

*На правах рукописи*

СЕЛЕТКОВ Илья Павлович

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

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Ясницкий Леонид Нахимович**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Марценюк Михаил Андреевич**

**Официальные оппоненты:** **Борисов Вадим Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Филиал Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный исследовательский  
университет «МЭИ» в г. Смоленске, профессор  
кафедры вычислительной техники;  
**Хижняков Юрий Николаевич,**  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет», профессор кафедры  
автоматики и телемеханики

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»,  
г. Курск

Защита состоится 30 июня 2021 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.01, по адресу: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета ([www.pstu.ru](http://www.pstu.ru)).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат экономических наук,  
доцент

А.О. Алексеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время одним из приоритетных и перспективных 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»<sup>1</sup>.

С целью реализации данной концепции во многих отраслях промышленности внедряются современные системы автоматизированного управления производством и системы поддержки принятия решений (СППР) при осуществлении технологических процессов. В сфере добычи углеводородного сырья такие системы высоко востребованы в процессах обслуживания и управления нефтегазодобывающими скважинами, нефтепроводами и другими технологическими объектами.

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 нечеткая логика, предложенная Л. А. Заде. 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 предложена и математически обоснована возможность представления нечетких логических операций и нечеткого логического вывода в виде векторов и матриц. 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, в матричном виде представлен только логический вывод на основании нечетких высказываний, а способ применения данного подхода для нечетких множеств и лингвистических переменных отсутствует, что затрудняет решения прикладных задач управления и принятия решений в технических и организационно-технических системах.

---

<sup>1</sup> Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. - 05.12.2016. - № 49 (часть I). - ст. 6887.

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 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 ТРО 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 для автоматизации процесса обслуживания технологического оборудования нефтедобычи, работающих на базе аппарата нечеткой логики, пока не существует. Причина отсутствия таких систем, на взгляд автора, в том, что технологический процесс добычи нефти в целом на данный момент слабо оцифрован.

**Степень разработанности темы в части математического аппарата.** В развитие нечеткой логики большой вклад внесли как зарубежные, так и российские ученые: Кудинов Ю.И., Пospelов Д.А., Новиков Д.А., Мелихов А.Н., Круглов В.В., Борисов В.В., Хижняков Ю.Н., Такаги-Сугено, Мамдани М., Пегат А., Zhu А., Yang S.X., Lee С.Н., Chiu М.Н., Pandey А., Kumar S., Pandey К. К, Parhi D., Fatemeh F. Широкое применение нечеткие алгоритмы нашли в задачах управления промышленными процессами, сложными прикладными объектами и системами, а также в задачах обработки графической информации. Разработано несколько десятков вариантов реализации нечетких логических операций и основанных на них алгоритмов, а также способов получения информации с использованием нечетких систем.

При использовании аппарата нечеткой логики разработчики сталкиваются с необходимостью выбора конкретных моделей нечетких логических операций – конъюнкции, дизъюнкции, импликации. Все перечисленные в литературе модели этих операций предложены из эмпирических соображений, при решении конкретных задач, что затрудняет построение алгоритмов систем поддержки принятия решений и управления в других предметных областях, 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 их реализации, повышение быстродействия, расширение области применения.

Для формирования адекватных решений в нечеткой СППР при обслуживании скважин и формирования предиктивной аналитики требуется анализ ретроспективных данных по параметрам их работы. Для этого хорошо подходят нечеткие автоматы. 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 описания переходов между состояниями автомата. Это обстоятельство также вызывает дополнительные затруднения у экспертов и разработчиков СППР. Таким образом, актуальным является совершенствование нечетких алгоритмов и их применение для автоматизации процесса обслуживания технологического оборудования нефтедобычи.

**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 способ матричного представления 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.

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

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

**Методы исследований:** теория систем, теория нечетких множеств, теория управления, теория принятия решений, теория экспертных систем.

**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 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 внедрена в ПО для мобильных устройств «Мобильное информационное рабочее место оператора (МИРМ Оператора)» производства ООО «Свифт», и позволила сократить время выработки оператором и повысить качество и адекватность управляющих воздействий на технологическое оборудование добычи нефти и газа. В свою очередь, использование ПО «МИРМ» на пилотном проекте на 588 технологических объектах ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» позволило:

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

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

**Апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: «Актуальные проблемы механики, математики, информатики» (Пермь, 2012); «Современные системы искусственного интеллекта и их приложения в науке» (Казань, 2013); «Современные проблемы математики и ее прикладные аспекты»

(Пермь, 2013); «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (Москва, 2013, 2014); «Преподавание информационных технологий в Российской Федерации XIII» (Пермь, 2015); «Математическое моделирование в естественных науках», (Пермь, 2015); International Conference on Digital Science (DSIC'18) (Будва, Черногория, 2018); «Искусственный интеллект в решении актуальных социально-экономических проблем XXI века» (Пермь, 2019), «Нейрокомпьютеры и их применение» (Москва, 2020).

**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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** дан обзор предметной области процесса обслуживания технологического оборудования ДНГ: краткое описание процесса нефтедобычи, типы используемого оборудования, классы используемых информационных систем. Из всех типов оборудования добывающие скважины вызывают проблемы обслуживания, связанные с их высокой сложностью и удаленным расположением (очень часто с отсутствием связи). По статистическим данным ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», большая часть нефти добывается на скважинах с установленным центробежным насосом (58,6%, 2016 г.), а в общем фонде скважин большее число имеют установки с штанговым насосом (таблица 1).

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

Таким образом наибольший интерес по разработке систем поддержки принятия решений вызывают добывающие скважины УЭЦН и УШГН, при чем удаленность и отсутствие связи накладывают требование использования мобильных устройств и автономной работы.

Далее в главе 1 производится краткий обзор существующих информационных систем в данной предметной области и конкретно у конечного

заказчика ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», показывается место будущей информационной системы в общем ландшафте систем (рисунок 1).

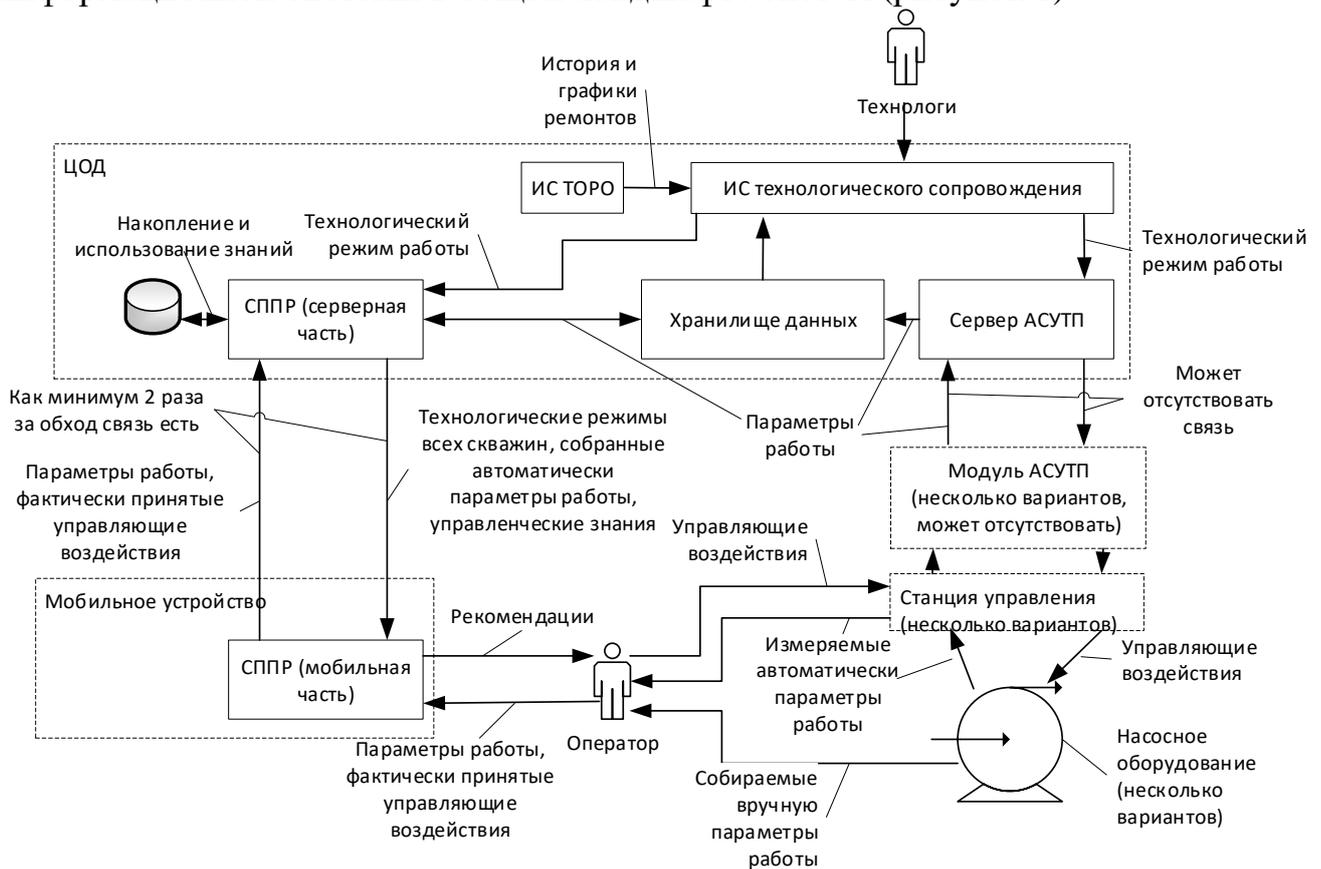


Рисунок 1 – Информационные системы и основные потоки данных в предметной области с учетом будущей системы поддержки принятия решений

Для построения проекта новой информационной системы производится анализ параметров работы выбранных ранее типов оборудования – УЭЦН, УШГН, выполняемых операций обслуживания. Все собранные знания о параметрах работы и операциях обслуживания, а также смежных информационных системах и потоках данных систематизируются в виде модели будущей информационной системы в целом и подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений в частности.

Для подбора оптимального математического аппарата произведен обзор доступных информационных ресурсов и знаний экспертов заказчика. Показано, что плановые значения параметров и режимов работы оцифрованы и могут быть использованы без особых трудностей. В тоже время, только часть фактических значений параметров хранится в оцифрованном виде. Самое главное, фактически выполняемые действия операторов на скважинах хранятся в виде бумажных журналов, и для их оцифровки и подготовки обучающей выборки требуются большие затраты времени. С другой стороны, все эти знания могут быть сформулированы в форме набора правил опытными технологами – экспертами в предметной области. Дан пример набора таких правил.

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

**Вторая глава** посвящена доработке матричного представления нечеткого логического вывода, применимого для решения конкретных прикладных задач.

В работах М.А. Марценюка введено понятие нечеткого вектора  $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}$ ,

характеризующего истинность некоторого лингвистического высказывания. Компоненты  $x_0, x_1$  этого вектора равны степени ложности и степени истинности высказывания соответственно. По аналогии с двоичной логикой полностью истинное высказывание обозначается 1, и на координаты вектора  $\mathbf{x}$  накладываются условия  $0 \leq x_0, x_1 \leq 1, x_0 + x_1 = 1$ .

При расчете значений искомых параметров на основе значений известных параметров в нечеткой логике используются правила в лингвистической формулировке. Чаще всего, правила имеют вид «если ..., то ...», что соответствует принципу *modus ponens* в обычной математической логике.

Если известен нечеткий вектор  $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}$ , а также нечеткий вектор  $\mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \end{pmatrix}$ ,

определяющий степень справедливости правила  $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{z}$ , то вывод о степени истинности высказывания-следствия, характеризующегося вектором  $\mathbf{y}$ , можно сделать из соотношений для матричных операций. Эта задача сводится к решению линейного алгебраического уравнения, относительно неизвестного вектора  $\mathbf{y}$ , которое имеет вид:

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

Как известно, линейная система имеет решение, если определитель матрицы коэффициентов не равен нулю. В данном случае мы должны потребовать, чтобы выполнялось условие

$$\det \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix} = x_1 \neq 0.$$

То есть компонента истинности  $X_1$  вектора  $\mathbf{x}$  не должна быть равна нулю:  $x_1 \neq 0$ . Если это условие выполнено, то компоненты неизвестного вектора  $\mathbf{y}$  принимают значения

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

Полученное решение имеет смысл, только если обе компоненты вектора  $\mathbf{y}$  удовлетворяют условиям полной истинности. Поэтому кроме условия  $x_1 \neq 0$ , получаем дополнительно, что  $x_1 \geq z_0$ .

Таким образом, в отличие от других алгоритмов в матричном подходе производится не только собственно нечеткий логический вывод, но и строго указывается область его существования. Кроме того, 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.

Для численного описания нечетких понятий и лингвистических терминов в векторном представлении М.А. Марценюком предложено использовать нечеткие предикаты – функции, принимающие значения на множестве нечетких векторов. Функция истинности нечеткого предиката по определению соответствует функции принадлежности нечеткого множества, описывающего тот же лингвистический термин:

$$\mathbf{p}(\mathbf{u}) = \begin{pmatrix} 1 - \mu(\mathbf{u}) \\ \mu(\mathbf{u}) \end{pmatrix}.$$

Для решения практических задач автором работы предлагается способ реализации нечетких матричных операций над предикатами, производится подробное сравнение операций над предикатами с операциями над нечеткими множествами других авторов. В частности, показывается, что истинностные части результатов конъюнкции и дизъюнкции в матричной реализации численно совпадают с результатами конъюнкции и дизъюнкции, предложенных в работах Бандлера (1980).

Далее во второй главе автором предлагается матричная модель лингвистической переменной как совокупности нечетких предикатов, предлагается метод оценки степени нечеткости лингвистической переменной.

Затем автором разрабатывается матричная модель нечеткого логического вывода на основе нечетких предикатов, который применим в большинстве прикладных задач нечеткой логики. В задачах управления недостаточно вывода на основе отдельных высказываний, т.к. все правила формулируются на языке лингвистических переменных. В связи с этим разработано обобщение матричной реализации нечеткого вывода на область нечетких векторных предикатов и лингвистических переменных.

В качестве исходных данных используется база знаний, состоящая из правил вида «Если ..., то...», сформулированных на естественном языке, т.е. с использованием значений лингвистических переменных, например,  $\alpha$  и  $\gamma$ , описывающих входной и выходной параметры соответственно. Для каждого правила должна быть указана степень истинности  $\mathbf{z}$ . Кроме того, должны быть установлены допустимые диапазоны значений входного  $\mathbf{u}$  и искомого  $\mathbf{v}$  параметров задачи (универсальные множества  $U$  и  $V$ ), заданы фактические четкие значения входного параметра  $\mathbf{u}_0$ .

Лингвистические правила описываются в виде зависимостей между значениями лингвистических переменных  $\alpha$  и  $\gamma$ , а также степенью истинности правил:

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

С помощью логических операций правила записываются следующим образом:

$$\alpha_i \rightarrow \gamma_k = \mathbf{z}_{i,k}.$$

Задача состоит в том, чтобы численно рассчитать значение искомого параметра  $v_0 \in V$  по заданному значению входного параметра  $u_0 \in U$ .

В первую очередь приводим четкое значение  $u_0$  к нечеткому виду с использованием функций истинности  $\mu_{ai}(u)$  нечетких предикатов  $x_i(u_0)$ , формализующих все возможные значения  $\alpha_i$  лингвистической переменной  $\alpha$ .

В матричной реализации операций над предикатами правила из базы знаний записываются следующим образом:

$$\mathbf{I}(x_i(u_0)) \cdot \tilde{y}_k = z_{i,k},$$

где  $\tilde{y}_k$  – степень фактической реализации правила или степень истинности высказывания  $\mathcal{Y}_k$  – следствия данного правила, а  $\mathbf{I}(x) = \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix}$  – матрица операции импликации. Решение этого уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_k &= (\mathbf{I}^{-1}(x_0(u)) \cdot z_{0,k}) \vee (\mathbf{I}^{-1}(x_1(u)) \cdot z_{1,k}) \vee \dots = \\ &= \mathbf{D} \dots (\mathbf{D}(\mathbf{I}^{-1}(x_0(u)) \cdot z_{0,k}) \cdot (\mathbf{I}^{-1}(x_1(u)) \cdot z_{1,k})) \cdot \dots = \\ &= \mathbf{D}_{all\ i}(\mathbf{I}^{-1}(x_i(u)) \cdot z_{i,k}), \end{aligned}$$

где  $\mathbf{D}_{all\ i}$  – дизъюнкция нечетких векторов по всем значениям индекса  $i$ , которая возможна благодаря сохранению ассоциативных и дистрибутивных свойств.

Полученный результат – вектор  $\tilde{y}_k$  – может быть использован напрямую в задачах нечеткого ранжирования группы объектов (классификации), например, списка возможных действий оператора на скважине, либо в качестве весовых коэффициентов в процедуре получения четкого результата в задачах построения регрессионных моделей.

Необходимо отметить, что, как было сказано выше, рассчитываемые степени истинности следствий правил не всегда удовлетворяют условию полной истинности. Это означает, что данные правила не могут характеризовать величину искомого параметра  $v_0$  при заданном значении входного параметра  $u_0$ . На

практике в таком случае устанавливается значение  $\tilde{y}_k = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ .

В конце главы дается сравнение преимуществ и недостатков развиваемого матричного подхода и «классических» нечетких моделей и алгоритмов.

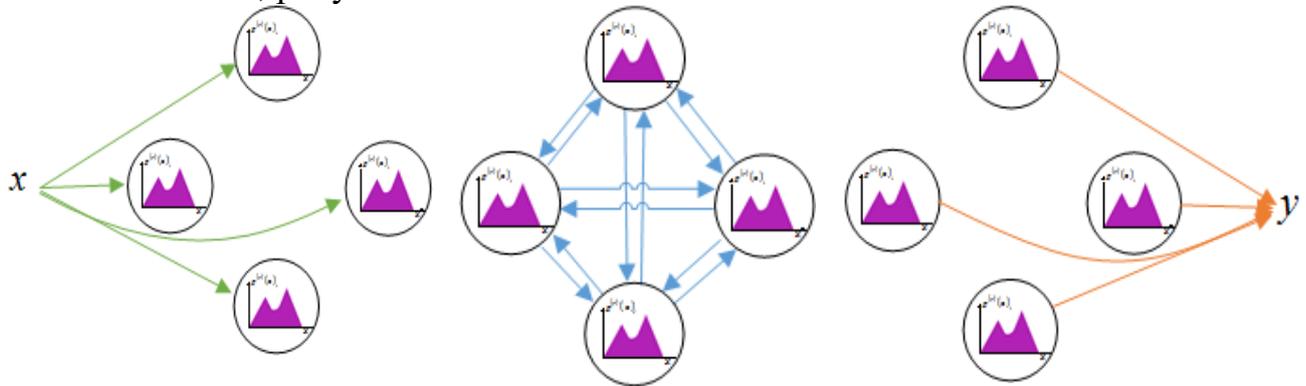
**Третья глава** посвящена разработке новой модели нечеткого логического автомата, позволяющей избежать использования трудно формализуемого понятия нечеткого состояния.

Большинство задач нечеткого вывода формулируются в виде зависимости значений выходных параметров от текущих значений входных параметров или их комбинации. Другими словами, задачи имеют структуру комбинационной схемы.

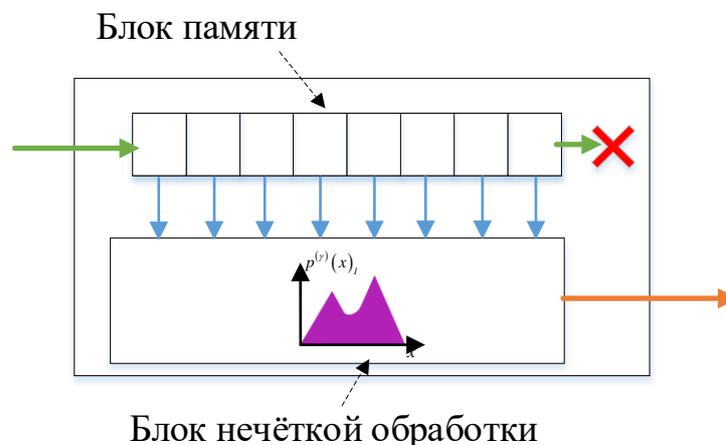
Модель нечеткого автомата используется в тех случаях, когда необходимо анализировать не только текущие значения, но и историю изменения параметров управляемого объекта, а предметная область описывается экспертом лингвистическими (словесными) правилами. На рисунке 2.а. схематично изображен цикл работы нечеткого автомата: сначала входной сигнал подается на все нечеткие состояния, затем вычисляются переходы между состояниями (перераспределение активностей), в конце формируется выходной сигнал с учетом активностей всех состояний.

Проблема заключается в том, что для описания нечетких состояний нужно указывать функции истинности соответствующих предикатов, а они не связаны в явном виде с предметной областью. Поэтому экспертам затруднительно сформулировать правила работы, а также не существует общего алгоритма корректировки этих функций истинности.

М. А. Марценюком высказана идея о том, что можно вместо нечеткого автомата с памятью построить нечеткую комбинационную схему, анализирующую внешний блок памяти, результат работы которой будет аналогичен результату работы автомата, рисунок 2.б.



а)



б)

Рисунок 2 – Схема работы нечеткого логического автомата с памятью при реализации памяти а) с помощью набора состояний и б) с помощью выделенного блока-очереди



изменилась, И средний за неделю дебит жидкости высокий, И текущий дебит жидкости отклонился от среднего сильно, ТО необходимо выполнить пропарку АГЗУ».

Для численного описания лингвистических понятий и нечетких предикатов на основании экспертных оценок построены функции истинности (рисунок 4), которые в процессе тестовой эксплуатации постоянно актуализировались.

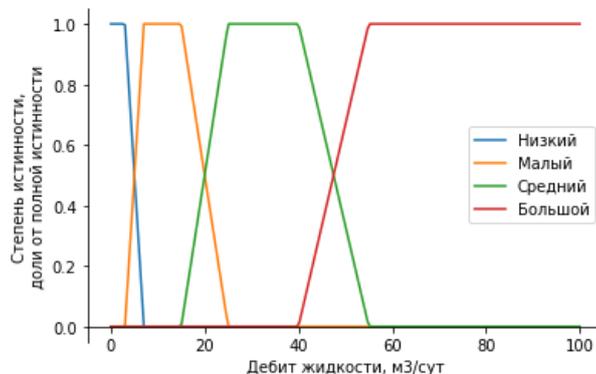


Рисунок 4 – Функции истинности нечетких предикатов для описания величины суточного дебита жидкости

Для реализации алгоритма работы подсистемы поддержки принятия решений использован матричный нечеткий логический вывод на основании векторных предикатов, как показано в главе 2. Для анализа истории изменения значений параметров использованы блоки памяти в виде очередей, как показано в главе 3.

Полученное в результате ПО «МИРМ» было внедрено в рамках пилотного проекта на Ярино-Каменоложском, Шершневском, Ильичевском и Сибирском нефтяных месторождениях Пермского края. Для оценки эффективности ПО за время пилотного проекта собраны статистические данные, таблицы 2 и 3.

Таблица 2 – 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	~6 тыс.
Значений телеметрии собрано, ед.д.	~10 млн.
Предложено выполнить операций, шт	~76 тыс.

Таблица 3 – 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

В конце четвертой главы на основании собранных статистических данных и экспертных оценок трудоемкостей внеплановых ремонтов оборудования производится оценка экономического эффекта внедрения разработанной информационной системы в бизнес-процессы ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Основные полученные технико-экономические показатели отражены в акте внедрения и в разделе «практическая значимость работы».

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, и дана их оценка.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложенный способ 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 вышеперечисленных результатов решения поставленных научных задач практическая значимость работы достигнута за счет применения этих результатов при разработке подсистемы поддержки принятия решений в ПО «МИРМ» и внедрения ее в рамках пилотного проекта в процесс 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 поддержки принятия решений 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 работах Борисова В.В.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### *Публикации в изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus*

1. **Seletkov, I. P.** Application of Matrix Fuzzy Logic in Machine Independent Temperature Controller = Применение матричной нечеткой логики в аппаратно-независимом регуляторе температуры / I. P. Seletkov, L. N. Yasnitsky. // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 850. – P. 443–449.

### *Публикации в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук*

2. Марценюк, М. А. Нечеткий алгоритм многофакторной оценки рейтинга студента / М. А. Марценюк, В. Б. Поляков, **И. П. Селетков** // *Прикладная информатика*. – 2014. – №5 (53). – С.41–49.
3. **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.

### *Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ*

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613226 от 14.03.2017. «Мобильное информационное рабочее место оператора (МИРМ оператора)». / **И. П. Селетков**. Заявка № 2016662870; поступл. 24.11.2016.

### *Прочие публикации*

5. Марценюк, М. А. Матричная реализация алгоритмов нечеткого вывода / М. А. Марценюк, В. Б. Поляков, **И. П. Селетков** // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. – 2012. – № 6 (162). – С. 133–141.
6. Марценюк, М. А. Матричная реализация алгоритмов нечеткого вывода / М. А. Марценюк, **И. П. Селетков** // *Актуальные проблемы механики, математики, информатики: сб. тез. науч.-практ. конф. (Пермь, 30 октября – 1 ноября 2012 г.)* / гл. ред. В. И. Яковлев; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2012. – С. 63.

7. Марценюк, М. А. Применение матричного аппарата для реализации нечеткого автомата / М. А. Марценюк, **И. П. Селетков** // Современные проблемы математики и ее прикладные аспекты. Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием: материалы конф. (Пермь, 29-31 октября 2013 г.) / гл. ред. В. И. Яковлев; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2013. – С. 58.
8. Марценюк, М. А. Алгоритмы нечеткого вывода: обзор и матричная реализация / М. А. Марценюк, **И. П. Селетков** // Вестник Пермского университета. Информационные системы и технологии. – 2013. – № 13. – С.17–21.
9. Марценюк, М. А. Приведение конечного нечеткого автомата к нечеткой комбинационной схеме с блоком памяти / М. А. Марценюк, **И. П. Селетков** // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. – № 6 (210). – С. 67–80.
10. Марценюк, М. А. Нечеткий клеточный автомат для регулирования поля температуры / М. А. Марценюк, **И. П. Селетков** // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2015. – № 2-3 (212-217). – С. 125–138.
11. **Селетков, И. П.** Формализация задачи поддержки принятия решений при обслуживании технологического оборудования нефтедобычи / И. П. Селетков // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических задач XXI века: сб. ст. по материалам Четвертой всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 21–24 мая 2019 г.) Ч. II. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2019.– С. 165–168.
12. **Селетков, И. П.** Заметки по созданию автономной интеллектуальной системы поддержки принятия решений при обслуживании технологического оборудования нефтедобычи / И. П. Селетков // XVIII всерос. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». Тезисы докладов. – М: ФГБОУ ВО МГППУ, 2020. – С. 141–143.