



Опыт применения искусственного интеллекта в вопросах определения технического состояния маслonaполненного оборудования и организации его эксплуатации

Давиденко Ирина Васильевна

д.т.н., профессор кафедры
«Электротехника» Уральского
федерального университета,
директор ООО «Энерго-
Диагностика и Аналитика»



Конференция
«Системы мониторинга ЭО.
Искусственный интеллект.
Цифровые двойники»
Тольятти. 4-8 августа 2025



Основное назначение ЭДИС «Альбатрос»:

- определение тех. состояния
маслонаполненного
оборудования=вида и опасности
дефекта, по возможности его
локализация ;
- определение рекомендации
сроков и объемов ТОиР

ГОСТ Р 71476-2024: **Экспертная система** (expert system): Система ИИ, которая накапливает, комбинирует и объединяет знания, предоставленные людьми, являющимися экспертами в предметной области, с целью **логического вывода решений для поставленных задач (диагноз + рекомендация ТОиР)**.



Широкий опыт внедрения

Система внедрена в 46 энергосистемах России, в Молдавии, Латвии, Украине, Белоруссии, на заводах, в ИЦ (133 предприятия, 449 рабочих мест).

Система помогла выявить и предотвратить более 470 случаев дефектов маслонаполненного ЭО.

История разработки

1990 г - первый релиз экспертной системы: диагностирование силовых трансформаторов на основе АРГ и выработки рекомендаций ТОиР;

С 1990 каждый год в систему добавляется новый функционал:

2022г - расчет ИТС по методике Минэнерго;

2023- диагностика печных трансформаторов на основе АРГ (НИР);

2024 - диагностика РПН на основе АРГ и ФХА масла контактора (разработка стандарта для Россетей)

2025 - внедрение ЭДИС под ОС Linux.



Возможности ЭДИС по анализу видов измерений

Исходные данные для диагностирования СТ:

- анализа растворенных в масле газов
- расширенный физико-химический анализ масла (33 параметра)
- измерение изоляционных характеристик
- омическое сопротивление обмоток
- сопротивление короткого замыкания
- результаты опыта холостого хода
- влагосодержание твердой изоляции
- степень полимеризации твердой изоляции

Альбатрос учитывает результаты обследований:

- тепловизионный контроль
- измерение ЧР
- виброобследование
- визуальный осмотр

Отдельные блоки ЭДИС для ЭО 6-750 кВ :

- силовых трансформаторов;
- РПН;
- газового реле;
- высоковольтные вводы трансформаторов и выключателей;
- шунтирующие реакторы;
- трансформаторы тока;
- трансформаторы напряжения;
- масляные выключатели

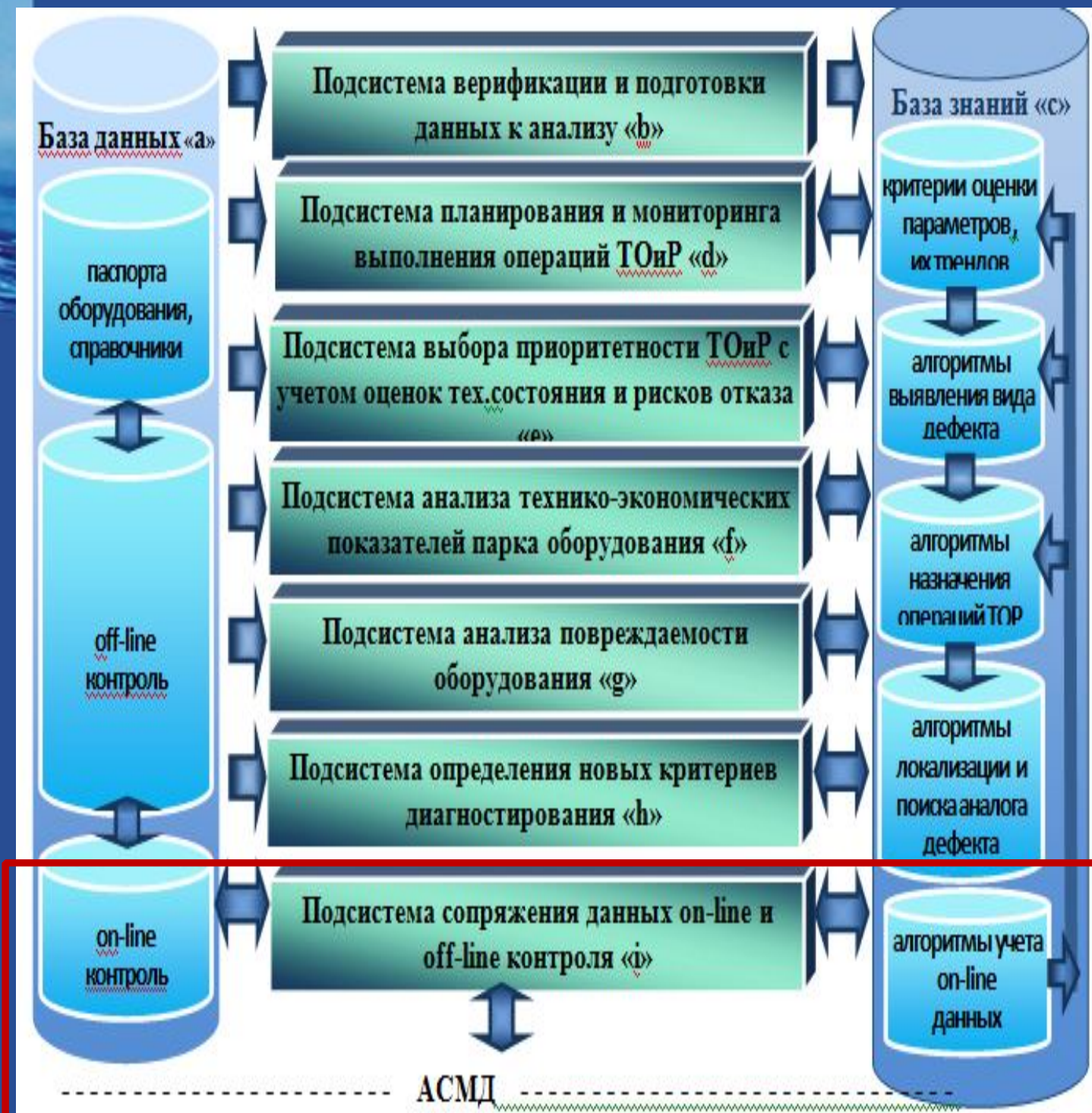


ЭДИС содержит:

- базу данных
- базу знаний
- шесть встроенных подсистем

Альбатрос выдает:

- 67 различных графических форм состояния оборудования (графиков, диаграмм)
- 90 отчетов разного вида



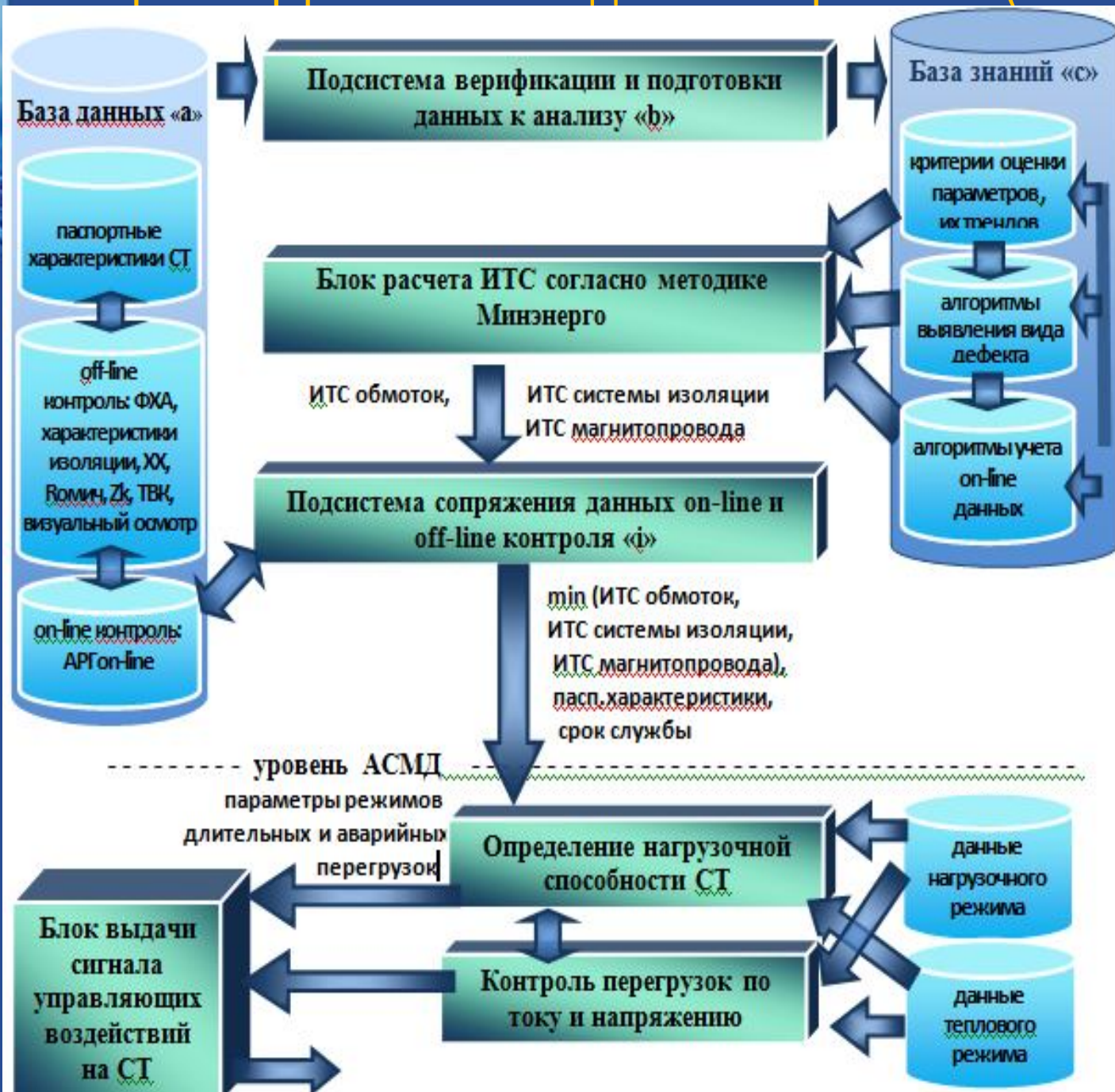


ЭДИС «Альбатрос» off-line + АСМД «Звезда» on-line = синергия эффективности диагностирования (2021)

1. IEC 60076-7-2018 Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers .

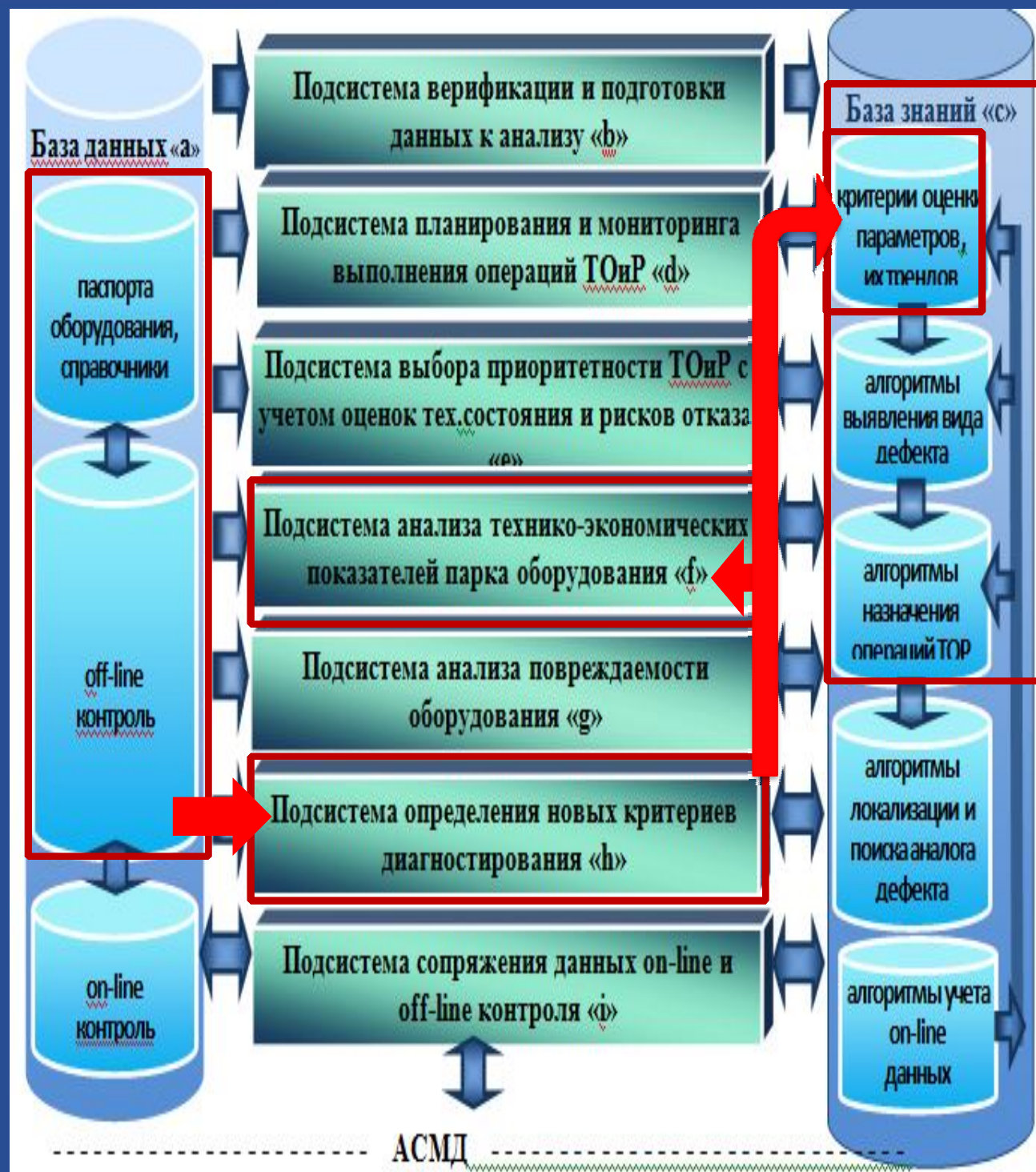
2. Приказ Минэнерго РФ № 81 от 08.02.2019 г.

"Об утверждении требований к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и её поддержанию (изменения в Правила тех. эксплуатации эл. станций и сетей РФ, утвержденные приказом Минэнерго 19.6.2003 № 229





ЭДИС в составе имеет **подсистему для проведения интеллектуального анализа эксплуатационных данных и извлечение из них знаний (data mining)**: выявляет закономерности и тенденции посредством анализа эксплуатационных данных в разных разрезах и с различных точек зрения; проводит их категоризацию. В результате взаимодействия подсистемы и экспертов, разработчиков НИР, появляются новые **декларативные знания** и **процедурные знания** (например, СТО 34.01-23-003-2019 и др.)





Применение подсистемы определения критериев диагностики ЭДИС совместно с методами машинного обучения позволило (2019-2020) :

- Получить модели старения (окисления, увлажнения, загрязнения) различных марок масла, которые могут служить для прогноза и увеличения горизонта планирования операций ТОиР
- Дать практические рекомендации по изменению периодичности контроля: экономить эксплуатационные расходы в периоды медленного ухудшения параметров и повышение надежности работы в периоды быстрого ухудшения параметров



Локализация дефекта методами машинного обучения по базе повреждений СТ ЭДИС (2016)

Место дефекта:
обмотка, ПУ, магнитопровод, главная изоляция



Рис. 1. Алгоритм работы с данными



Наилучший результат машинного обучения (модель обучения) по локализации места дефекта на основе данных измерений с указанием вероятности возникновения представлен в блоке ЭДИС «Альбатрос»

А) Пример локализации по одному АРГ от 12.03.2009



Определение места дефекта

Наиболее вероятное место дефекта: обмотки; вероятность: 69%.

Второе по вероятности место дефекта: магнитопровод; вероятность: 30%.

Б) Пример локализации по АРГ и Ром обмоток от 07.08.2009



Определение места дефекта

Наиболее вероятное место дефекта: РПН и/или ПБВ; вероятность: 100%.

Овчинников К.В. Выявление места повреждения силового трансформатора методами машинного обучения Журнал «Автоматизация и IT в энергетике» декабрь 2016 № 12 (89)



Перечень знаний ЭДИС «Альбатрос» , полученных путем проведения интеллектуального анализа эксплуатационных данных и описания дефектов ЭО (ноу-хау ЭДИС 2006-2015гг)

Синтез графических образов дефектов по АРГ

- 8 видов дефектов трансформаторов
- 9 видов дефектов ТТ; - 3 вида дефектов ТН
- 10 видов дефектов высоковольтных вводов

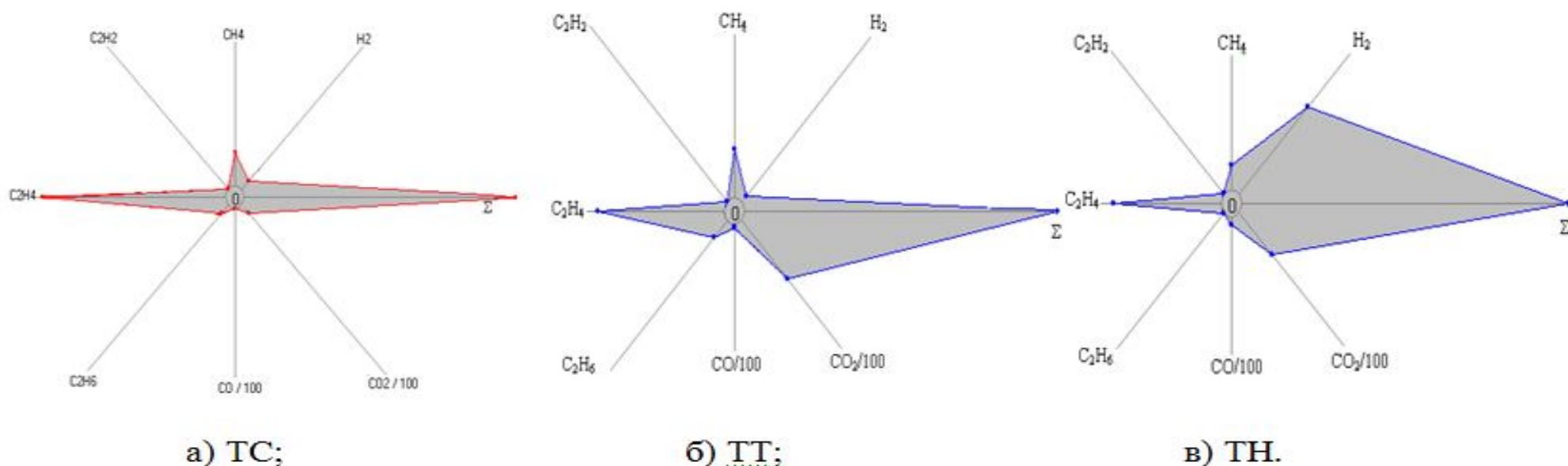


Рисунок 3 – Образы высокотемпературного нагрева для разных видов оборудования

Критерии оценки газов из газового реле

Понимание... БД... рекомендаций



Идентификации вида дефекта по методу Давиденко-Овчинникова

Рассматривалось 256 дефектов СТ в составе:

- паспортные характеристики СТ;
- результаты АРГ и других измерений,
- описание дефекта, обнаруженного при вскрытии трансформатора;
- классификация дефекта по результатам вскрытия (1эт)

2. эт. Расчет относительных концентрации газов: $a^i = A^i_{изм} / A^i_{дз}$ СТО 34.01-23-003-2019

3. эт. Атрибуция относительных концентраций газов согласно правилу:

А – основной газ, при a^i_{max}

Б – газ с высоким содержанием (a^i вторая по величине), $a^i \geq 1$;

В – a^i третьей\второй по величине, но $a^i < 1$;

Г – все остальные газы.

4.эт. Путем машинного обучения выделялись буквы, характерные для газов по каждому из 8 дефектов.

5.эт. Тестирование



Идентификации вида дефекта по методу Давиденко-Овчинникова

в СТО 34.01-23-003-2019

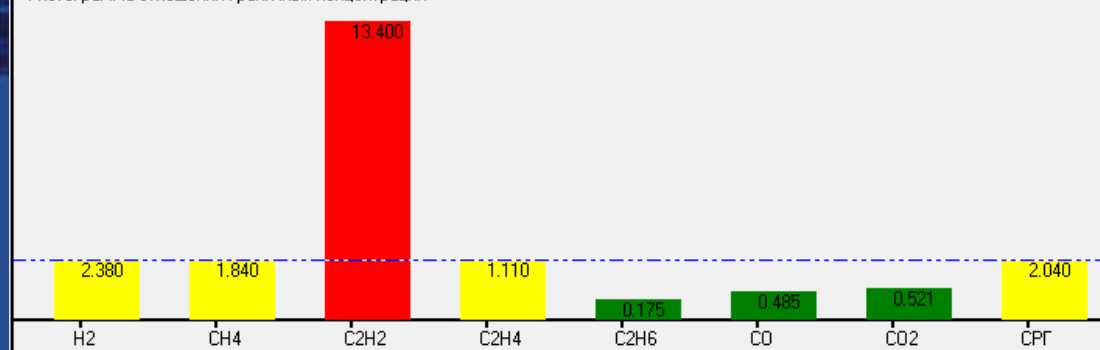
Уточненный с помощью машинного обучения метод идентификации вида дефекта представлен в таблице.

№	Вид прогнозируемого дефекта	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2
1	Термический дефект (до 300 °С)	В, Г	Б	А	Г, В	Г
2	Термический дефект (от 300 до 700 °С)	Г	А	В	Б	Г
3	Термический дефект (более 700 °С)	Г	Б	В	А	Г
4	ЧР	А	В	Г	Г	Г
5	Искровые ряды малой энергии	А	В	Г	Г	Б
6	Дуга, искровые ряды большой энергии	Б	В	Г	Г	А
		Г	В	Г	Б	А
7	Композиция дефектов с преобладанием дефекта электрического характера	Г	Б	Г	В	А
8	Композиция дефектов с преобладанием дефекта термического характера	В, Г	А	Б	Г	В, Г



Пример оценки тех.состояния СТ по АРГ системой с подтверждением дефекта

Гистограмма отношений граничных концентраций



Сигнализация «Альбатрос» по газам ХАРГ



Поиск системой образа дефектов из базы знаний

Казанские ЭС РЭС: 7 ВПП ПС: Азино 110/10 кВ Т-2 Бак Фаза: _

ДИАГНОЗ по АРГ:

26.12.2018

ТП: Разряды малой мощности

АГ: Дуга, разряды большой мощности

РЕКОМЕНДАЦИИ по АРГ:

Предотказное состояние. Повторить АРГ. При подтверждении роста концентраций газов - отключить оборудование. Следующий АРГ рекомендуется провести через 1 дн.

Во время ремонта РПН
обнаружено не полное
замыкание контакта
Дефект подтверждён!!!

Сжатие признакового пространства параметров изоляции с помощью нейронной сети позволяет оптимизировать логический вывод по оценке тех.состояния изоляции СТ

где $k = \overline{1, 10}$ - номер схемы;
 $n = \overline{1, 7}$ - номер узла первого уровня;
 W_{kn} — коэффициент уверенности, учитывающий чувствительность параметра и степень доверия к схеме;
 T — число активных линий (получивших код признака);
 Y - переменная, описывающая код категории нечеткой логики признака, причем, линия YR60 двойная, так как участвуют признаки двух групп: В и К:

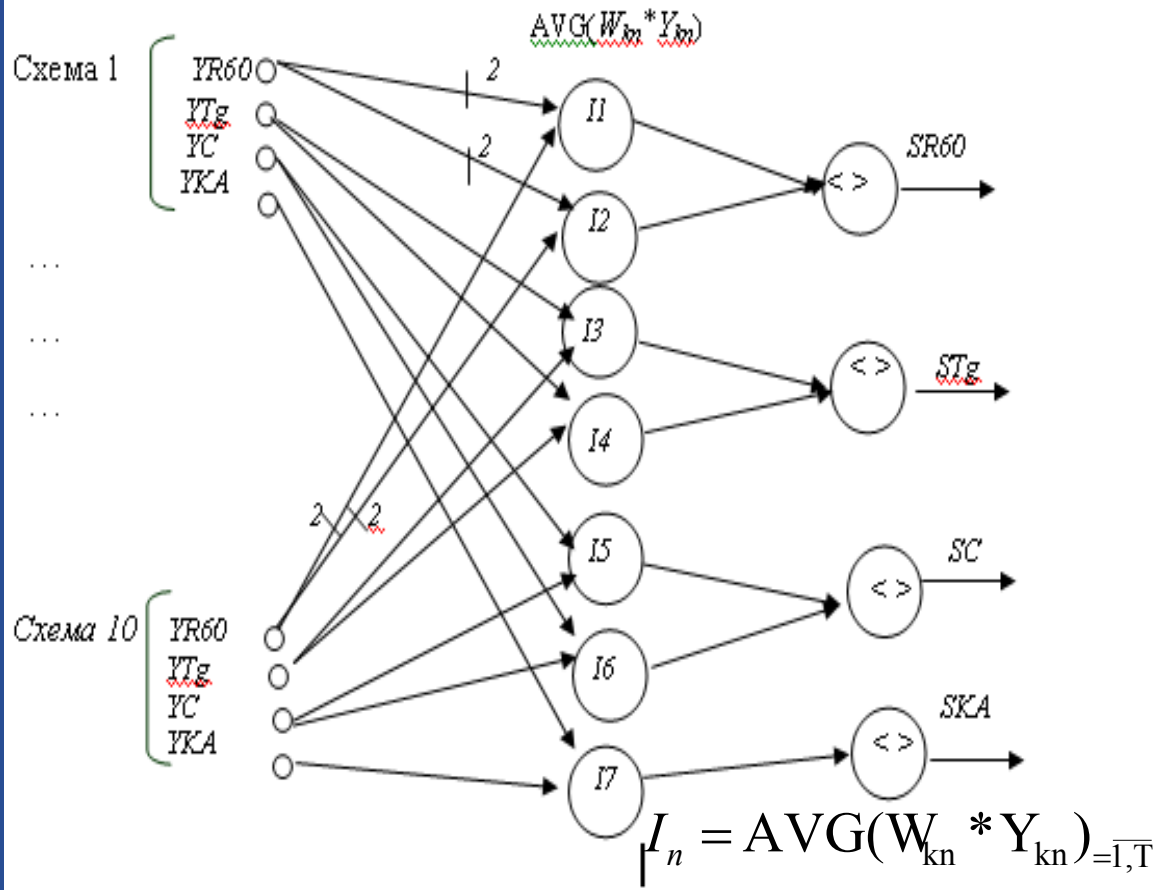


Рисунок 3.2 - Схема трансформации признакового пространства

Сигнал на выходе узлов второго уровня определяется ступенчатой функцией вида:

$$S(I_n) = \begin{cases} 3 & \text{при } I_n \geq L_{\text{MAX}_n}; \\ 2 & \text{при } L_{\text{MAX}_n} > I_n \geq L_{\text{ДОП}_n}; \\ 1 & \text{при } L_{\text{ДОП}_n} \geq I_n > L_{\text{ДОП}_y} \text{ AND } I_n \neq 0; \\ 0 & \text{при } I_n = 0; \\ -1 & \text{при } L_{\text{MAX}_c} < I_{n+1} \leq L_{\text{ДОП}_c}; \\ -2 & \text{при } I_{n+1} \leq L_{\text{MAX}_y}. \end{cases}$$



Признаковое пространство трансформируется, следуя от одного модуля БЗ к другому по последовательности этапов анализа ситуации в соответствии с операциями мышления эксперта. Распознавание класса состояния оборудования ведется модулями по вектору, описывающему анализируемый объект в признаках подпространства

Процесс вывода решения БЗ ЭДИС. Построение Л Логико-математической модели описывает объект и его тех.состояние в виде логико- математической модели

ЛММ: $G^D_{JY} = (Kn, Pn, Vn, Se, Hz, Um, Lb, Ti)$

признаки:

- оценка отклонения от ДЗ (ПДЗ);
 - оценка отклонения от базового замера;
 - оценка тренда параметра;
 - оценка соотношения параметров;
 - предыстория;
 - выполненные операции ТОиР;
 - конструктивные особенности;
 - оценка наработки;
 - особенности метода измерения.
- Для каждого вида оборудования (узла) и каждого вида измерения разработана своя ЛММ

Операции мышления эксперта	Суть преобразования пространства диагностических признаков	Функции модулей базы знаний		№ страт
		по оценке технического состояния	по планированию действий персонала	
Поиск	формирование векторов в пространствах диагностических признаков F_1	подготовка данных δ анализу	Формирование рекомендаций по проверке достоверности измерения и проведению повторных измерений R_{pl}	1
Сравнение				
Оценка				
Селекция	разбивка исходного пространства на подпространства, коррелированные с появлением дефектов одинакового характера / свертка пространства с помощью нейронной сети F_2			
Обобщение				
Абстракция	проекция характерных, чувствительных симптомов в подпространство меньшей размерности F_3	Выделение наиболее существенных признаков	Составление предварительных рекомендации по проведению планово-профилактического R_{pl} или дополнительного контроля R_{add}	
Осмысление		постановка предварительного диагноза D_1		
подтверждение, опровержение, предпочтение	проекция альтернативного пространства из признаков, наличие/отсутствие которых может опровергнуть гипотезу F_4	проверка суждения на непротиворечивость D_2		2
Селекция	расширение пространства дополнением признаков, композиция с проекциями пространств разных видов измерений с учетом разрабатываемой гипотезы F_5', F_5'', F_5'''	выбор необходимых данных для дальнейшего анализа	Составление рекомендации по дополнительному контролю R_{add} для уточнения диагноза; определение операций по ремонту R_{rep}	3
осмысление, обобщение, (уточнение), обоснование		уточнение характера дефекта D_3	Уточнение рекомендации R_{add}, R_{rep} с учетом опасности дефекта	
		определение степени опасности дефекта D_3	Уточнение рекомендации по ремонту R_{rep} с учетом локализации дефекта	
		локализация дефекта D_4		
Обобщение		подготовка данных разных измерений к общему выводу	Вывод общих рекомендаций R_{pl}, R_{add}, R_{rep} из набора рекомендаций разных видов измерений	4
осмысление, предпочтение		вывод общего заключения о состоянии объекта D_0		

Имитации модулями БЗ операций мышления эксперта по анализу ситуации и трансформации пространств диагностических признаков 17

Процесс вывода решения БЗ ЭДИС



ЛММ^{S_{ji}} - модуль построения
логики-математической
модели

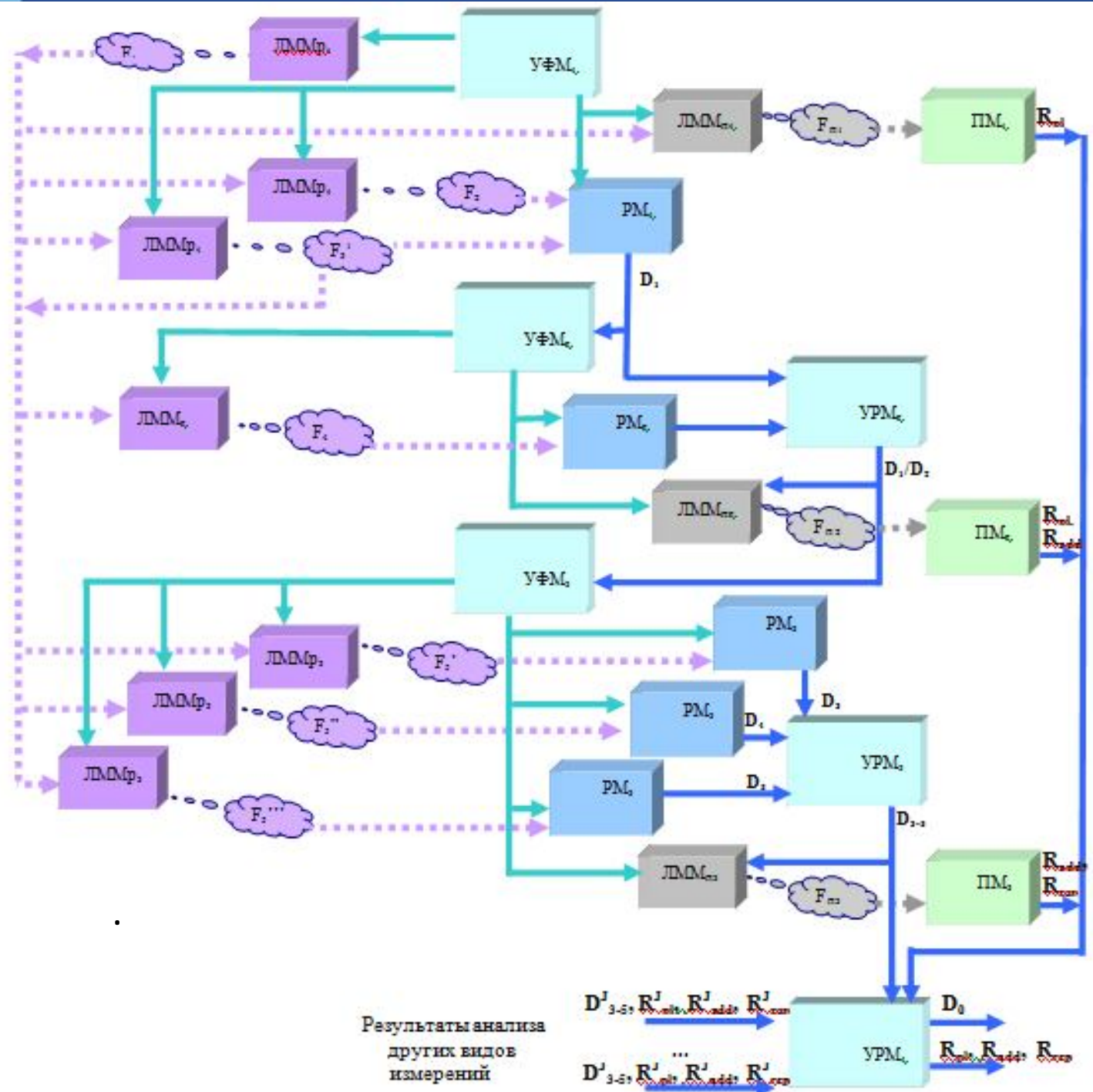
РМ^{S_{ji}} - модуль распознавания
тех.состояния

ПМ^{S_{ji}} - модуль выработки
рекомендаций ТОиР

УФМ^{S_{ji}} - модуль управляющих
фокусирующих метазнаний

УРМ^{S_j} - модуль управляющих
решающих метазнаний

В основном это правила
продукции. Но используются
и модели, полученные с
помощью машинного
обучения, нейронная сеть,
графическое распознавание
по образам дефектов



Выводы



1. Применение в БЗ разработанных ЛММ дает:
 - более полное описание анализируемой ситуации в выбранной предметной области;
 - интеграцию разнородной информации, описывающей состояние объекта и влияющих на него факторов;
 - формализацию описания состояния объекта для применения правил продукции и моделей машинного обучения.
2. Организация БЗ в виде взаимосвязанных модулей, имитирующих соответствующие операции мышления эксперта приводит к:
 - снижению размерности семантического пространства;
 - большей гибкости процесса принятия решения;
 - оптимизации пути вывода решений и выбора необходимого кластера знаний;
 - удобной модификации БЗ и отладке ее работы;
 - минимуму повторов, избыточности, синонимии, снижению объема БЗ;
 - более надежной, быстрой, устойчивой работе ЭДИС.
3. Самообучение ИИ для целей диагностирования на примерах эксплуатации имеет риски переобучения. Считаю, что примеры для машинного обучения тщательно должен отбирать эксперт.