автоматные функции и АКП. Логические связки \wedge , \rightarrow между нечеткими множествами могут быть реализованы по известным правилам, введенным Л. Заде. В случае автомата Мура выходной сигнал определяется только текущим состоянием автомата и правила (44) сводятся к следующему виду:

$$\sum_{all\ i,n} \varepsilon_{i,n,m} \alpha_i \wedge \gamma_n \rightarrow \gamma_m = \mathbf{z}_{i,n,m}; \quad \sum_{all\ n} \delta_{i,n,j} \alpha_i \wedge \gamma_n \rightarrow \beta_j = \mathbf{z}_{i,n,j}. \quad (45)$$

Отметим, что состояния нечеткого автомата описываются с помощью лингвистической переменной γ . Значения этой переменной задаются нечеткими подмножествами универсального множества состояний S , включающего все состояния АКП, и описываются функциями принадлежности $\mu_{\gamma k}(s)$. Поэтому можно сказать, что у НАКП с разной степенью активны сразу все состояния, а степень активности определяется функциями $\mu_{\gamma k}(s)$.

Для численной реализации одного цикла работы НКАП в текущий момент времени t должны быть известны параметры x_t, s_t . Входные и выходные параметры нечеткого автомата, как и у четкого, являются «четкими» числами. Например, показания датчиков и номер операции обслуживания из списка. Отличие автоматов друг от друга состоит в алгоритме преобразования входного сигнала в выходной.

На первом этапе цикла работы нечеткого автомата для заданных значений x_t, s_t с помощью функций $\mu_{\alpha_i}(x_t), \mu_{\gamma_k}(s_t)$ определяются степени истинности нечетких векторных предикатов, формализующих термы α_i, γ_j лингвистических переменных.

В соответствии с формулой (36) вводятся вспомогательные функции $\mathbf{Q}(s), \mathbf{R}(y)$:

$$\mathbf{Q}(s) = \mathbf{D}_{i,n,m} \varepsilon_{i,n,m} \cdot \mathbf{C}(\Gamma^{-1}(\mathbf{C}(\mathbf{x}_{\alpha_i}(x_t)) \cdot \mathbf{s}_{\gamma_m}(s_t)) \cdot \mathbf{z}_{i,n,m}) \cdot \mathbf{s}_{\gamma_m}(s);$$

$$\mathbf{R}(y) = \mathbf{D}_{i,n,j} \delta_{i,n,j} \cdot \mathbf{C}(\Gamma^{-1}(\mathbf{C}(\mathbf{x}_{\alpha_i}(x_t)) \cdot \mathbf{s}_{\gamma_m}(s_t)) \cdot \mathbf{z}_{i,n,j}) \cdot \mathbf{y}_{\beta_j}(y),$$
(46)

где использованы нечеткие векторные предикаты

$$\mathbf{x}_{\alpha_i}(x) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_{\alpha_i}(x) \\ \mu_{\alpha_i}(x) \end{pmatrix}, \mathbf{s}_{\gamma_k}(s) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_{\gamma_k}(s) \\ \mu_{\gamma_k}(s) \end{pmatrix}, \mathbf{y}_{\beta_j}(y) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_{\beta_j}(y) \\ \mu_{\beta_j}(y) \end{pmatrix}.$$
(47)

С помощью этих функций центроидным методом находятся средние значения

$$\bar{s} = \frac{\int_{all S} s \mathbf{Q}(s)_1 ds}{\int_{all S} \mathbf{Q}(s)_1 ds}; \quad \bar{y} = \frac{\int_{all y} y \mathbf{R}(y)_1 dy}{\int_{all y} \mathbf{R}(y)_1 dy},$$
(48)

которые (после округления до целого числа) мы отождествим со значениями параметров s, y в момент времени $t + \Delta t$:

$$s_{t+\Delta t} = \text{round}(\bar{s}); \quad y_{t+\Delta t} = \text{round}(\bar{y}).$$
(49)

На этом завершается цикл работы автомата, и он ожидает поступление на вход следующего сигнала.

3.4. Модифицированная нечеткая комбинационная схема

Алгоритм работы МНКС определяется набором правил вида «Если ..., то ...», сформулированных экспертом на естественном языке с использованием лингвистических переменных α и β , описывающих входной и выходной параметры работы устройства. Введение лингвистической переменной, описывающей состояния устройства или анализируемого объекта, здесь не требуется. Лингвистические переменные принимают значения из наборов термов $\{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_u\}$ и $\{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_v\}$, которые, в свою очередь, количественно описываются векторными предикатами $\mathbf{x}_{\alpha_i}(x), \mathbf{y}_{\beta_j}(y)$

и соответствующими функциями истинности $\mu_{\alpha_i}(x)$ и $\mu_{\beta_j}(y)$. Примеры конкретных функций показаны на рисунках 8, 27, 30. Как и в случае с автоматом, входные и выходные параметры принимают значения на универсальных множествах $x \in A$, $y \in B$. В момент времени t на вход комбинационной схемы подается последовательность значений входного параметра $\alpha_{t-p\Delta t}, \dots, \alpha_{t-\Delta t}, \alpha_t$ за некоторый промежуток времени $(p+1)\Delta t$. Значение выходного сигнала задается некоторой функцией $\beta_t = H(\alpha_{t-p\Delta t}, \dots, \alpha_{t-\Delta t}, \alpha_t)$. Эту функцию можно задать таблицей, как, например, таблица 10. В индексной форме записи эта формула выглядит следующим образом:

$$\beta_j = H(\alpha_{ip}, \dots, \alpha_{i1}, \alpha_{i0}). \quad (50)$$

Зависимость H задается набором правил вида «Если ..., то ...». В терминах логических операций над нечеткими предикатами, и с учетом априорно заданных степеней истинности правил $\mathbf{z}_{ip, \dots, i0, j}$, может быть записана следующим образом:

$$\sum_{\text{all } ip, \dots, i1, i0} \delta_{ip, \dots, i1, i0, j} \alpha_{ip} \wedge \dots \wedge \alpha_{i1} \wedge \alpha_{i0} \rightarrow \beta_j = \mathbf{z}_{ip, \dots, i0, j}. \quad (51)$$

Значения компонент матрицы выходного сигнала $\delta_{ip, \dots, i1, i0, j} = \{0, 1\}$ определяются набором лингвистических правил.

Алгоритмическая реализация МНКС заключается в нахождении параметра y_t по заданной ретроспективной последовательности значений входного параметра $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t$. С использованием значений входного параметра рассчитываются нечеткие предикаты $\mathbf{x}_{\alpha_{ip}}(x_{t-p\Delta t})$. Для вычисления y_t строится вспомогательная функция $\mathbf{V}(y)$, имеющая вид:

$$\mathbf{V}(y) = \mathbf{D}_{ip, \dots, i0, j} \delta_{ip, \dots, i0, j} \mathbf{C}(\Gamma^{-1}(\mathbf{C}(\mathbf{x}_{\alpha_{ip}}(x_{t-p\Delta t}), \dots, \mathbf{x}_{\alpha_{i0}}(x_t)))) \mathbf{z}_{ip, \dots, i0, j} \mathbf{y}_{\beta_j}(y). \quad (52)$$

С помощью этой функции находится среднее значение, например, центроидным методом

$$\bar{y} = \frac{\int_{all\ y} y \mathbf{V}(y)_1 dy}{\int_{all\ y} \mathbf{V}(y)_1 dy}, \quad (53)$$

которое после округления до целого числа, если это необходимо по условию задачи, отождествляется со значением параметра y в момент времени t :

$$y_t = round(\bar{y}). \quad (54)$$

На этом завершается цикл работы МНКС, и она ожидает поступление на вход следующего сигнала.

Сравнение результатов работы и вычислительной сложности моделей произведено в работе [78] на примере, который напрямую не относится к исследуемой здесь предметной области.

3.5. Построение модифицированной нечеткой комбинационной схемы по заданному нечеткому автомату с конечной памятью

Как следует из вышесказанного, для нечеткого автомата с конечной памятью (НАКП) можно построить нечеткую комбинационную схему, анализирующую содержимое внешнего блока памяти (МНКС) [78], результат работы которой при тех же входных данных будет соответствовать результату работы автомата с высокой точностью. В случае дискретного алфавита выходного сигнала, результаты работы алгоритмов будут совпадать.

Для построения МНКС, соответствующей заданному НАКП необходимо найти функцию $\beta_j = H(\alpha_{ip}, \dots, \alpha_{i1}, \alpha_{i0})$ по функциям переходов и выхода автомата. Эта задача может быть решена следующим образом. Считается, что известна функция $y_t = h(x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t)$, описывающая работу МКС, аналогичную АКП, на основе которого построен НАКП. Из-за того, что таблицы переходов четкого и нечеткого автоматов совпадают, совпадают и

функции выходов соответствующих им комбинационных схем. Другими словами, запись функции (50) в табличном виде (51) в точности совпадает с соответствующей таблицей для четкой комбинационной схемы.

Таким образом, переход от НАКП к МНКС можно описать следующими шагами.

- На основании базы знаний, описывающей работу НАКП, сформулировать автоматные функции переходов между состояниями и выходов на языке лингвистических переменных.
- Данные автоматные функции будут описывать работу соответствующего четкого автомата с конечной памятью, если в них заменить лингвистические переменные на четкие номера состояний и выходов.
- Переформулировать автоматные функции в виде функций зависимости выходов автомата от входных параметров. Это можно сделать простым перебором всех возможных комбинаций значений входных параметров.
- Поставить в соответствие полученным четким зависимостям нечеткие лингвистические правила путем описания терминами лингвистических переменных значений входных параметров и выходных сигналов автомата без изменения состава и структуры этих зависимостей.
- С использованием полученных лингвистических правил построить нечеткий логический алгоритм, анализирующий историю изменения входных параметров. Здесь могут быть применены как «классические» варианты реализации нечетких алгоритмов [8; 14; 21; 60], так и матричный подход (глава 2).

Численное сравнение подходов на конкретном прикладном примере подробно рассмотрено в работе [78]. Данный пример не включен в работу в связи с тем, что напрямую не относится к рассматриваемой предметной области.

3.6. Выводы к главе 3

Разработана новая алгоритмическая модель для анализа ретроспективной информации в виде модифицированной нечеткой комбинационной схемы, анализирующей внешний блок памяти, позволяющая упростить описание предметной области экспертами и уменьшить аппаратные требования алгоритмов.

Использование модели помогло выявить и акцентировать основные недостатки подхода автоматов с памятью, в частности, проблему выбора количества состояний и их описания, проблему описания нечетких переходов между состояниями.

Показано, что вместо нечеткого автомата с конечной памятью можно построить модифицированную нечеткую комбинационную схему, при этом результирующие сигналы автомата и схемы совпадают с высокой точностью. И нечеткие автоматы, и нечеткие комбинационные схемы обладают большей гибкостью в настройках и более широкой областью возможных значений входных параметров по сравнению с «четкими» автоматами.

Дополнительно, МНКС обладают большей простотой реализации по сравнению с НА, так как при расчетах в рамках этих моделей можно напрямую применять как широко известные «классические» алгоритмы нечеткого логического вывода, так и матричное представление нечеткого вывода с использованием нечетких предикатов. При этом быстродействие МНКС оказывается выше, чем быстродействие НАКП за счет сокращения числа необходимых процедур дефаззификации.

Модель МНКС позволяет перейти от рекурсивного и, потенциально, бесконечного анализа состояний автомата к анализу конечной последовательности входных сигналов. При этом исключается необходимость выбора и описания состояний.

Проблема поиска минимального количества состояний автомата теперь сводится к выбору глубины хранения или объема блока памяти, что

обеспечивает более гибкую и интуитивно понятную процедуру описания предметной области.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА

В предыдущих главах предложены модели и алгоритмы, необходимые для построения системы интеллектуальной поддержки принятия решений при обслуживании технологического оборудования ДНГ. Предлагаемая СППР призвана минимизировать вероятность принятия неадекватных мер по корректировке режимов и устранении сбоев в работе оборудования, что, в свою очередь, должно повысить время бесперебойной работы оборудования, количество добываемой нефти, сократить стоимость ремонтов. Для определения корректности работы предлагаемых моделей и алгоритмов разработанная СППР реализована и внедрена в рамках пилотного проекта на существующее предприятие, занимающееся добычей нефти и газа, по итогам которого выполнена оценка эффективности работы системы.

4.1. Проект информационной системы

Для разработки эффективной информационной системы необходимо предварительно построить ее проект или логическую модель, которая, как минимум должна включать в себя следующие разделы:

- состав системы, определяемый номенклатурой составных частей системы и требованиями к общему функционированию, а также модель структуры системы - связей между компонентами;
- описание процессов функционирования системы;
- модель потоков информации, раскрываемое через описание всех потоков информации, проходящих через систему, начиная от ввода из внешних систем или от пользователя, через необходимые

промежуточные преобразования до вывода результатов работы системы пользователю и передачи в смежные информационные системы.

4.1.1. Варианты использования системы

Основные варианты использования оператором мобильного приложения для автоматизации процессов обслуживания оборудования ДНГ приведены на рисунке 17.

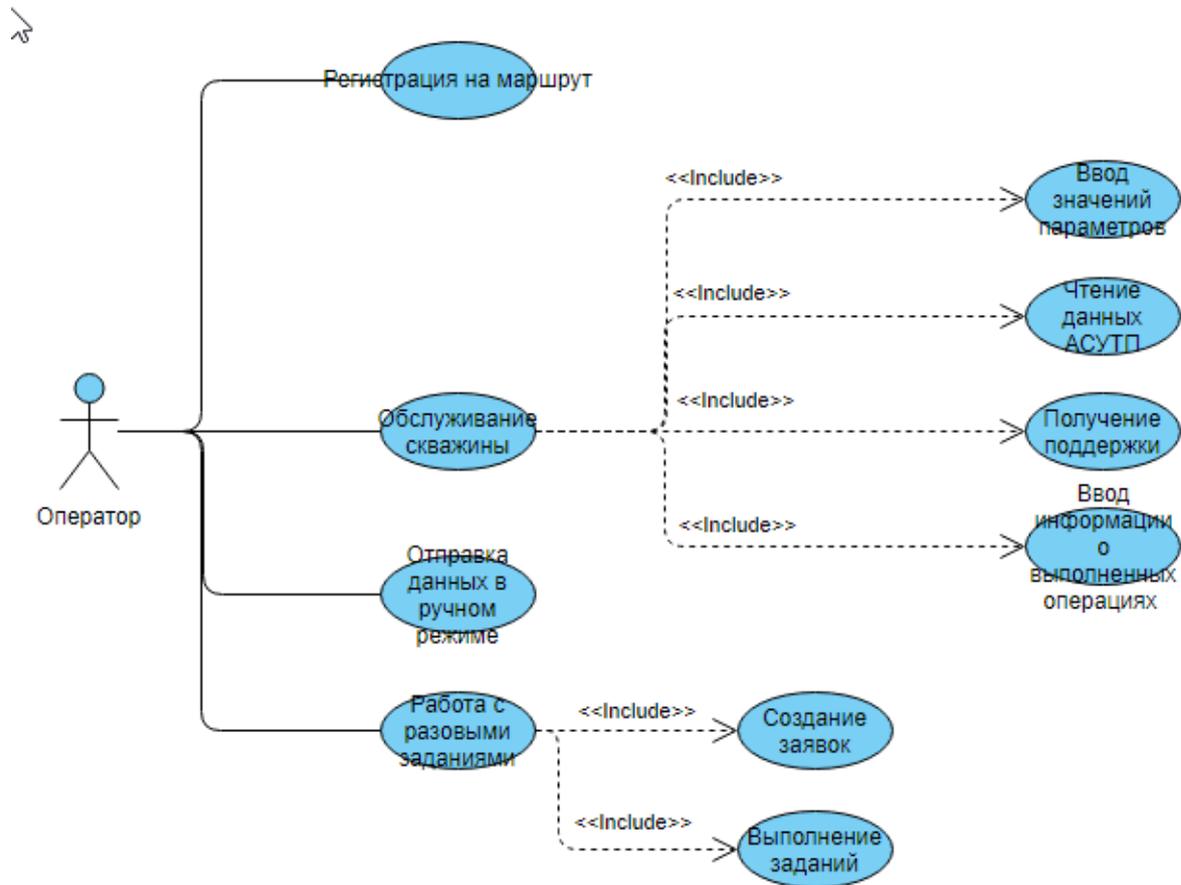


Рисунок 17 – варианты использования мобильного приложения оператора

Варианты использования, выполняемые автоматически по таймеру или при подключении к интернету, приведены на рисунке



Рисунок 18 – варианты использования мобильного приложения оператора, выполняемые автоматически

Администрирование системы, актуализация справочников, контроль работы операторов выполняются на серверной части.

4.1.2. Структура системы

Структура информационной системы для поддержки принятия решений при обслуживании технологического оборудования ДНГ в целом, связи со смежными информационными системами приведены на рисунке 19. Структура приложения для оператора («МИРМ Оператора»), построенная по двухуровневой иерархической схеме АСУ ТП [80], приведена на рисунке 20.

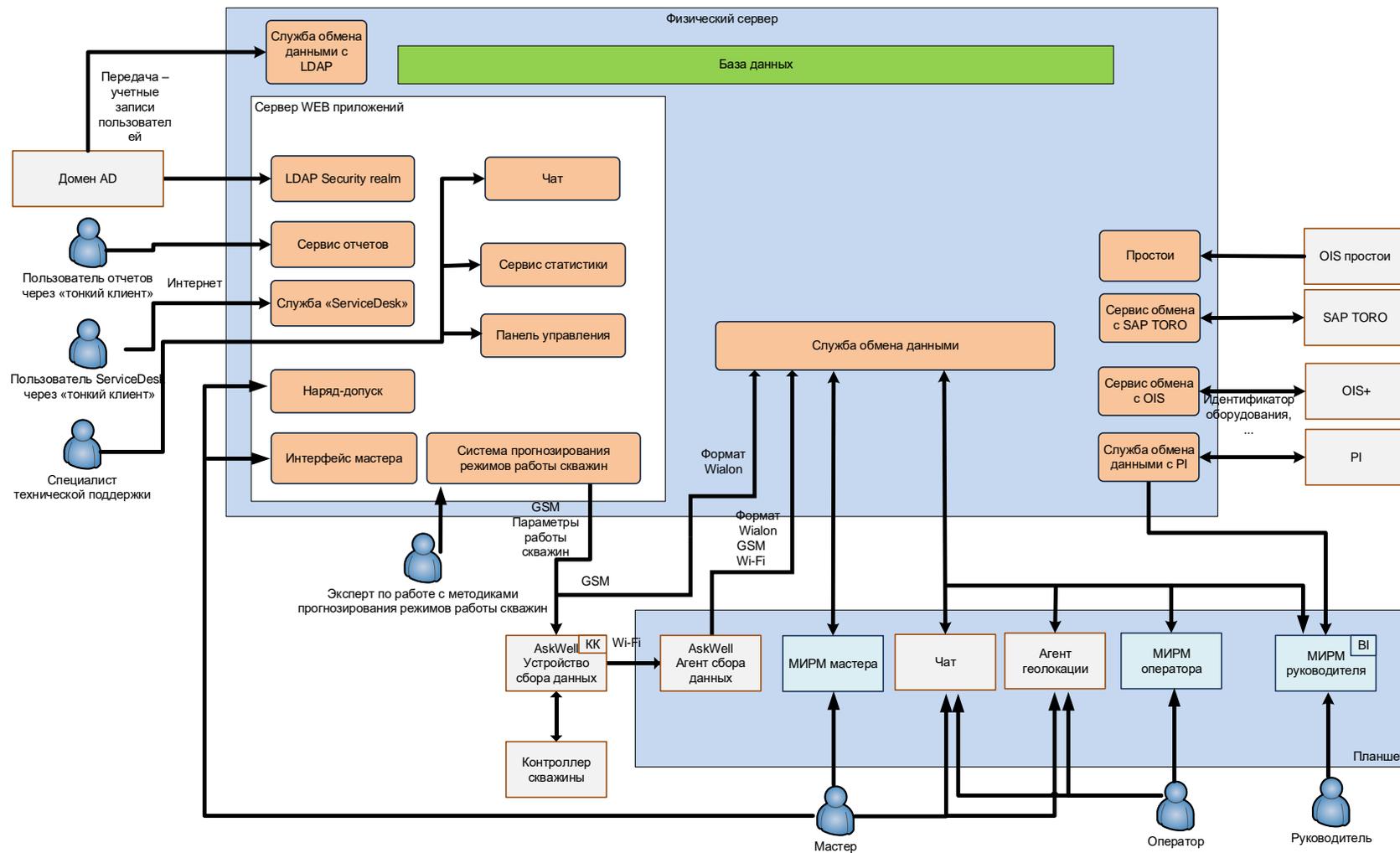


Рисунок 19 – Поток данных между компонентами информационной системы для автоматизации процессов обслуживания технологического оборудования ДНГ и между смежными системами

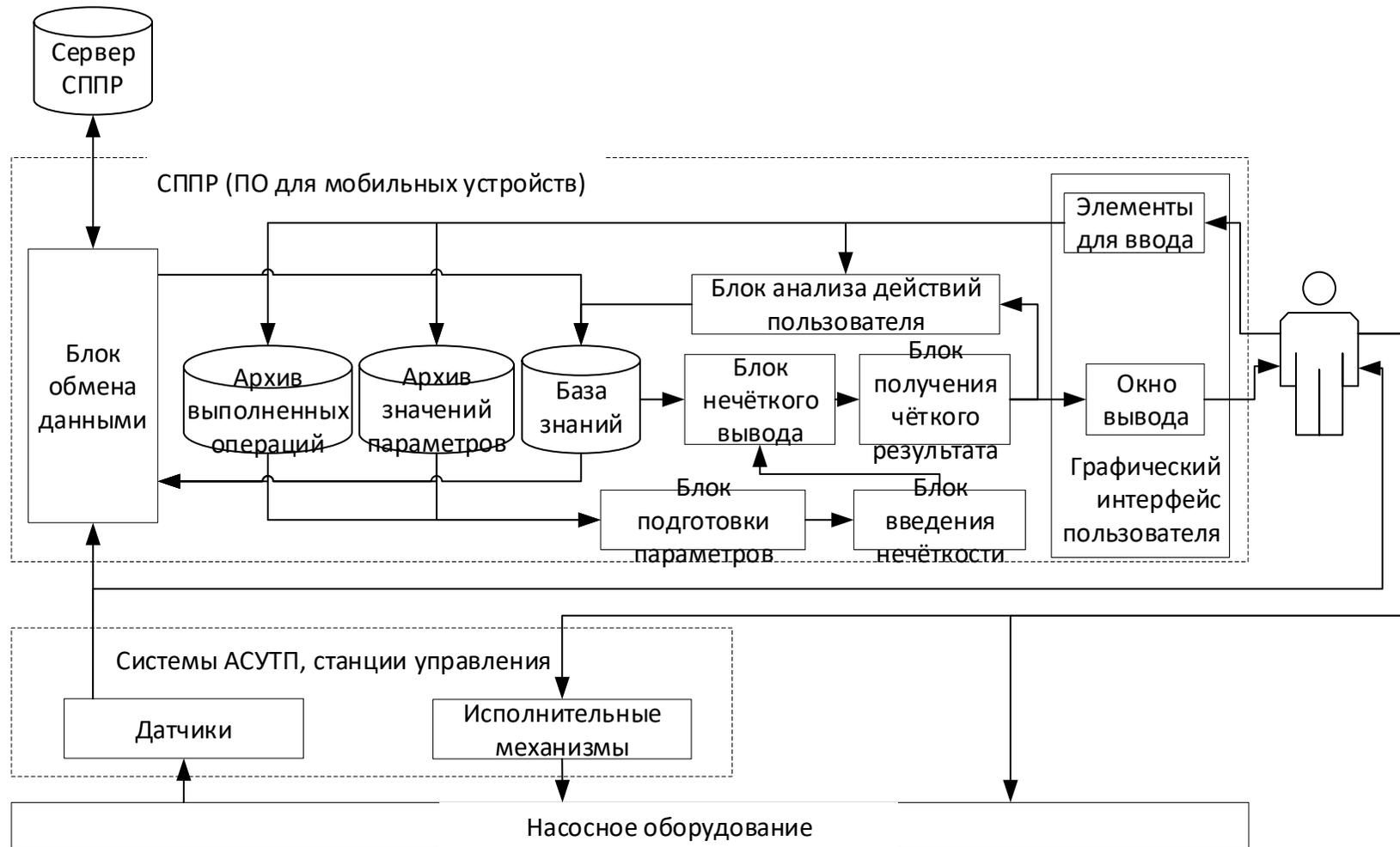


Рисунок 20 – Диаграмма структуры и потоков информации мобильного приложения, реализующего функционал СПДР

Контроллерный уровень системы, состоящий из средств локальной автоматизации, отвечает за применение управляющих воздействий на технологическое оборудование и измерение его текущих параметров работы. Уровень состоит из нескольких блоков.

- датчики, предназначенные для сбора информации и оценки текущего состояния насосного оборудования и процесса добычи в целом;
- исполнительные механизмы (станции управления), непосредственно отвечающие за частоту вращения двигателей, включение и отключение оборудования;
- контроллеры, обрабатывающие поступающую от датчиков информацию и формирующие управляющие воздействия на исполнительные механизмы, а также передающие информацию на верхний уровень системы.

Кроме технических средств управления часть задач сбора информации и операций обслуживания в процессе работы технологического оборудования ДНГ осуществляется оператором вручную, например, снятие показаний со стрелочных манометров, внешний осмотр, выполнение операций прочистки и устранения повреждений.

Свойства логических элементов контроллерного уровня заранее заданы производителями оборудования и не могут быть оперативно изменены, т.к. они являются неотъемлемой частью технологического оборудования ДНГ [80]. В тоже время, само оборудование (тип насоса, АСУТП) может варьироваться в зависимости от скважины. Контроллерный уровень не обладает какими-либо специфическими факторами, влияющими на разрабатываемые алгоритмы интеллектуальной части СППР. Учет возможных вариаций оборудования АСУТП и станций управления реализуется отдельными интеграционными алгоритмами и выходит за рамки настоящей работы.

Верхний (интеллектуальный) уровень системы отвечает за обмен данными со смежными системами, взаимодействие с пользователем,

реализацию описанной в предыдущих главах интеллектуальной обработки информации об изменениях в состоянии оборудования, получение новых знаний из реально предпринятых оператором действий и соответствующих откликов оборудования.

Интеллектуальный уровень СППР реализован в виде ПО для мобильных устройств и представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. В его состав входят следующие основные элементы.

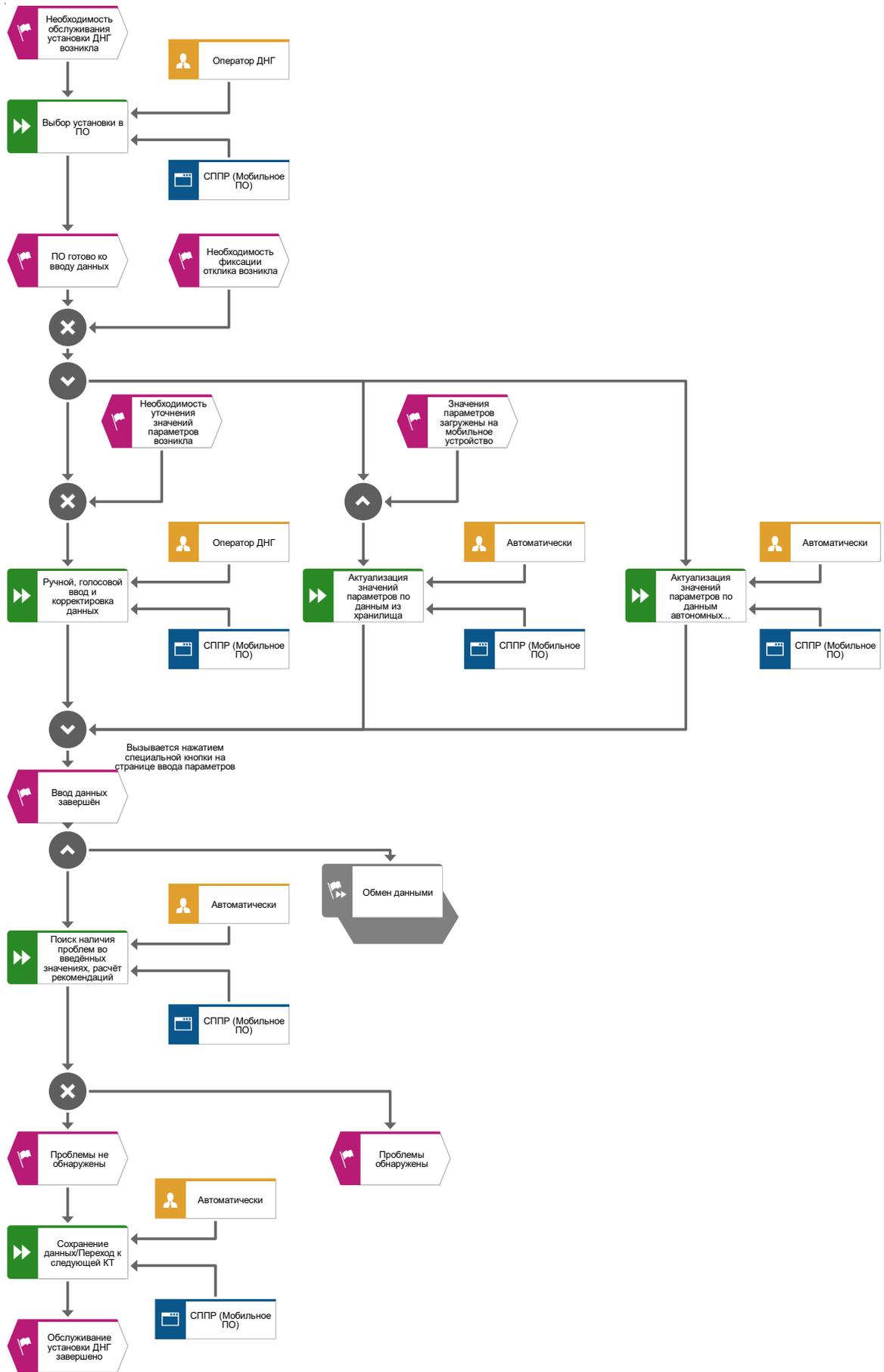
- База данных, содержащая информацию об истории изменения значений параметров работы технологического оборудования, плановых (уставочных) значений параметров, истории выполненных операций обслуживания.
- База знаний, содержащая правила для нечеткого логического вывода.
- Блок расчета степеней применимости и адекватности возможных решений, состоящий из подготовки данных, введения нечеткости, логического вывода и получения четкого результата.
- Графический интерфейс пользователя, позволяющий указывать обслуживаемую установку, вводить данные о текущем состоянии оборудования, которые нельзя получить автоматически через каналы связи АСУТП, и выводить информацию о необходимости выполнения тех или иных операций обслуживания.
- Блок обмена данными со смежными системами, позволяющий автоматически получать собираемые АСУТП значения параметров оборудования и их историю, синхронизировать базу знаний с центральной версией на сервере, отправлять в хранилища данных введенные пользователем вручную значения параметров и данные о выполненных операциях.

4.1.3. Структура данных предметной области

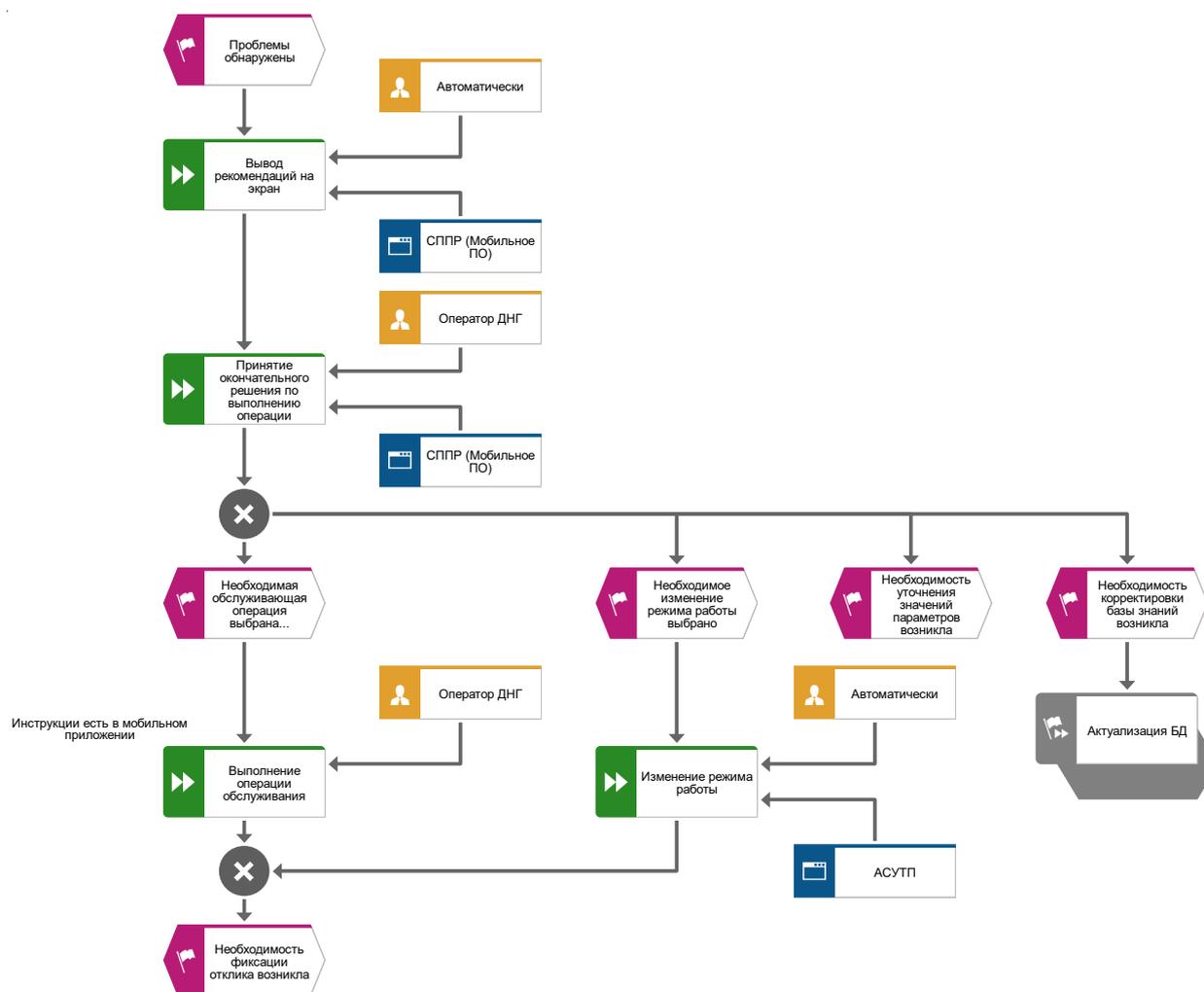
Для корректной работы с данными предметной области, построена модель в виде диаграммы классов, рисунок 21. Для сокращения объема исходного кода активно используется наследование.

4.1.4. Процессы функционирования системы

Функционирование системы, по большей части, может быть представлено двумя процессами: обслуживание оборудования и обмен данными. Диаграмма процесса обслуживания технологического оборудования ДНГ с использованием СППР приведена на рисунке 22.



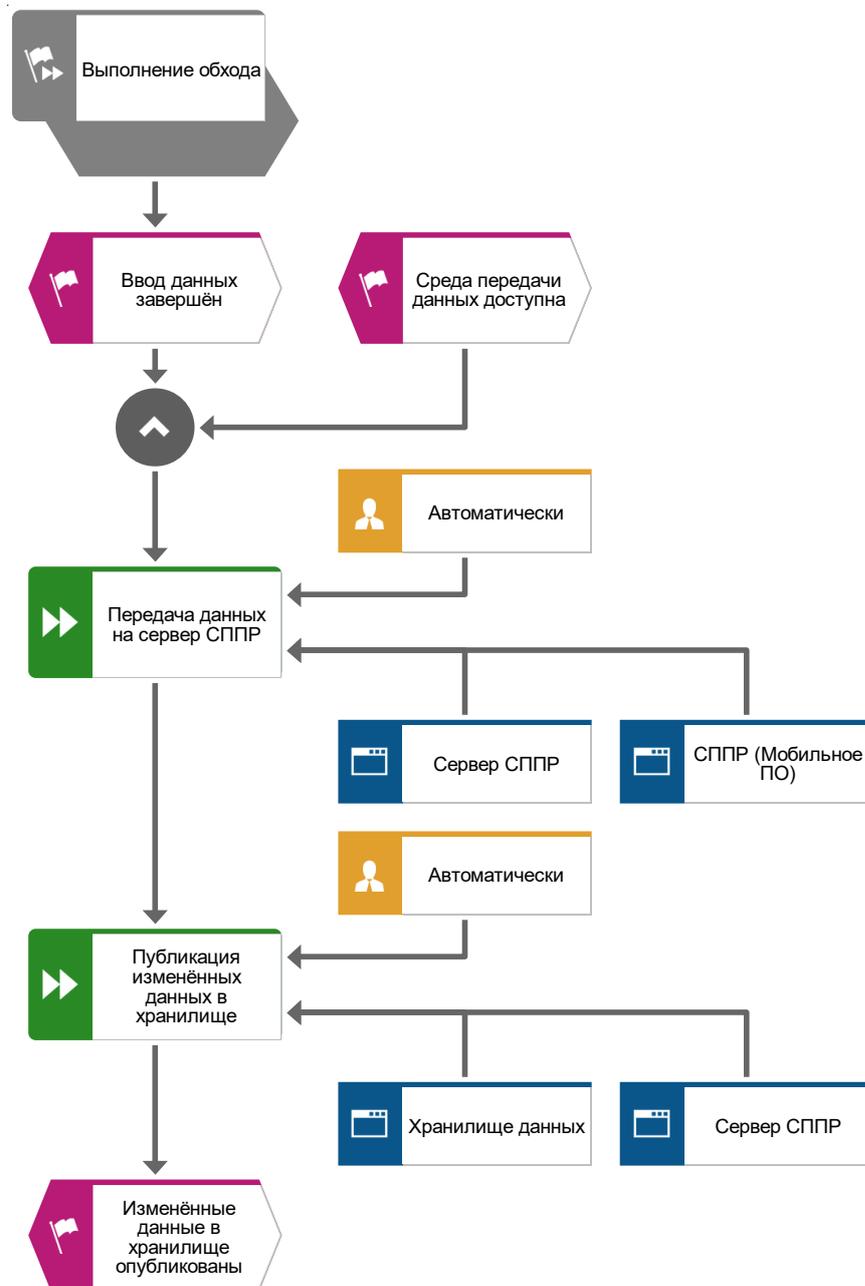
a)



б)

Рисунок 22 – Диаграмма процесса обслуживания технологического оборудования ДНГ с использованием СППР а) в части ввода значений параметров и б) в части обработки проблем

Диаграмма процессов обмена данными между мобильной и серверной частью СППР приведена на рисунке 23.



б)

Рисунок 23 – Диаграмма процессов обмена данными между мобильной и серверной частью СППР а) в части передачи данных с сервера на мобильное устройство и б) в обратную сторону

Диаграмма процесса централизованной актуализации БЗ при появлении новых знаний с учетом верификации в службе технологов показана на рисунке 24.

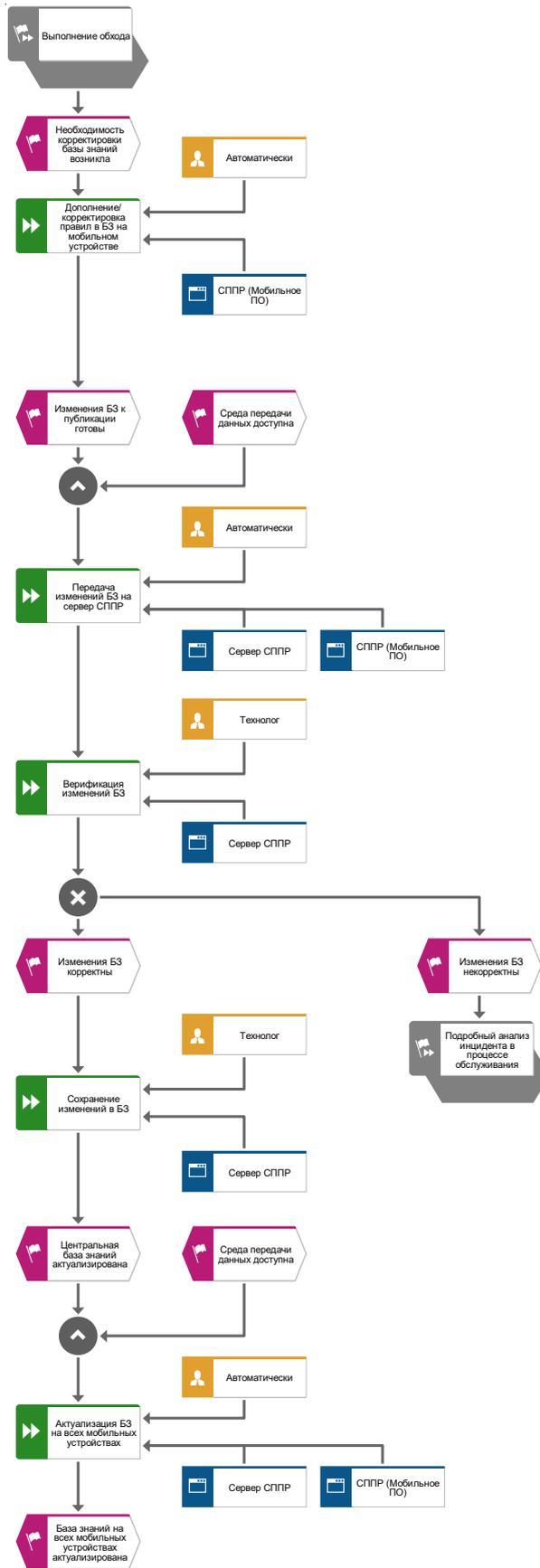


Рисунок 24 – Диаграмма процесса централизованной актуализации базы знаний с учетом верификации изменений службой технологов

4.1.5. Основные потоки информации

Основными потоками информации в СППР являются поток знаний (рисунок 25) и поток значений параметров работы технологического оборудования ДНГ (рисунок 26).

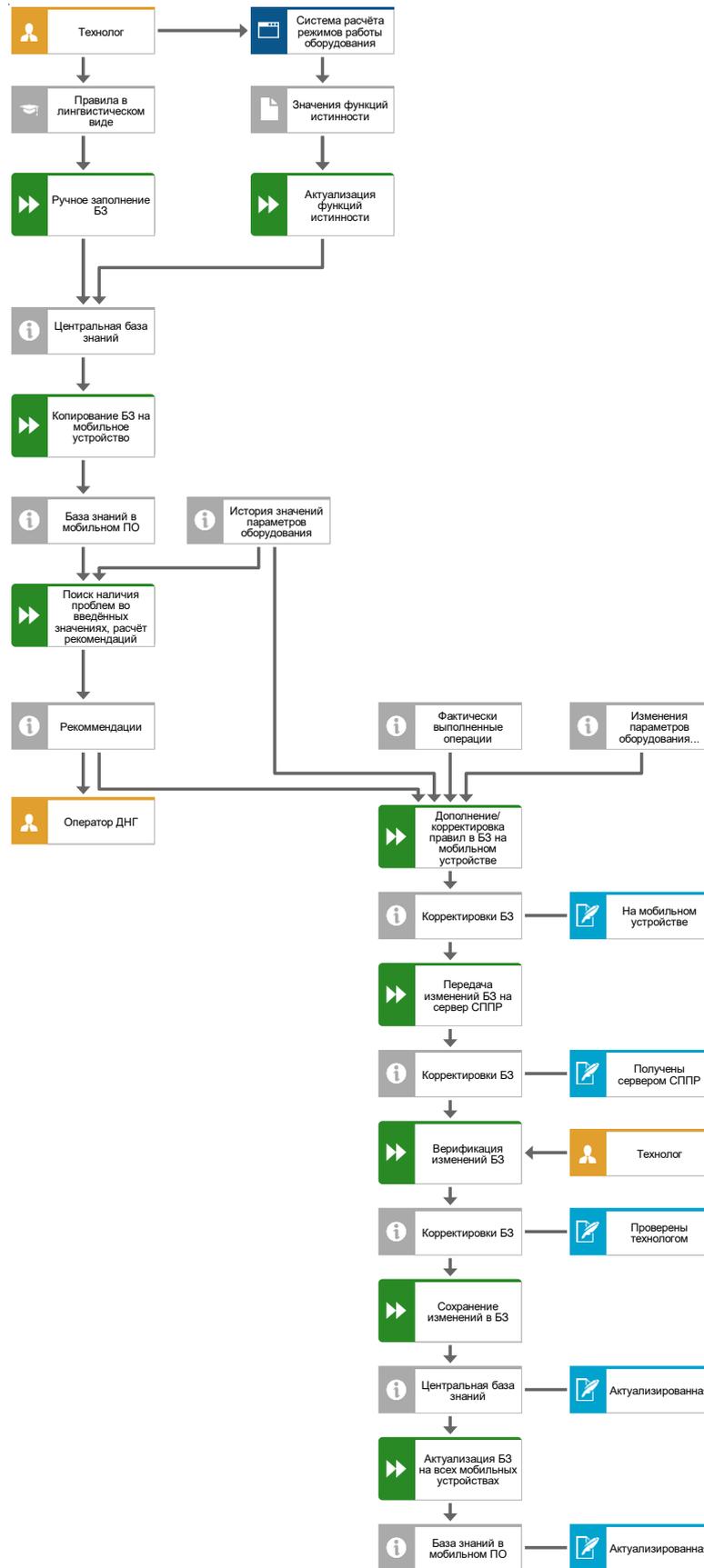


Рисунок 25 – Диаграмма потока знаний в системе ППР при обслуживании технологического оборудования ДНГ

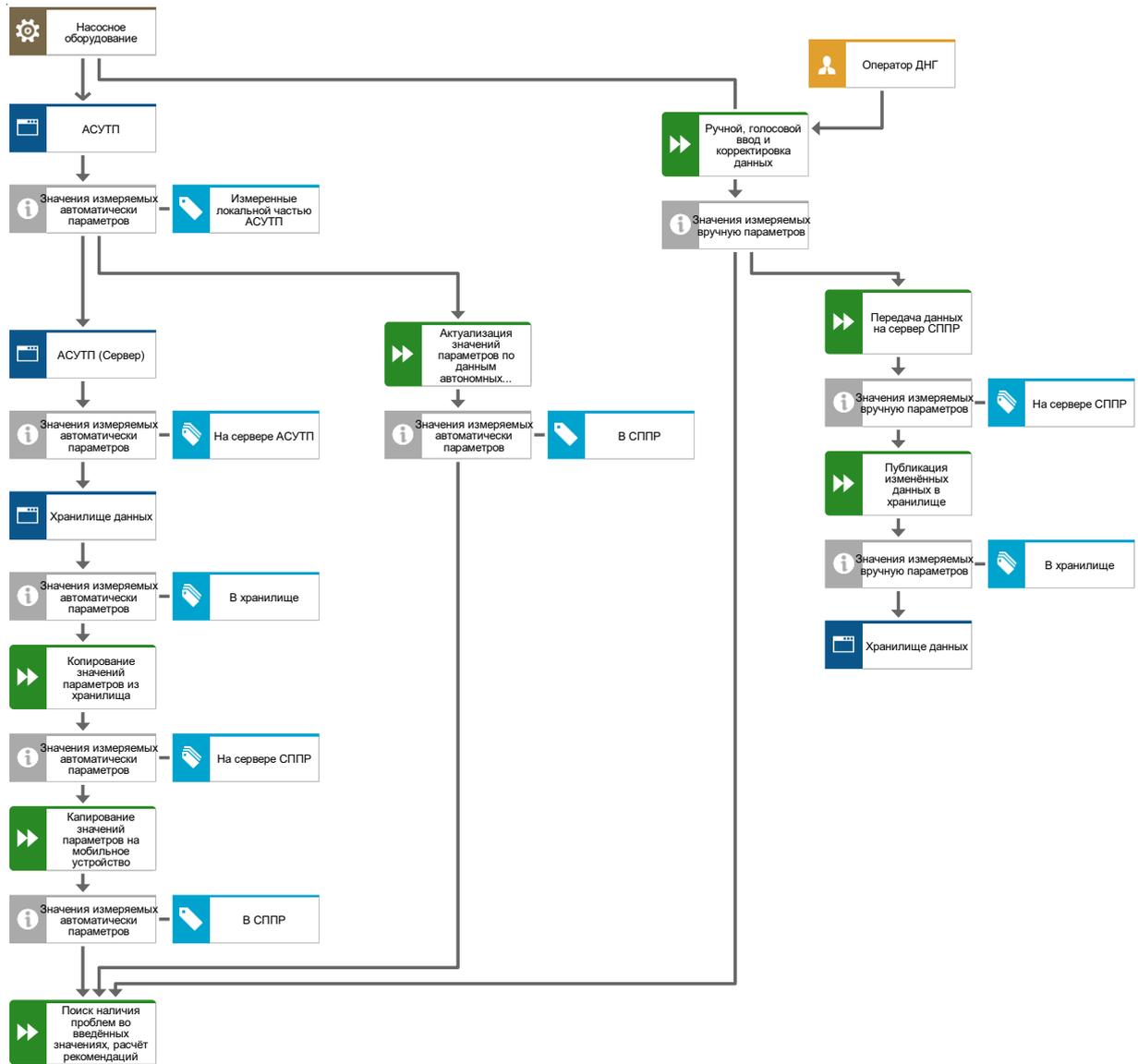


Рисунок 26 – Диаграмма потока значений параметров работы технологического оборудования ДНГ

4.1.6. Модель интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Как было описано в главе 1 для построения интеллектуального алгоритма вывода в данной предметной области наименее затратно использовать аппарат нечеткой логики. Для построения эффективных и адекватных нечетких алгоритмов лучше использовать матричный аппарат нечеткой логики (глава 2), а для анализа истории изменения параметров – модель нечеткого логического автомата в виде комбинационной схемы и внешнего блока памяти (глава 3).

Для полного описания работы нечеткой системы необходимо формализовать несколько пунктов.

В качестве **входных параметров** нечеткого алгоритма используются параметры работы оборудования, перечисленные в таблице 2, и история их изменения.

В **результате** работы нечеткого алгоритма требуется получить оценку необходимости выполнения операций обслуживания, перечисленных в таблице 3, в % от максимальной.

Для моделирования связи между входными и выходными параметрами необходимо создать **базу знаний** – набор правил вида «Если ..., то ...». В ходе решения поставленной задачи произведен опрос экспертов мастеров и технологов. Для минимизации субъективности знаний в опросе принимали участие несколько экспертов. Полученные в результате этого опроса знания оформлены в виде электронной таблицы, фрагмент которой приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Фрагмент базы знаний

Нагрузка, ПЭД	Загрузка, ПЭД	Дебит жидкости	Пропарка АГЗУ	Ревизия АГЗУ	Операция
не изменялись	не изменялись	снижение	Не проводилась	-	Пропарка АГЗУ
не изменялись	не изменялись	снижение	Проводилась	-	Ревизия АГЗУ
не изменялись	не изменялись	снижение	Проводилась	Проводилась	Опрессовка НКТ
Уменьшение на 5% от рабочей	Уменьшение на 5% от рабочей	снижение	-	-	Встряхивание изменением частоты
Уменьшение на 10% от рабочей	Уменьшение на 10% от рабочей	снижение	-	-	Встряхивание вращением
Увеличение нагрузки	Увеличение до 120%	снижение	-	-	Встряхивание изменением частоты и вращением

Текстом эти правила можно сформулировать, например, так: «Если произошло снижение дебита жидкости, при этом загрузка и нагрузка ПЭД не

изменились, пропарка или ревизия АГЗУ не производились, то необходимо провести пропарку АГЗУ».

При этом эксперты сформулировали примерные пределы изменения значений параметров точными числами, пример в таблице 11.

Таблица 11 – Пример формулировки допустимого интервала отклонений, полученного от экспертов

Изменение текущего дебита жидкости в зависимости от среднего дебита за неделю:
 $Q_{ж} \leq 5$ - +/- 2 м3/сут., но не более 50%
 $5 < Q_{ж} \leq 20$ - +/- 30 %
 $20 < Q_{ж} \leq 50$ - +/- 20 %
 $Q_{ж} > 50$ - +/- 10 %.

Как видно из приведенной формулировки, нужно дополнительно анализировать средний уровень дебита жидкости за неделю, а также для формирования более точных предложений ввести нечеткие предикаты, описывающие величины отклонений значений параметров от средних. Некоторые из **функций истинности**, используемые в нечетком алгоритме, приведены на рисунках 27-30.

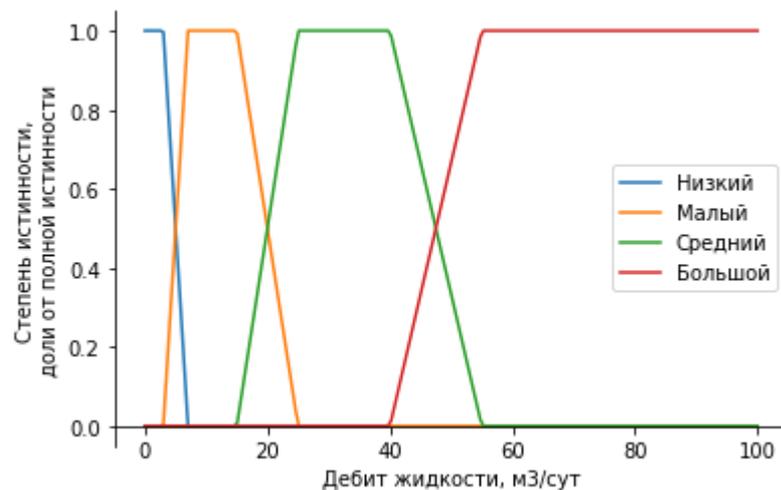


Рисунок 27 – функции истинности нечетких предикатов для описания величины суточного дебита жидкости

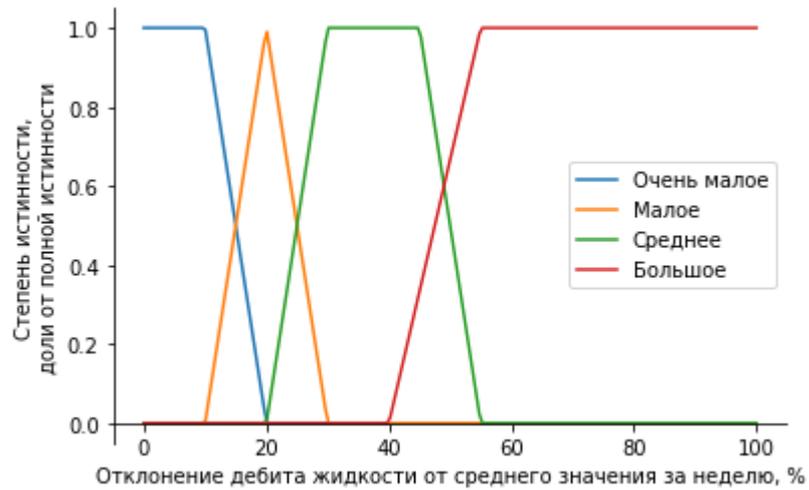


Рисунок 28 – функции истинности нечетких предикатов для описания величины отклонения суточного дебита жидкости от среднего значения

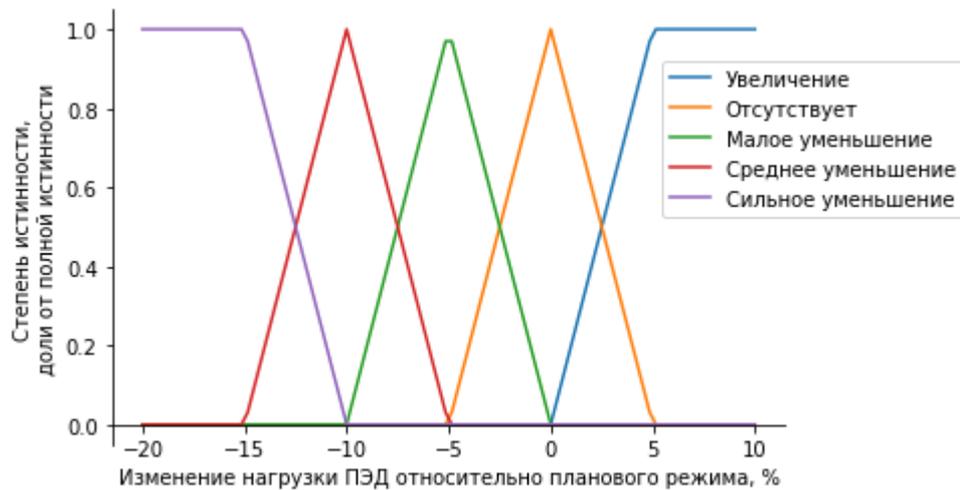


Рисунок 29 – изменение нагрузки ПЭД относительно планового значения

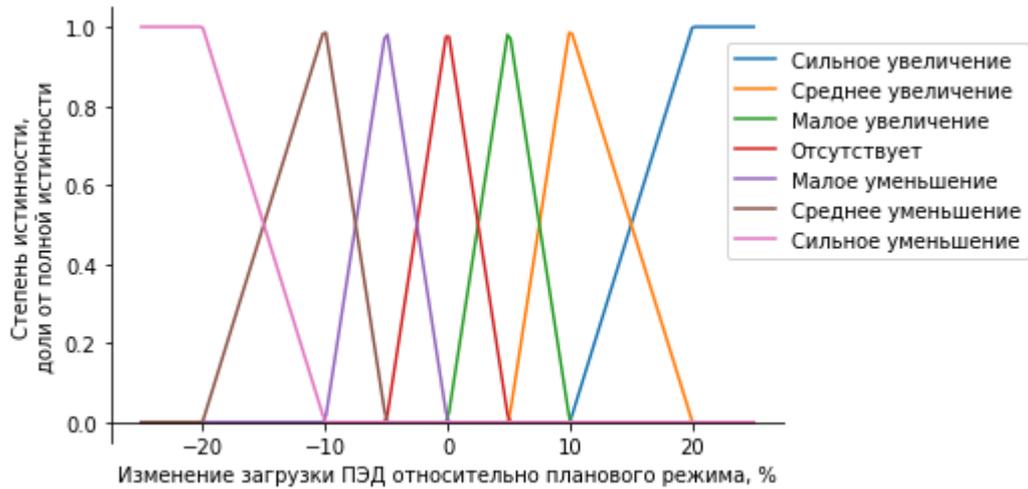


Рисунок 30 – изменение загрузки ПЭД относительно планового значения

Алгоритм получения четкого результата. Как показано в описании матричного нечеткого логического вывода, его результатом являются нечеткие вектора y_i , которые означают степень реализации логических правил. Далее для получения четкого результата в задачах классификации можно напрямую использовать вектора y_i в качестве степеней принадлежности к классам, а в задачах формирования регрессий необходимо дополнительно применять алгоритмы дефаззификации. Решаемая в данной работе задача является задачей классификации – отнесение необходимого для выполнения действия оператора к одному из известных классов – всех возможных действий, производимых операторами. Поэтому при реализации СППР напрямую используются истинностные координаты векторов y_i .

4.2. Описание программы для ЭВМ «Мобильное рабочее место оператора (МИРМ оператора)»

Реализация полного автоматического управления процессом обслуживания технологического оборудования ДНГ в текущих условиях является весьма ресурсозатратной задачей. В частности, для принятия максимально объективных решений требуется визуальный осмотр оборудования, а для выполнения некоторых операций обслуживания – ревизии/замены элементов, пропарок и промывок – требуется привлечение

специальных сервисных бригад. Технологии для выполнения данных операций автоматически существуют, например, визуальный осмотр можно производить с помощью коптеров, а замену оборудования – с помощью роботов, но применение этих методов в данный момент является экономически не целесообразным. Поэтому автоматизируются только процедуры сбора измеряемых параметров, управления режимами работы насосного оборудования, выработки управляющих решений. Автоматизировать последнюю предлагается с помощью применения СППР в виде разработанной программы для мобильных ЭВМ «МИРМ Оператора» [81].

4.2.1. Характеристики ПО «МИРМ Оператора»

В таблице 12 приведены основные характеристики разработанного ПО «МИРМ Оператора».

Таблица 12 – Основные характеристики ПО «МИРМ Оператора»

Среда разработки	Android studio 3.5
Язык разработки	Java 1.7, Java 1.8, Kotlin 1.3.61
Операционная система	Android 4.4 и выше
Размер исполняемого файла	11,5 Мб
Используемые архитектурные компоненты	Dagger, Room, LiveData, DataBinding
Компоненты для обмена данных с серверной частью	Retrofit, Moshi, OkHTTP
Протокол обмена данными с серверной частью	HTTP REST
Формат данных для обмена с серверной частью	Json
Обмен данными с системами АСУТП	Ручной ввод с датчиков. Через сервер, REST API, прямое подключение к витринам данных СУБД.

4.2.2. Программная реализация алгоритмов нечеткого вывода в ПО «МИРМ Оператора»

Для реализации алгоритмов выработки рекомендаций в модуле СППР ПО «МИРМ Оператора» разработаны несколько классов, логическая модель которых показана на рисунке 31.

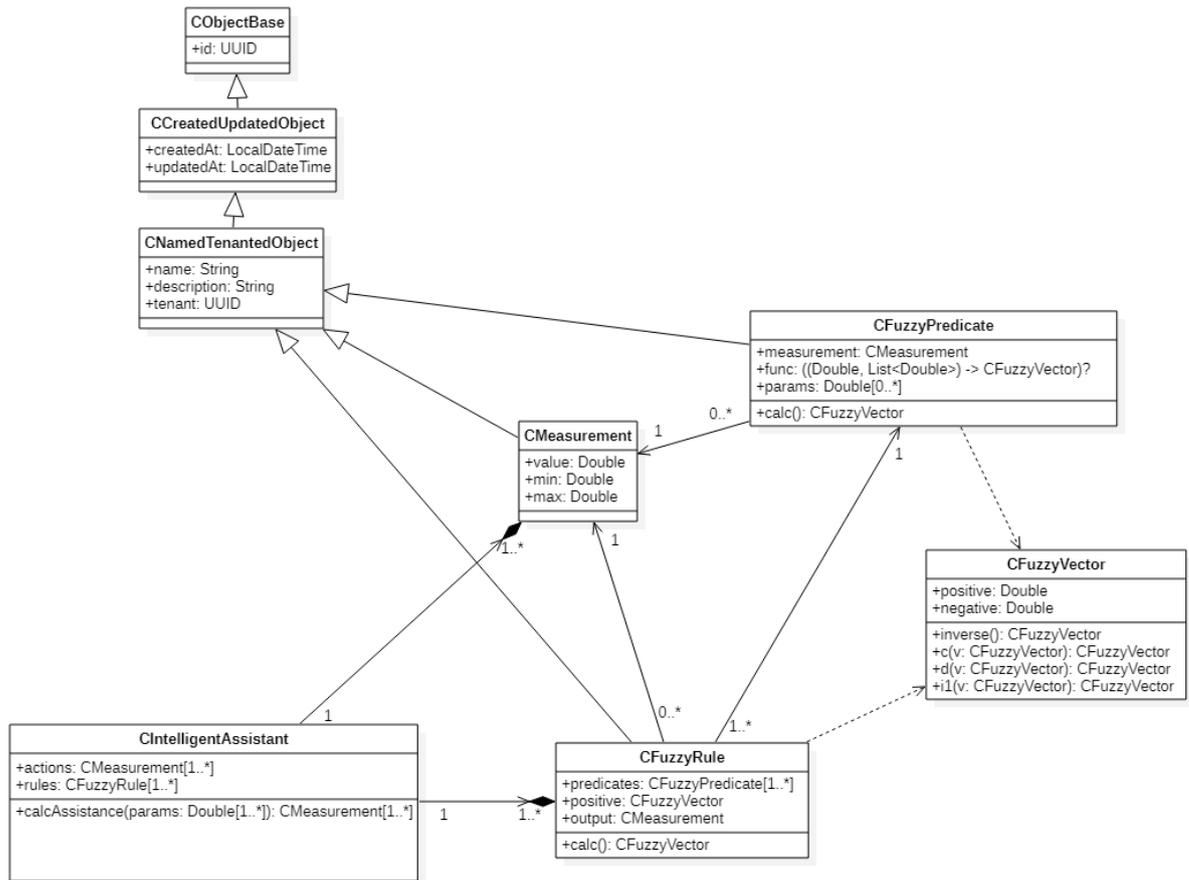


Рисунок 31 - Внешний вид интерфейса ПО «МИРМ» в режиме выбора оборудования для обслуживания

Класс `CMeasurement` описывает измеренное или предварительно рассчитанное значение одного параметра работы оборудования (универсальное множество и текущее значение).

Класс `CFuzzyVector` описывает нечеткую векторную переменную, содержит атрибут `positive` – степень истинности, а также методы для численной реализации нечетких логических операций: конъюнкции, дизъюнкции и обратной импликации, листинг 1.

Листинг 1 – Программная реализация матричных моделей нечетких логических операций на языке Kotlin

```

//Дизъюнкция
fun d(v: CFuzzyVector) : CFuzzyVector
{
    return CFuzzyVector(positive + v.positive - positive *
v.positive)
}
//Конъюнкция
fun c(v: CFuzzyVector) : CFuzzyVector
{
    return CFuzzyVector(positive * v.positive)
}
//Обратная импликация (для вывода)
fun il(v: CFuzzyVector) : CFuzzyVector
{
    var ret = 0.0
    if (test(v))
    {
        ret = 1 - v.negative/positive
    }
    return CFuzzyVector(ret)
}

```

Класс `CFuzzyPredicate` описывает нечеткий предикат, определенный на универсальном множестве `measurement`. Функция истинности предиката задается переменной `func`, а все ее параметры – переменной `params`. Такое описание функции и ее параметров позволяет задавать отдельно вид функции – треугольник, трапеция, Гауссова, ступени и т.д., и отдельно конкретные координаты узловых точек этой функции. Т.е. сокращается необходимое количество кода для описания системы. Также класс `CFuzzyPredicate` содержит метод `calc()`, который позволяет рассчитать значение предиката при заданном значении параметра `measurement`, листинг 2.

Листинг 2 – Программная реализация метода расчета значения нечеткого векторного предиката на языке Kotlin

```
fun calc() : CFuzzyVector
{
    func?: return CFuzzyVector(0.0)
    measurement?: return CFuzzyVector(0.0)
    params?: return CFuzzyVector(0.0)
    return func!!.invoke(measurement!!.value, params!!)
}
```

Класс `CFuzzyRule` описывает одно правило нечеткого логического вывода. Содержит список предикатов `predicates`, которые объединяются в предпосылку правила с помощью конъюнкции. Дизъюнкцию можно реализовать созданием нескольких правил. Также класс `CFuzzyRule` содержит степень истинности правила `positive` и информацию об области определения результирующего параметра `measurement`. Для расчета фактической степени реализации правила согласно формуле (35) создан метод `calc()`, листинг 3.

Листинг 3 – Программная реализация матричной модели нечеткого логического вывода для одного правила на языке Kotlin

```
fun calc() : CFuzzyVector
{
    return predicates
        //Конъюнкция всех предикатов
        .fold(CFuzzyVector(1.0)) { con, pred ->
con.c(pred.calc()) }
        //Логический вывод - степень фактической реализации
        правила с учетом истинности правила.
        .il(positive)
}
```

Класс `CIntelligentAssistant` содержит всю модель нечеткого расчета предложений по обслуживанию оборудования. `Actions` – список операций обслуживания, выполняемых на текущем типе оборудования. В него же производится заполнение весовых коэффициентов по мере обработки правил. `Rules` – список нечетких лингвистических правил, описывающих модель обслуживания текущего вида оборудования. Он же содержит список параметров, которые необходимо измерить или предварительно рассчитать

точными способами для дальнейшего осуществления логического вывода. Метод `calcAssistance()` производит расчет весовых коэффициентов для предлагаемых операций обслуживания, листинг 4. В связи с тем, что решается задача классификации, полученные степени фактической реализации правил используются напрямую в качестве весовых коэффициентов для отдельных классов – предлагаемых выполняемых операций.

Листинг 4 – Программная реализация матричной модели нечеткого логического вывода для нескольких правил на языке Kotlin

```

fun calcAssistance(
    f: Double,
    df: Double
): Map<CMeasurement, CFuzzyVector>
{
    flowRate.value = f
    flowDeviation.value = df
    //Здесь задаются значения и остальных параметров
    оборудования
    ...
    //Очистка предыдущих расчетов
    actions.forEach { entry -> entry.value.positive = 0.0 }
    rules
        //Не правильно оформленные правила
        .filter { it.output!=null }
        //Обработка правил по очереди
        .forEach { rule ->
            //Начальные значения весовых коэффициентов
            if (!actions.containsKey(it.output))
                actions[rule.output!!] = CFuzzyVector(0.0)
            //Композиция всех правил с помощью дизъюнкции
            actions[rule.output!!] =
actions[rule.output!!]?.d(rule.calc()) ?: CFuzzyVector(0.0)
        }
    return actions
}

```

Результат вызова метода `CIntelligentAssistant::calcAssistance()` интерпретируется в активности вывода предлагаемых операций, рисунок 34.

4.2.3. Интерфейс пользователя ПО «МИРМ Оператора»

Работа в ПО «МИРМ» начинается с выбора технологического оборудования, которое планируется обслуживать, рисунок 32.

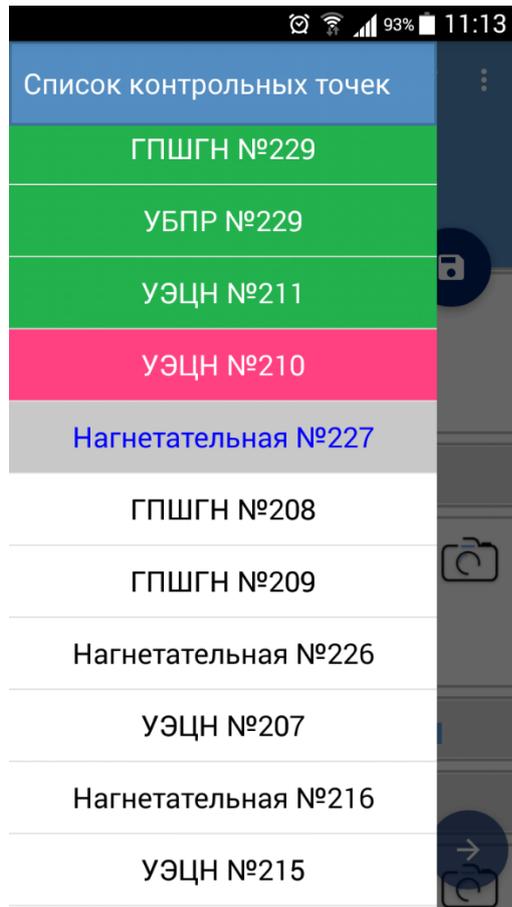


Рисунок 32 - Внешний вид интерфейса ПО «МИРМ» в режиме выбора оборудования для обслуживания

После выбора конкретного оборудования пользователю-оператору открывается окно для ввода результатов визуального осмотра и текущих значений параметров работы оборудования, рисунок 33.

МИРМ® Объект: УЭЦН №210

Показания на начало замера

135.0

Дата и время окончания замера

2019-02-12 12:12:09

Показания на конец замера

138.0

Q ж ручной замер

69,7

Депарафинизация

Рисунок 33 - Окно для ввода результатов внешнего осмотра, текущих значений параметров работы технологического оборудования, информации о выполненных операциях в ПО «МИРМ»

Одновременно с отображением окна ввода параметров по выбранному оборудованию происходят запросы к элементам систем АСУТП, ответственным за сбор значений измеряемых параметров работы с выбранной установки. После успешного получения данных, они автоматически обновляются в соответствующих полях ввода. У оператора есть возможность изменить значения по своему усмотрению.

После завершения ввода значений всех доступных параметров оператор может вызовом команды «Советы по обслуживанию» из меню перейти в окно для отображения доступных советов по обслуживанию технологического оборудования, рисунок 34. Построение списка советов (логический вывод) осуществляется в момент открытия окна.

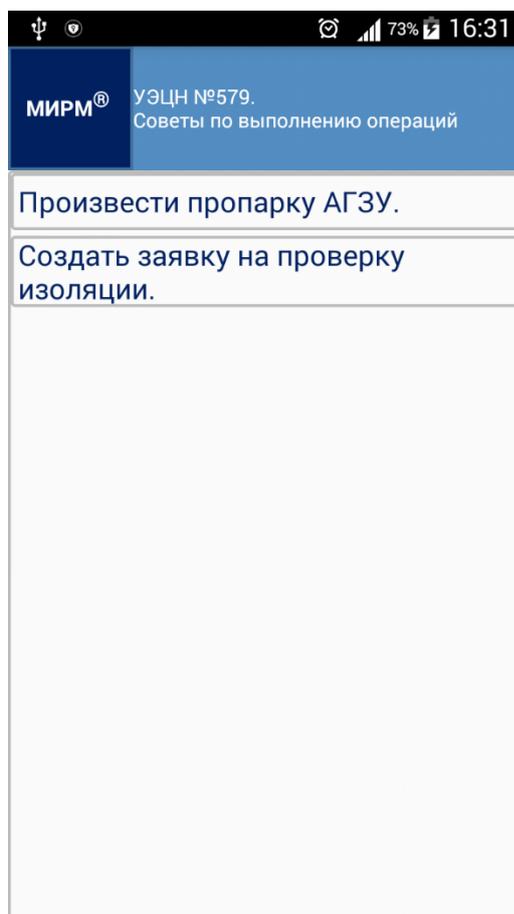


Рисунок 34 - Окно для вывода советов по обслуживанию технологического оборудования в ПО «МИРМ»

Оператор может выполнить часть операций лично и ввести информацию об этом в окне ввода результатов осмотра и выполненных операций. Если для выполнения рекомендации требуется привлечение специальной сервисной бригады, оператор может создать заявку в специальном окне, рисунок 35.

Заявка

Наименование
УЭЦН №579 Проверка изоляции

Объект
УЭЦН №579

Инициатор
[REDACTED]

Исполнитель

Статус
Новое

Описание
Датчик показывает низкий уровень сопротивления.

Рисунок 35 - Окно для заявок на обслуживание технологического оборудования в ПО «МИРМ»

4.3. Внедрение интеллектуальной системы поддержки принятия решений

4.3.1. Выбор объекта внедрения

Основной организацией, добывающей нефть в Пермском крае, является ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Одной из компаний, занимающейся разработкой ПО для автоматизации процессов технологического обслуживания скважин в качестве подрядчика (договоры № 16Z1394 от 01 июня 2016 г. и № Ф6/0285/18/18Z0686 от 17 апреля 2018 г.) является ООО «Свифт» [82], сотрудником которой является автор работы.

Работы по реализации СППР выполнены на основании трудового договора, права собственности на ПО «МИРМ» принадлежат ООО «Свифт».

4.3.2. Описание объекта внедрения

Для оценки пригодности ПО «МИРМ» к промышленной эксплуатации осуществлен пилотный проект использования ПО в процессы обслуживания

технологического оборудования ДНГ ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» на Ярино-Каменоложском, Шершневском, Сибирском месторождениях, расположенных в северной части Пермского края, и на Ильичевском месторождении, расположенном на юго-востоке от Перми. Характеристики пилотного проекта приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Основные характеристики пилотного внедрения ПО «МИРМ»

Всего маршрутов, шт.	15
Всего объектов, шт.	588
УЭЦН, шт.	327
УШГН, шт.	31
Срок пилотного проекта	01.08.2017-31.07.2018
Обходов выполнено, шт.	~6000
Значений телеметрии собрано, ед.д.	~10 млн.
Предложено выполнить операций, шт.	~76 тыс.

4.3.3. Результаты внедрения

Детальные статистические данные по работе оборудования и сбору нефти в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» являются конфиденциальными и не опубликованы в открытых источниках. В дальнейших расчетах использованы немногие опубликованные значения и экспертные оценки.

По данным из БД ПО «МИРМ» за время пилотного проекта предложены к выполнению и/или выполнены операции обслуживания технологического оборудования в количествах, приведенных в таблице 14.

Таблица 14 – Количество выполненных операций обслуживания оборудования за период пилотного проекта

Операция	ЭЦН	ГПШГН	СКШГН	Всего	Помощь СППР
Опрессовка	6	2880	11902	14788	301
Депарафинизация (спуск-подъем скребка, нагрев, промывка)	52482	0	14	52496	1056
Замена штуцера. Увеличение	1944	0	0	1944	39
Замена штуцера. Уменьшение	1938	0	0	1938	39
Ревизия, перевязка, замена сальников	2444	2880	6	5330	109
Замена проволоки	130	0	0	130	4

Несвоевременное выполнение операций обслуживания может приводить к проблемам и ремонтам оборудования, приведенным в таблице 15.

Таблица 15 – Основные проблемы при несвоевременном выполнении операций

Операция	Проблема	Ремонт
Опрессовка	Протечка труб	Замена труб
Опрессовка	Протечка соединительных элементов	Замена соединительных элементов
Опрессовка	Загрязнение окр. среды	Уборка территории (опрессовка)
Депарафинизация	Уменьшение рабочего диаметра трубы	Более сильная депарафинизация
Депарафинизация	Уменьшение потока жидкости (засор)	
Депарафинизация	Отказ насоса	Чистка насоса
Депарафинизация	Отказ насоса	Замена насоса
Замена штуцера. Увеличение	Уменьшение потока жидкости (большой штуцер)	
Замена штуцера. Уменьшение	Уменьшение потока жидкости (малый штуцер)	
Ревизия, перевязка, замена сальников	Протечка сальникового соединения	Замена сальников
Ревизия, перевязка, замена сальников	Загрязнение окр. среды	Уборка территории (сальники)
Замена проволоки	Поломка скребка	Ремонт скребка
Замена проволоки	Поломка скребка	Замена скребка

Для расчетов потерь нефти сформированы экспертные значения вероятности необходимости ремонтов после несвоевременного выполнения или невыполнения операций обслуживания $P_{\text{отказ}}$. Точные статистические значения являются конфиденциальными данными и не доступны для использования. Для оценки корректности экспертных значений вероятностей рассчитаем удельное количество отказов с учетом экспертных значений и сравним с опубликованными данными по инженерному симулятору [83], таблица 16.

Количество дополнительно подсказанных операций $N_{\text{операций}}$ указано по данным статистики ПО «МИРМ». Снижение дебита жидкости введено для учета того, что некоторые виды ремонта не требуют полной остановки

оборудования. Среднее количество отказов оборудования в год $\overline{N}_{отказ}$ рассчитано по формуле

$$\overline{N}_{отказ} = P_{отказ} \cdot N_{операций} \cdot \Delta Q_{жидкости}. \quad (55)$$

Таблица 16 – Оценка вероятности необходимости ремонтов в случае несвоевременного выполнения технологических операций обслуживания

Ремонт	Вероятность, доли	Количество операций по СППР, шт	Снижение дебита жидкости на время ремонта, доли	Среднее количество отказов оборудования в год, шт
Замена труб	0.002	301	1	0.602
Замена соединительных элементов	0.02	301	1	6.02
Уборка территории (опрессовка)	0.001	301	0	0
Более сильная депарафинизация	0.001	1056	0	0
Чистка насоса	0.06	1056	1	63.36
Замена насоса	0.002	1056	1	2.11
Замена сальников	0.1	109	1	10.9
Уборка территории (сальники)	0.01	109	0	0
Ремонт скребка	0.5	4	1	2
Замена скребка	0.1	4	1	0.4

Удельное количество отказов в год в расчете на одну установку может быть рассчитано по следующей формуле

$$N_{отказ.уд} = \frac{\overline{N}_{отказ}}{N_{установок}} \approx 0.23 \frac{\text{отказов}}{\text{установок} \cdot \text{год}}. \quad (56)$$

Рассчитаем этот же показатель по данным инженерного симулятора [84].

$$N_{отказ.уд} = \frac{N_{отказ}}{N_{установок}} = \frac{115 \text{ отказов}}{24\% \cdot 1720 \text{ установок} \cdot \text{год}} \approx 0.28 \frac{\text{отказов}}{\text{установок} \cdot \text{год}}. \quad (57)$$

Значения получились примерно одинаковыми, что говорит о корректности оценки вероятностей необходимости ремонтов.

Оценим теперь сокращение времени простоя скважин. В таблице 17 приведены экспертные оценки минимальной t_{\min} и максимальной t_{\max} продолжительности ремонтов оборудования в часах. Тогда среднее минимальное и максимальное время простоев можно рассчитать по формулам

$$\begin{aligned} \overline{t}_{\min} &= t_{\min} \cdot P_{отказ} \cdot \Delta Q_{ж} \cdot N_{операций}, \\ \overline{t}_{\max} &= t_{\max} \cdot P_{отказ} \cdot \Delta Q_{ж} \cdot N_{операций}. \end{aligned} \quad (58)$$

Таблица 17 – Оценка сокращения времени простоев оборудования в связи с ремонтами

Ремонт	Вероятность, доли	Минимальная длительность, ч.	Максимальная длительность, ч.	Снижение дебита жидкости, доли	Количество операций по СППР, шт.	Среднее время простоя (мин), ч.	Среднее время простоя (макс.), ч.
Замена труб	0.002	16	504	1	301	9.63	303.41
Замена соединительных элементов	0.02	2	72	1	301	12.04	433.44
Уборка территории (опрессовка)	0.001	1	48	0	301	0	0
Более сильная депарафинизация	0.001	2	12	0	1056	0	0
Чистка насоса	0.06	48	504	1	1056	3041.28	31933.44
Замена насоса	0.002	168	672	1	1056	354.82	1419.26
Замена сальников	0.1	8	72	1	109	87.2	784.8
Уборка территории (сальники)	0.01	1	48	0	109	0	0
Ремонт скребка	0.5	2	120	1	4	4	240

Замена скребка	0.1	168	672	1	4	67.2	268.8
----------------	-----	-----	-----	---	---	------	-------

Относительное время простоев всех установок за год можно посчитать по формулам:

$$t_{отн.min} = \frac{\sum_{\text{все причины}} \overline{t_{min}}}{t_{год}} \cdot 100\% = \frac{3576ч}{3136080ч} \cdot 100\% = 0.11\%,$$

$$t_{отн.max} = \frac{\overline{t_{max}}}{t_{год}} \cdot 100\% = \frac{35383ч}{3136080ч} \cdot 100\% = 1.13\%.$$
(59)

При выборе между минимальной и максимальной оценкой относительного времени простоев оборудования можно остановиться на значении $t_{отн} = 1\%$.

Оценим сокращение недоборов нефти по непредвиденным причинам. Первым этапом оценим общий объем недоборов с учетом опубликованных данных.

Удельное количество добываемой нефти на северной группе активов ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» можно рассчитать по формуле (60) с учетом данных [84].

$$Q_{уд.,н} = \frac{\sum Q_n}{N_{уст}} = \frac{15700m}{1720 \text{ уст} \cdot \text{сут}} = 9.1 \frac{m}{\text{уст} \cdot \text{сут}}.$$
(60)

Средняя обводненность нефти составляет $w = 0,65\%$ [32; 85], средняя плотность нефти $\rho = 0,9 \frac{m}{M^3}$.

Общая масса недоборов нефти по всем возможным причинам с учетом данных (60) и значением коэффициента эксплуатации $K_э = 92\%$ может быть рассчитана по формуле

$$m = Q_{уд.,н} \cdot N_{уст} \cdot (100\% - K_э) \cdot 365 \approx 95700 \frac{m}{год}.$$
(61)

По данным [84] можно также оценить массу недоборов по причине ожидания:

$$m_{\text{ожид}} = \frac{3900m}{8\% \cdot \text{год}} \cdot \frac{360\text{уст}}{1720\text{уст}} \approx 10204 \frac{m}{\text{год}}. \quad (62)$$

Оценим массу недоборов нефти, которые удалось избежать после внедрения СППР.

$$m_{\text{min}} = t_{\text{min}} \cdot P_{\text{отказ}} \cdot \Delta Q_{\text{ж}} \cdot N_{\text{операций}} \cdot Q_{\text{уд.н}}, \quad (63)$$

$$m_{\text{max}} = t_{\text{max}} \cdot P_{\text{отказ}} \cdot \Delta Q_{\text{ж}} \cdot N_{\text{операций}} \cdot Q_{\text{уд.н}}.$$

Таблица 18 – Оценка массы недоборов нефти в случае несвоевременного выполнения технологических операций обслуживания

Проблема	Ремонт	Вероятность, доли	Минимальная длительность, ч	Максимальная длительность, ч	Снижение дебита жидкости, доли	Количество операций по СППР, шт	Масса недобора (мин), г	Масса недобора (макс), г
Протечка труб	Замена труб	0.002	16	504	1	301	3.7	115.4
Протечка соединителей	Замена соединителей	0.02	2	72	1	301	4.6	164.8
Загрязнение окр. среды	Уборка территории	0.001	1	48	0	301	0	0
Уменьшение рабочего диаметра трубы	Более сильная депарафинизация	0.001	2	12	0	1056	0	0
Меньший поток жидкости		0.3	24	72	0.2	1056	578.2	1734.7
Отказ насоса	Чистка насоса	0.06	48	504	1	1056	1156.4	12142.7
Отказ насоса	Замена насоса	0.002	168	672	1	1056	134.9	539.7
Меньший поток жидкости		0.8	8	72	0.05	39	4.7	42.7
Меньший поток жидкости (слабое давление)		0.8	8	72	0.05	39	4.7	42.7
Протечка соединителей	Замена соединителей	0.1	8	72	1	109	33.2	298.4

Загрязнение окр. среды	Уборка территории	0.01	1	48	0	109	0	0
Поломка скребка	Ремонт скребка	0.5	2	120	1	4	1.5	91.3
Поломка скребка	Замена скребка	0.1	168	672	1	4	25.6	102.2

Суммарный объем недоборов, которых удалось избежать за счет использования новой СППР, рассчитывается по формулам (64):

$$m_{\text{снпр.мин}} = \sum_{\text{все причины}} m_{\text{мин}} \approx 1947,6 \frac{m}{\text{год}}, \quad (64)$$

$$m_{\text{снпр.макс}} = \sum_{\text{все причины}} m_{\text{макс}} \approx 15274,6 \frac{m}{\text{год}}.$$

В связи с конфиденциальностью и отсутствием в открытом доступе статистических данных по количеству недоборов по каждой отдельно причине точно оценить относительный процент недоборов, которых удалось избежать, в общей массе недоборов, не представляется возможным. По оценкам специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» сокращение недоборов по непредвиденным причинам в случае использования ПО «МИРМ» составляет 50%. Полученные данные (64) не противоречат оценкам экспертов и данным, доступным в открытых источниках.

Оценим стоимость нефти, недобор которой удалось избежать

$$C_{\text{мин}} = m_{\text{снпр.мин}} \cdot Ц = 1947,6 \frac{m}{\text{год}} \cdot 60 \frac{\$}{\text{баррель}} \cdot 60 \frac{\text{руб}}{\$} \cdot \frac{1}{0,9} \frac{m^3}{t} \cdot 6,3 \frac{\text{баррель}}{m^3} \approx 49\,000\,000 \frac{\text{руб}}{\text{год}}, \quad (65)$$

$$C_{\text{макс}} = m_{\text{снпр.макс}} \cdot Ц = 15274,5 \cdot 60 \cdot 60 \cdot \frac{1}{0,9} \cdot 6,3 \approx 384\,000\,000 \frac{\text{руб}}{\text{год}},$$

где Ц – это цена нефти с учетом перевода баррелей и долларов в тонны и рубли.

Как видно из расчетов (65) оценочный экономический эффект оказывается весьма существенным с точки зрения простого обывателя, но если

сравнить со всей выручкой организации в 346 млрд. руб. за 2018 год [86], значения выглядят вполне адекватно.

Еще одним положительным эффектом использование ПО «МИРМ» является сокращение ручного труда операторов за счет автоматического формирования нескольких видов журналов по выполненным операциям и за счет более оперативного обмена информацией примерно на 1 час за смену. С учетом длительности смен от 8 до 12 часов можно считать, что производительность труда операторов выросла на 10%.

4.4. Выводы к главе 4

В ходе выполнения работы спроектирована интеллектуальная система поддержки принятия решений при обслуживании технологического оборудования нефтедобычи и реализована в виде подсистемы ПО для мобильных устройств «МИРМ. Оператора».

Для тестирования корректности работы ПО «МИРМ» в рамках пилотного проекта использовано в бизнес-процессах ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» - самой крупной нефтедобывающей организации Пермского края, и получило положительные отзывы рядовых пользователей и руководителей.

Отмеченными положительными эффектами, полученными за период пилотного проекта, являются

- повышение коэффициента эксплуатации добывающих скважин на 1%;
- снижение количество недоборов нефти по непредвиденным причинам на 50%;
- повышение производительности труда операторов на 10%.

Основные результаты и выводы

1. Предложенный алгоритм формализации лингвистических правил позволил формализовать 63 правила, составляющих базу знаний об обслуживании двух типов технологического оборудования нефтедобычи: УЭЦН и УШГН.
2. Предложенное матричное представление алгоритма нечеткого логического вывода с использованием векторных предикатов позволило численно реализовать алгоритм работы системы поддержки принятия решений по обслуживанию двух типов технологического оборудования нефтедобычи: УЭЦН и УШГН.
3. Предложенная модель работы нечеткого логического автомата позволила
 - анализировать одновременно и экспертные знания, и историю изменения 13 непрерывных параметров УЭЦН, 8 непрерывных параметров УШГН;
 - в явном виде задавать горизонты анализа значений параметров: секунды, минуты, часы, дни, неделя.

Кроме вышперечисленных результатов решения поставленных научных задач практическая значимость работы достигнута за счет внедрения этих результатов в разработку подсистемы поддержки принятия решений в ПО «МИРМ» и использования ее в рамках пилотного проекта в процессе обслуживания технологического оборудования нефтедобычи ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» на 4 месторождениях нефти в Пермском крае. Это позволило повысить коэффициент эксплуатации добывающих скважин на 1%, снизить количество недоборов нефти по непредвиденным причинам на 50%, повысить производительность труда операторов на 10%.

Перспективы дальнейшего развития. Для увеличения объективности и адекватности формируемых советов по операциям обслуживания планируется использовать накопленные в ходе эксплуатации нечеткой модели в цифровом виде данные по входным и выходным

параметрам системы управления для обучения других видов интеллектуальных моделей, например, нейронных сетей и «лесов» деревьев решений. Объединение результатов работы различных моделей планируется организовать в виде многокаскадной системы, как, например, предложено в работе Борисова В.В. [87]

Список сокращений и условных обозначений

Активность (Android)	компонент приложения, отвечающий за создание одного окна в графическом интерфейсе
АКП	автомат с конечной памятью
АРМ	автоматизированное рабочее место
АСОДУ	автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления
АСУ ТП	автоматизированная система управления технологическим процессом
АФК	арматура фланцевых клапанов
БД	база данных
БЗ	база знаний
ВБП	внешний блок памяти
ГПШГН	установка добычи нефти со штанговым глубинным насосом и гидравлическим приводом
ДНГ	добыча нефти и газа
КС	комбинационная схема
ЛО	логические операции
МНКС	модифицированная нечеткая комбинационная схема
МП	матричное представление
МИРМ	мобильное информационное рабочее место
НАКП	нечеткий логический автомат с конечной памятью
НКТ	насосно-компрессорные трубы
НЛ	нечеткая логика
НЛА	нечеткий логический автомат
НОЦ	научно-образовательный центр
ПГНИУ	ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

ПНИПУ	ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный политехнический университет»
ПО	программное обеспечение
ПЭД	погружной электродвигатель
СК	станок-качалка
СКШГН	установка добычи нефти со штанговым глубинным насосом и станком-качалкой
СППР	система поддержки принятия решений
СУ	система управления
ТОиР	техническое обслуживание и ремонт
ТОРО	технологическое обслуживание и ремонт оборудования
ТПП	технологический процесс производства
УР	управленческие решения
ШГН	штанговый глубинный насос
ЭВМ	электронно-вычислительная машина
ЭС	экспертная система
ЭЦН	электроприводной центробежный насос

Список литературы

1. Указ президента РФ от 01.12.2016 № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. - 2016. - № 49 (часть I). - ст. 6887.
2. Родион Ф. «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» обсудил развитие систем связи на своих объектах с «Ростелекомом» [Электронный ресурс]. – URL: <https://fedpress.ru/news/59/industry/1823623> (дата обращения: 08.09.2020).
3. Zadeh L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh // Information and Control. – 1968. – Vol. 8. – № 3. – P. 338-353.
4. Zadeh L.A. Decision-making in a fuzzy environment / L.A. Zadeh, R.E. Bellman // Management Science. – 1970. – Vol. 17. – P. 141-164.
5. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to Analysis of Complex Systems and Decision Processes / L.A. Zadeh // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. – 1973. – Vol. 1. – P. 28-44.
6. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
7. Марценюк М.А. Матричное представление нечёткой логики / М.А. Марценюк. – 2007. – Т. 2. – № 3. – С. 7-35.
8. Круглов В. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечёткой логики и нечёткого вывода / В. Круглов, М.И. Дли. – М.: Физматлит, 2002. – 256 с.
9. Борисов В.В. Нечёткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Гор. линия-Телеком, 2012. – 284 с.
10. Хижняков Ю.Н. Нечёткое, нейронное и гибридное управление: учебное пособие / Ю.Н. Хижняков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.
11. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant / E.H. Mamdani. – 1974. – Vol. 121. – № 12. – P. 1585-1588.

12. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1985. – Vol. SMC-15. – № 1. – P. 116-132.
13. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control* / A. Piegat. – Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg, 2001. – 728 p.
14. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление : Адаптивные и интеллектуальные системы / А. Пегат. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
15. Kumar V.S.S. Hybrid Controller based Intelligent Speed Control of Induction Motor / V.S.S. Kumar, R.R. Joshi. – 2005. – Vol. 1. – № 1. – P. 71-75.
16. Guillemin P. Fuzzy logic applied to motor control / P. Guillemin // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1996. – Т. 32. – № 1. – С. 51-56.
17. Sarkar A. Application of Fuzzy Logic in Transport Planning / A. Sarkar // *International Journal on Soft Computing*. – 2012. – Т. 3. – № 2. – С. 1-21.
18. Kickert W.J.M. Application of a fuzzy controller in a warm water plant / W.J.M. Kickert, H.R. Van Nauta Lemke // *Automatica*. – 1976. – Vol. 12. – № 4. – P. 301-308.
19. Larsen M.P. Industrial applications of fuzzy logic control / M.P. Larsen // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1980. – Vol. 12. – № 1. – P. 3-10.
20. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method / Y. Tsukamoto // *Advances in fuzzy set theory and applications*. – Amsterdam: North-Holland, 1979. – P. 137-149.
21. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – 2. – Москва: М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 384 с.
22. Santos E.S. Maximin automata / E.S. Santos // *Information and Control*. – 1968. – Vol. 13. – № 4. – P. 363-377.
23. Topencharov V.V. Fuzzy-topological automata / V.V. Topencharov, S.P. Stoeva // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1985. – Vol. 16. – № 1. – P. 65-74.

24. Reyneri L.M. An introduction to Fuzzy State Automata / L.M. Reyneri // Biological and Artificial Computation: From Neuroscience to Technology / coll. G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen; eds. J. Mira, R. Moreno-Díaz, J. Cabestany. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. – Vol. 1240. – P. 273-283.
25. Belohlavek R. Approximate Minimization of Fuzzy Automata / R. Belohlavek, M. Krupka // Information Sciences 2007. – WORLD SCIENTIFIC, 2007. – P. 1363-1369.
26. Марценюк М.А. Матричная реализация алгоритмов нечёткого вывода / М.А. Марценюк, В.Б. Поляков, И.П. Селетков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – Т. 6 (162). – С. 133-141.
27. Богданов К.В. Нечёткие предикаты и кванторы в матричном представлении нечёткой логики / К.В. Богданов, М.А. Марценюк // Материалы VIII Международной научно-практической конференции Современные информационные технологии и ИТ-образование. – Москва: МГУ, 2008.
28. Brauer W. Automatentheorie / W. Brauer. – Vieweg+Teubner Verlag, 1984. – 496 p.
29. Карпов Ю.Г. Теория автоматов / Ю.Г. Карпов. – СПб.: Питер, 2003. – 208 с.
30. Коршак А.А. Основы нефтегазового дела. Учебник для ВУЗов. Издание второе, дополненное и исправленное / А.А. Коршак, А.М. Шаммазов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – 544 с.
31. Селетков И.П. Применение матричного аппарата нечеткой логики для поддержки принятия решений в процессе обслуживания технологического оборудования нефтедобычи / И.П. Селетков // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2020. – № 4. – С. 65-88.

32. Красноборов Д.Н. Эксплуатация малодебитного осложнённого фонда УЭЦН в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / Д.Н. Красноборов // Инженерная практика. – 2010. – Т. 07.
33. Ренёв Д. В поисках надёжности / Д. Ренёв // Нефтегазовая вертикаль. – 2017. – Т. 9. – С. 75-77.
34. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620305. База данных режимов работы и типичных проблем оборудования нефтяных месторождений для программы МИРМ оператора / И.П. Селетков. – Заявка № 2016621573. Дата поступления 24.11.2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.03.2017.
35. Supervised learning [Электронный ресурс]. – URL: https://scikit-learn.org/stable/supervised_learning.html#supervised-learning (дата обращения: 14.02.2020).
36. Игошин В.И. Математическая логика и теория алгоритмов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. / В.И. Игошин. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 448 с.
37. Mamdani E.H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller / E.H. Mamdani, S. Assilian // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7. – № 1. – P. 1-13.
38. Марценюк М.А. Матричное представление нечёткой логики / М.А. Марценюк // Труды IX международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки» Интеллектуальные системы и компьютерные науки. – Москва, МГУ, 2006. – Т. 4. – С. 32-36.
39. Oshima H. Automatic train operation system based on predictive fuzzy control / H. Oshima // Proceedings of the International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications the International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications. – Hitachi City, Japan, 1988. – P. 485-489.
40. Takahashi H. Fuzzy control system for automatic transmission [Электронный ресурс]. – URL: <https://patents.google.com/patent/US4841815A/en> (дата обращения: 14.04.2021).

41. Bang-Bang seek control for HDD with fuzzy algorithm / S. Yoshida [et al.] // . IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan. – 1991. – Vol. 6. – P. 227-239.
42. Pawlak Z. Rough sets / Z. Pawlak // International Journal of Information and Computer Science. – 1982. – T. 11. – № 5. – C. 341-356.
43. Pawlak Z. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning About Data / Z. Pawlak. – Kluwer Academic Publishers, 1991.
44. Zhongshi s. Advanced Artificial Intelligence : Series on Intelligence Science. Vol. 1 / s Zhongshi. – World Scientific Publishing, 2011. – 630 p.
45. Siegel D. Development of an Autoland System for General Aviation Aircraft / D. Siegel, J. Hansman. – MIT International Center for Air Transportation (ICAT), Department of Aeronautics & Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 USA, 2011.
46. Gestwa M. On the Modelling of the Human Pilot Using Fuzzy Logic Control / M. Gestwa, J. Bauschat // Computational Intelligence in Control. – 2003. – P. 148-167.
47. Hybrid System based on Rough Sets and Genetic Algorithms for Medical Data Classifications / H.I. Elshazly [et al.] // International Journal of Fuzzy System Applications (IJFSA). – 2013. – Vol. 3. – № 4. – P. 31-46.
48. Fuzzy Clustering with Multi-Resolution Bilateral Filtering for Medical Image Segmentation / K. Xiao [et al.] // International Journal of Fuzzy System Applications (IJFSA). – 2003. – Vol. 3. – № 4. – P. 47-51.
49. Vidyavathi K. Certain Investigations on Video Streaming and Frame Rate Classification for Multimedia Applications / K. Vidyavathi, R.S. Sabeenian // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2014. – Vol. 67. – № 3. – P. 547-553.
50. Using Fuzzy Logic for Pricing / A.M. Ribeiro [et al.] // Proceedings of the Seventh International Conference on Enterprise Information Systems Seventh International Conference on Enterprise Information Systems. – Miami, USA: Unpublished, 2005. – P. 331-334.

51. Shin C.Y. Economic Applications of Fuzzy Subset Theory and Fuzzy Logic: A Brief Survey / C.Y. Shin, P.P. Wang // *New Mathematics and Natural Computation*. – 2010. – Т. 6. – № 3. – С. 301-320.
52. Блюмин С.Л. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности / С.Л. Блюмин, И.А. Шуйкова. – Липецк: ЛЭГИ, 2001. – 138 с.
53. Нечёткие гибридные системы: теория и практика / И.З. Батыршин [и др.]. – Москва: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2007. – 2008 с.
54. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечётких и гибридных систем / Н.Г. Ярушкина. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
55. Ярушкина Н.Г. Нечёткие системы: обзор итогов и тенденций развития / Н.Г. Ярушкина // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2008. – Т. 4. – С. 26-38.
56. Советов Б.Я. Моделирование систем: Учеб. для ВУЗов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 3е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
57. Рубанов В.Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечёткое управление в технических системах / В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов. – БГТУ им. В. Г. Шухова, 2010. – 170 с.
58. Рыжов А.П. Элементы теории нечётких множеств и измерения нечёткости / А.П. Рыжов. – М.: Диалог-МГУ, 1998. – 116 с.
59. Штовба С.Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
60. Konar A. Computational intelligence: principles, techniques, and applications. Computational intelligence [i.e. intelligence] / A. Konar. – 1st ed. – Berlin ; New York: Springer, 2005. – 708 с.
61. Лихтарников Л.М. Математическая логика. Курс лекций. Задачник-практикум. / Л.М. Лихтарников, Т.Г. Сукачева. – СПб.: Издательство «Лань», 1999. – 288 с.

62. Bandler W. Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operators / W. Bandler, L.J. Kohout // Fuzzy Sets and Systems. – 1980. – Vol. 4. – P. 13-30.
63. Łukasiewicz J. On Three-Valued Logic / J. Łukasiewicz, L. Borkowski // Selected works by Jan Łukasiewicz : Studies in logic and the foundations of mathematics. – North-Holland, Amsterdam, 1970. – С. 87-88.
64. Ярушкина Н.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: учебное пособие / Н.Г. Ярушкина, Т.В. Афанасьева, Перфильева. – Ульяновск: Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – 320 с.
65. Eisele M. Hardware realization of fast defuzzification by adaptive integration / M. Eisele, K. Hentschel, T. Kunemund // Proceedings of the Fourth International Conference on Microelectronics for Neural Networks and Fuzzy Systems Fourth International Conference on Microelectronics for Neural Networks and Fuzzy Systems. – Turin, Italy: IEEE Comput. Soc. Press, 1994. – P. 318-323.
66. Leekwijck W.V. Defuzzification: criteria and classification / W.V. Leekwijck, E.E. Kerre // Fuzzy Sets and Systems. – 1999. – Vol. 108. – Defuzzification. – № 2. – P. 159-178.
67. Madau D.P. Influence value defuzzification method / D.P. Madau // Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems / ed. L.A. Feldkamp event: IEEE International Conference on Fuzzy Systems. – Hyatt Regency Hotel, New Orleans, Louisiana: IEEE Service Center, 1996. – Vol. 3. – Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. – P. 1819-1824.
68. Девятков В.В. Системы искусственного интеллекта: Учеб. пособие для вузов / В.В. Девятков. – М.: Изд-во МГТУ им. н.э. Баумана, 2001. – 352 с.
69. Mordeson J. Fuzzy Automata and Languages: Theory and Applications : Computational Mathematics. Vol. 4. Fuzzy Automata and Languages / J. Mordeson, D. Malik. – Chapman and Hall/CRC, 2002.
70. Ahsan J. Fuzzy Semirings with Applications to Automata Theory : Studies in Fuzziness and Soft Computing. Vol. 278 / J. Ahsan, J.N. Mordeson, M. Shabir. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

71. Determinization of Fuzzy Automata by Means of the Degrees of Language Inclusion / I. Micic [и др.] // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2015. – Т. 23. – № 6. – С. 2144-2153.
72. Хопкрофт Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Д. Хопкрофт, Р. Мотвани, Д. Ульман. – М.: Вильямс, 2002. – 528 с.
73. Марценюк М.А. Операторно-логические схемы как средство изучения алгоритмов в учебных курсах по математике и информатике / М.А. Марценюк // Прикладная информатика. – 2010. – Т. 5. – № 23. – С. 43-54.
74. Minimization of automata [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1010.5318.pdf> (дата обращения: 12.09.2014).
75. Câmpeanu C. Simplifying Nondeterministic Finite Cover Automata / C. Câmpeanu // Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science. – 2014. – Vol. 151. – P. 162-173.
76. Cheng W. Minimization algorithm of fuzzy finite automata / W. Cheng, Z.-W. Mo // Fuzzy Sets and Systems. – 2004. – Vol. 141. – № 3. – P. 439-448.
77. Hsuan-Shih Lee. Minimizing fuzzy finite automata / Hsuan-Shih Lee // Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ- IEEE 2000 (Cat. No.00CH37063) Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ- IEEE 2000. Soft Computing in the Information Age. – San Antonio, TX, USA: IEEE, 2000. – Т. 1. – С. 65-70.
78. Марценюк М.А. Приведение конечного нечёткого автомата к нечёткой комбинационной схеме с блоком памяти. / М.А. Марценюк, И.П. Селетков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2014. – № 6 (210). – С. 67-80.
79. Марценюк М.А. Применение матричного аппарата для реализации нечёткого автомата / М.А. Марценюк, И.П. Селетков // Современные проблемы математики и её прикладные аспекты. Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных с международным участием: материалы конф. Современные проблемы математики и её прикладные аспекты.

Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных с международным участием / ред. Яковлев. – Пермь, 2013. – С. 179.

80. Основы автоматизации техпроцессов: Учебное пособие / А.В. Щагин [и др.]. – М.: Высшее образование, 2017. – 163 с.
81. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613226. Программа «Мобильное информационное рабочее место оператора» (МИРМ Оператора) / И.П. Селетков. – Заявка № 2016662870. Дата поступления 24.11.2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.03.2017.
82. Официальный сайт компании ООО «Свифт» [Электронный ресурс]. – URL: <http://swift-group.ru/> (дата обращения: 23.02.2020).
83. ЛУКОЙЛ в Прикамье. Вчера. Сегодня. Завтра. [Электронный ресурс]. – URL: <https://engineerforum.ru/docs/dokl/3.pdf> (дата обращения: 16.02.2020).
84. Доклад ОАО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». – 2018.
85. Хижняк Г.П. Осложняющие факторы при разработке Ножовской группы месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / Г.П. Хижняк, А.В. Усенков, Е.Н. Устькачкинцев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 13. – С. 59-68.
86. Пермские предприятия «ЛУКОЙЛа» показали рост прибыли [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4052946> (дата обращения: 03.08.2020).
87. Мисник А.Е. Композиционное нейро-сетевое моделирование сложных технических систем / А.Е. Мисник, В.В. Борисов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2016. – Т. 7. – С. 39-46.

Приложение А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Мобильное информационное рабочее место оператора»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2017613226

Программа «Мобильное информационное рабочее место оператора» (МИРМ оператора)

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью «СВИФТ» (RU)*

Автор: *Селетков Илья Павлович (RU)*

Заявка № **2016662870**
Дата поступления **24 ноября 2016 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **14 марта 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы в программные продукты компании ООО «Свифт»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «Свифт»

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационной работы
Селеткова Ильи Павловича,
представленной на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждается, что научные и практические результаты диссертационной работы Селеткова И.П., посвящённой разработке нечётких алгоритмов интеллектуальной поддержки процессов управления, внедрены и являются частью программного обеспечения человекомашинной системы управления технологическим процессом «Мобильное информационное рабочее место оператора» (МИРМ оператора) компании ООО «Свифт», разрабатываемого в рамках договоров № 16Z1394 от 01 июня 2016 г. и № Ф6/0285/18/18Z0686 от 17 апреля 2018 г. между ООО «Свифт» и ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

Предложенные матричный аппарат нечёткой логики, модели и алгоритмы нечёткого логического вывода использованы при разработке модуля «Умный обход» ПО «МИРМ» для поддержки принятия решений оператора добычи нефти и газа в процессе обслуживания технологического оборудования нефтедобычи.

Показателями эффективности, полученными на пилотном проекте от внедрения ПО «МИРМ» на 588 технологических объектах ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» (01.08.2017-31.07.2018), являются:

- повышение коэффициента эксплуатации добывающих скважин на 1%;
- снижение недоборов нефти по непредвиденным причинам на 50%;
- повышение производительности труда операторов на 10%.

Директор ООО «Свифт»



Л.В. Пупков

«28» Февраль 2019 г.

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы в образовательный процесс кафедры компьютерных систем и телекоммуникаций ПГНИУ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «Пермский

государственный национальный

исследовательский университет»

доктор физ.-мат. наук, профессор



С.О. Макаров /

АКТ

о внедрении научных результатов,
полученных Селетковым Ильёй Павловичем
при выполнении диссертационной работы
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

председатель: декан физического факультета ПГНИУ, к.ф.-м.н.
Гаврилов К.А.
члены комиссии: заведующий кафедрой компьютерных систем и
телекоммуникаций, к.т.н., доцент Машкин С.В.,
старший преподаватель кафедры компьютерных систем
и телекоммуникаций Ястребов А.Г.

составила настоящий акт о том, что основные теоретические положения и практические результаты диссертационной работы Селеткова И.П. используются в образовательном процессе, реализуемом для бакалавров направления подготовки 03.03.03 «Радиофизика» и специалистов по специальности 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем».

Предложенный матричный аппарат нечёткой логики рассматривается в ходе изучения дисциплины «Искусственный интеллект (для физиков)».

Разработанное программное обеспечение «Программа для нечёткой многофакторной оценки знаний студента» и «Программа для нечёткой оценки текущей успеваемости студента» используется для контроля успеваемости студентов при чтении курсов на кафедре компьютерных систем и телекоммуникаций.

Эффект от внедрения результатов диссертационной работы заключается в

- 1) повышении уровня освоения профессиональных компетенций и их компонентов (знаний, умений, владений) в области построения методов, алгоритмов, приборов и устройств интеллектуальной обработки

информации, что соответствует требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования;

- 2) повышении объективности оценивания знаний студентов и сокращении трудозатрат профессорско-преподавательского состава.

Итоги внедрения результатов диссертационной работы обсуждались на заседании кафедры 07.02.2019, протокол №1.

Председатель комиссии:

декан физического факультета ПГНИУ, КСЕФ / Гаврилов К.А. /
к.ф.-м.н.

Члены комиссии:

и.о. заведующий кафедрой компьютерных систем и телекоммуникаций, к.т.н., доцент С / Машкин С.В. /

старший преподаватель кафедры компьютерных систем и телекоммуникаций Ястр / Ястребов А.Г. /

«07» февраля 2019 г.

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы в образовательный процесс кафедры прикладной математики и информатики ПГНИУ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГАОУ ВО «Пермский

государственный национальный

исследовательский университет»

доктор физ.-мат. наук, профессор



/ С.О. Макаров /

АКТ

о внедрении научных результатов,
полученных Селетковым Ильёй Павловичем
при выполнении диссертационной работы
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

председатель: декан механико-математического факультета ПГНИУ,
к.т.н. Кузнецов А.Г.
члены комиссии: заведующий кафедрой прикладной математики и
информатики, д.ф.-м.н., профессор Русаков С.В.,
профессор кафедры прикладной математики и
информатики, д.т.н, профессор Ясницкий Л.Н.

составила настоящий акт о том, что основные теоретические положения и практические результаты диссертационной работы Селеткова И.П. на тему «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе матричного представления нечёткой логики (на примере обслуживания технологического оборудования нефтедобычи)» используются в образовательном процессе, реализуемом для бакалавров направления подготовки 01.03.02 «Прикладная математика и информатика».

Предложенный матричный аппарат нечёткой логики рассматривается в ходе изучения дисциплины «Методы искусственного интеллекта».

Эффект от внедрения результатов диссертационной работы заключается в повышении уровня освоения профессиональных компетенций и их компонентов (знаний, умений, владений) в области построения интеллектуальных систем и математических моделей сложных систем, что

соответствует требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования.

Итоги внедрения результатов диссертационной работы обсуждались на заседании кафедры прикладной математики и информатики 02.02.2021, протокол № 06.

Председатель комиссии:

декан механико-математического факультета ПГНИУ, к.т.н. _____ / Кузнецов А.Г. /

Члены комиссии:

заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, д.ф.-м.н., профессор _____ / Русаков С.В. /

профессор кафедры прикладной математики и информатики, д.т.н., профессор _____ / Ясницкий Л.Н. /

«14» апреля 2021 г.