БО-ЭНЕРГО
СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Проблема доверия к автоматизированным онлайн системам мониторинга и диагностики высоковольтного электрооборудования

Афонин Иван Сергеевич
Заместитель генерального директора
ООО «БО-ЭНЕРГО.АСТС», г. Москва

is@bo-energo.ru
www.bo-energo.ru

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ

ПАО «ФСК ЕЭС»

- поставка мобильных АСМД для ПАО «ФСК ЕЭС»;
- комплексное восстановление АСМД Московского энергетического кольца МЭС Центра и объединение в единую сеть АСМД с выводом на уровни ПМЭС, МЭС, ИА, САЦ Россети более 40 единиц разнотипного основного оборудования (Т, АТ, ШР, КЛ, КРУЭ), разных производителей на 4 ПС 500 кВ;
- разработка собственного ПО в области предиктивной диагностики и прогнозирования состояния функциональных узлов трансформаторного оборудования совместно с рядом ВУЗов РФ, ОПЭ в МЭС Центра ПАО «ФСК ЕЭС»;
- участие в рабочей группе ПАО «ФСК ЕЭС» по мониторингу;
- НИОКР совместно с НТЦ ФСК по созданию ПТК визуального осмотра и наблюдения за ЭТО подстанций.

ПАО «Газпром нефть»

- Создание комплексной АСМД силовых трансформаторов и КРУЭ для ЦПС 110 кВ «Север».

Продвижение онлайн газоанализаторов

- внесение анализаторов растворенных газов Serveron в Госреестр средств измерений, аттестация в ПАО «Россети», локализация под своей маркой, создание мобильной версии для РЖД – одна из первых мобильных АСМД (2017 год).

АО «ОЭК»

- создание комплексной АСМД силовых трансформаторов и КРУЭ на ПС 220 кВ Котловка;
- программа оснащения силовых трансформаторов и переходных пунктов АО «ОЭК» устройствами контроля высоковольтных вводов.

ПАО «МОЭСК»

- создание комплексной АСМД силовых трансформаторов на цифровой ПС 110 кВ Медведевская.

АО «РЖД»

- участие в создании комплексной АСМД силовых трансформаторов на тяговой ЦПС «Владимир».

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Разработка отраслевых стандартов и СТО:

- Разработка Стандарта организации ОАО «Ленэнерго» «Требования к устройствам мониторинга технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов 35-110 кВ»;
- Разработка проекта СТО «Методические указания по применению программно-технического комплекса визуального осмотра и наблюдения за состоянием оборудования подстанций для предупреждения возникновения технологических нарушений в электрических сетях»;
- Участие в разработке СТО «Технические требования по оснащению силовых трансформаторов 35 кВ и выше первичными датчиками контроля автоматизированных систем мониторинга и технического диагностирования» для МРСК Центра;
- Участие в разработке СТО «Требования к системам и обеспечению удаленного мониторинга оборудования на РП и ТП 6-20 кВ. Руководящие указания по эксплуатации оборудования, оснащенным системой удаленного мониторинга» для Россети Сибирь;
- Участие в разработке Типовой программы и методики приемо-сдаточных испытаний ПАО «Транснефть» «Системы встроенного диагностического контроля состояния силовых трансформаторов напряжением 110 (220) кВ»;
- Участие в разработке Методических указаний «НК «Роснефть» «Требования к проектированию систем непрерывного и периодического мониторинга технического состояния электротехнического оборудования».

Текущие практические исследования и НИОКР:

- Участие в рабочей группе ФСК ЕЭС по развитию и совершенствованию систем технического диагностирования и мониторинга;
- Разработка программного комплекса оценки и прогнозирования технического состояния и развития дефектов силовых трансформаторов 35-110 кВ на основании измерений, выполняемых автоматизированной системой мониторинга и диагностики и данных СУПА с выдачей рекомендаций эксплуатирующему персоналу для Россети Кубань;
- Разработка ПТК визуального осмотра и наблюдения за состоянием оборудования ПС 220-750 кВ для предупреждения возникновения технологических нарушений для ФСК ЕЭС;
- Разработка типовых требований к построению единой цифровой сети АСМД (ЕС АСМД) основного оборудования, эксплуатируемого на ПС 110-750 кВ, на базе CIM-модели с созданием единого облачного сервера и реализацией пилотного проекта ЕС АСМД с применением современных датчиков и средств мониторинга для ФСК ЕЭС;
- Разработке унифицированной IoT-платформы для диспетчеризации данных о состоянии оборудования ПС для Россети Кубань.

ТЕКУЩИЙ СТАТУС АСМД В РФ

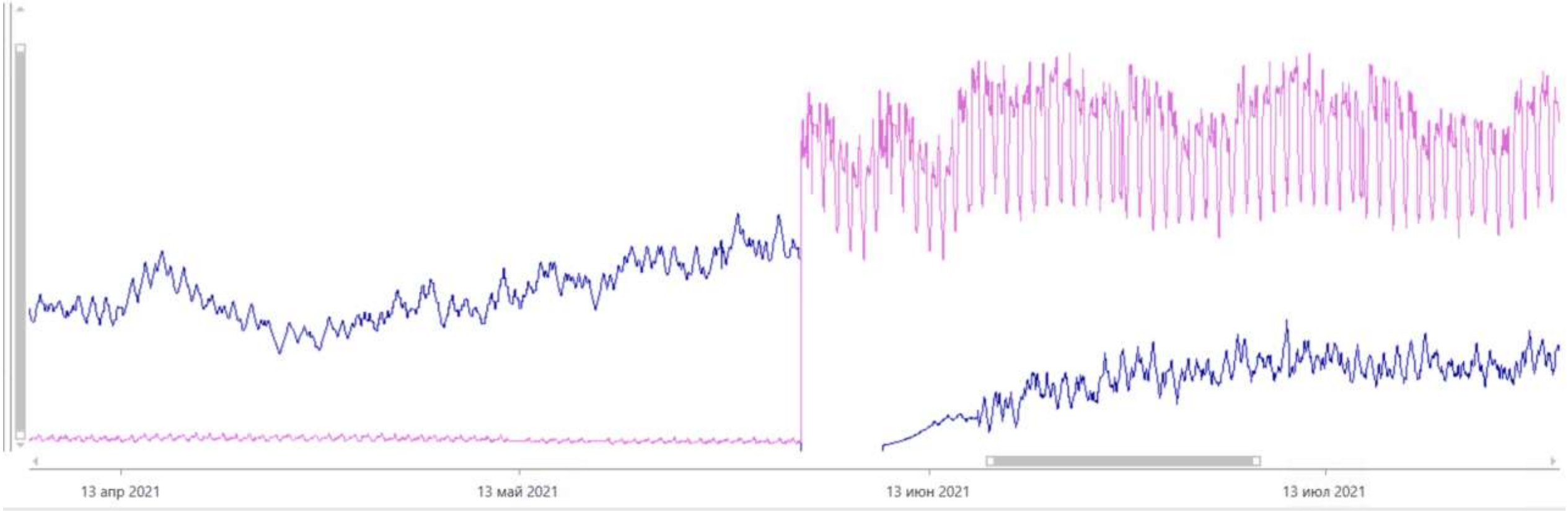
Только в ПАО «Россети» более 1000 единиц основного оборудования оснащено компонентами АСМД различных производителей и различной реальной функциональности.

По ситуации на настоящее время системы АСМД и их компоненты:

1. Эксплуатируются на уровне ПС, в лучшем случае сигналы доведены до АСУ ТП, часто остаются у бака или в помещении ГЩ. На верхние уровни управления (например в службу диагностики) как правило не передаются;
2. Содержат различный функционал, вендорозависимый и различный для систем разных годов выпуска;
3. Содержат сигналы других систем, в том числе АСУ ТП и РЗА, что является избыточным, а перегруженность ведет к отказам;
4. Не всегда производится корректировка измерений на рабочие параметры;
5. Отсутствует синхронизация с испытаниями и измерениями по СТО 34.01-23.1-001-2017, фактами ТОиР, учетом срока службы и паспортными данными;
6. Применяются предустановленные вендором параметры диагностических матмоделей;
7. Критерии online определены не для всех моделей и не всегда легитимизированы;
8. Различные матмодели формируют предупредительные сигналы независимо друг от друга; перегрузка пользователей сигнализацией, не всегда релевантной;
9. В ряде случаев в применяемых решениях АСМД некоторые функции не востребованы (например, проблема кумулятивного расчета ресурса).

Заключение о состоянии лишь отдельных систем и узлов трансформатора при том только с некоей вероятностью и привлечением эксперта.

КЕЙС: ДЕГАЗАЦИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ



ОТНОШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПОСЛЕДСТВИЯ

Существуют обоснованные сомнения эксплуатации в возможности АСМД давать надежные и обоснованные диагностические заключения.

Последствия:

- ✓ Мнение: «достаточно выполнить мероприятия ОиН»;
- ✓ Мониторинг «post-mortem» («черный ящик», если система работала);
- ✓ Нет ресурсов для экспертной диагностики;
- ✓ Проблема ответственности за принятие решения;
- ✓ Проблема ответственности за работоспособность АСМД;
- ✓ Мораторий (совместный приказ).

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

ПРИКАЗ

10.04.2012 № 147 / 189

О технических решениях, принимаемых при разработке проектно-сметной документации

4.3. Для А(Т) установленной мощностью более 167 МВА использование прямой ввод от датчиков систем мониторинга и диагностики в АСУ ТП ПС без функциональных промежуточных серверов от производителя систем мониторинга и диагностики.

4.4. Полное исключение применения системы мониторинга (авто)трансформаторов номинальным напряжением 220 кВ и ниже с сохранением возможности их оснащения в перспективе.

ЭВОЛЮЦИЯ МОНИТОРИНГА СИЛОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Этап	Характеристика	С кем контактирует Заказчик	Ценность для Заказчика	Выводы, комментарии
ВЧЕРА	Диагностические приборы для офлайн/лабораторных испытаний или набор отдельных приборов онлайн мониторинга, что экономичнее. Онлайн диагностика позволяет оптимизировать стратегию технического обслуживания. Но пока нет единого подхода к оснащению контролируемого оборудования, нет методологии интерпретации результатов, часто отсутствует надлежащее метрологическое обеспечение.	Производители (экспертные отчеты, как правило платные) и монтажные организации (часто не являются экспертами и не могут оказать содействие в интерпретации)	Низкая, необходим внутренний штат экспертов для ответственного оперативного реагирования на показания системы.	Затруднено принятие решений – требуется сложная процедура, нет адекватного реагирования на предупредительные и аварийные сигналы систем.
СЕГОДНЯ	Автоматизированные системы мониторинга и технического диагностирования (АСМД), объединяющие в себе различный функционал, часто избыточный, т.к. отделены от АСУ ТП. Расчетные диагностические модели и оценка ТС (не всегда релевантные), а также база исторических данных формируются на втором уровне системы (блок мониторинга) отдельно по каждому контролируемому устройству. Единые подходы к оснащению, интерпретации (включая интегральную оценку) и метрологии в стадии формирования.	Инжиниринговые компании, являющиеся экспертами. Поддержка от производителей отдельных диагностических модулей при необходимости.	Средняя, внедрение обособленных АСМД с полным функционалом не всегда является экономически обоснованным.	Системы наиболее полно используются при наличии утвержденных методик, однако принятие решений по прежнему затруднено, т.к. невозможно полноценное прогнозирование в отрыве от АСУ ТП и единой сети.
ЗАВТРА	**Автоматизированные системы оценки текущего состояния (АСТС), оптимизированные по функционалу, метрологии, получающие из АСУ ТП необходимые рабочие параметры (нагрузка, ток и т.п.). Диагностические модели на верхнем уровне с учетом суммы технологий, интегральная оценка ТС по утвержденным методикам, база исторических данных и данных офлайн и лабораторных испытаний, верификация онлайн измерений, прогностические модели высокой достоверности.**	Только с экспертами как внутри, так и вне компании и только по сложным кейсам, о прогнозируемом наступлении которых сообщит система.	Высокая, возможность формировать рекомендации эксплуатационному персоналу по результатам показаний системы.	Такого рода системы полностью отвечают потребностям Заказчика и соответствуют концепции цифровой трансформации.

ПОЛЬЗОВАТЕЛИ АСМД

«От мониторинга – к реальной автоматизированной диагностике».

Мнение: «Считаем ИТС, зачем нужна АСМД?»

Потребность в предупреждении технологических нарушений через оценку ресурса

	Временные рамки	Основной пользователь и бизнес-процессы	Требуемый результат
1	Немедленная краткосрочная перспектива	Энергообъект, структурное подразделение (группа энергообъектов) • Аварийная эксплуатация • Аварийное техническое обслуживание	• Безопасная непрерывная эксплуатация • Надёжность
2	Среднесрочная перспектива	Региональная группа структурных подразделений • Плановое техническое обслуживание • Планирование замены • «Интенсивная терапия» и «раннее предупреждение»	• Потребность в техническом обслуживании • Краткосрочная замена
3	Долгосрочные	Исполнительный аппарат • Долгосрочное планирование • Стратегия замены • Контроль эффективности эксплуатации АСМД	• Оптимизация технического обслуживания • Долгосрочная оценка необходимости замены

ВИДЫ КОНТРОЛЯ, ПАРАМЕТРЫ И ВЫЯВЛЯЕМЫЕ ДЕФЕКТЫ *

Дефекты твердой изоляции

Старение	B1 ,A, C, B4, K, B3, B11, B2
Загрязнение	C, B5, B4, B9 B6
Увлажнение	C, B3, N A, F, B6
Термическое разложение	A,C,B4,B1,B11,K
Электрический пробой ползущий разряд	A, C
Электрический разряд	A, C

Дефекты обмоток

Нарушение контактов	E, A
Деформации обмоток	G, C, A
Ослабление прессовки обмоток	G D, A
Замыкание витков обмоток	A, E

Дефекты устройств защиты масла

Разгерметизация	B8, A, B3, B1, B4, B6
Нарушение работы воздухоосушителя	B3, B1, M, C, B4, B6

Хроматографический анализ	A
ФХАМ: B1- кислотное число B2-реакция водной вытяжки B3 - влагосодержание масла B4 - тангенс диэл.потерь B5- мехпримеси B6 - пробивное напряжение B7 - температура вспышки B8-обшее газосодержание B9 - определение шлама B10 - антиокислит.присадка B11 -фурановые соединения	B
Диэлектрические характеристики изоляции	C
Опыт ХХ (ВАХ)	D
Измерение омического сопротивления обмоток	E
Измерение Zкз	G
Удельное объемное сопротивление масла	F
Влагосодержание твердой изоляции	N
Определение ССП	K
Внешний осмотр	M

Состояние масла

B1,B4,B2,F,B10 B3, B6, A, C	Старение
B4, B5, B6, B9 F, C, B3	Загрязнение
B3, B6, B4, F C, A, N	Увлажнение
A B5, B3, B8	Разряды

Дефекты магнитной системы

A, D	Старение железа, распрессовка сердечника
A, D B4, B1	Короткозамкнутый контур
D	Повышенная вибрация
A, D	Нарушение межлист, изоляции

Дефекты РПН (ПУ)

E, A	Нарушение контактов, их перегрев
A E	Искрение между контактами
A E	Износ кинематнч. схемы привода
A	Переток масла в бак трансформатора

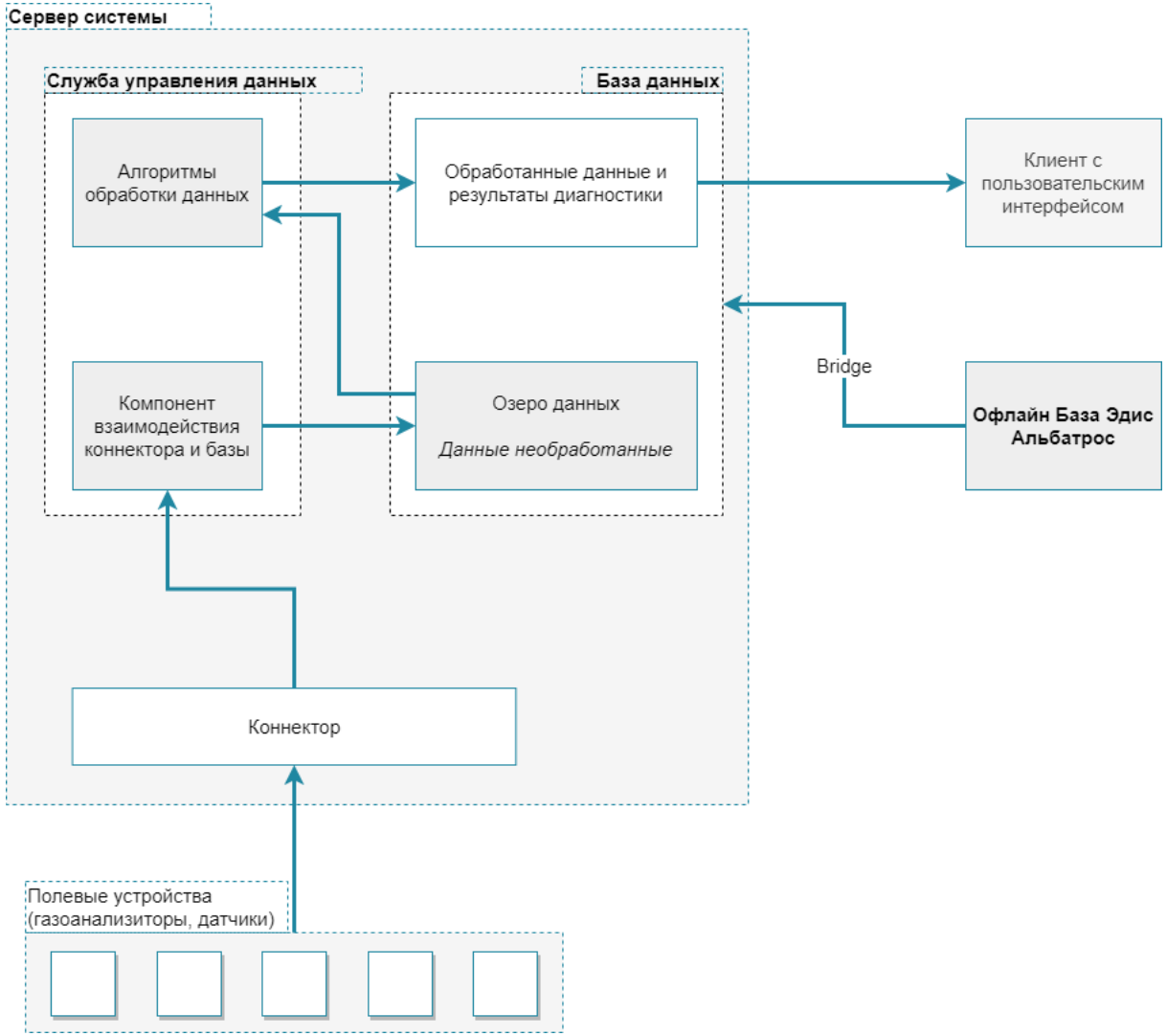
*** - И.В. Давиденко «Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования»**

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ «ЗВЕЗДА АЛЬБАТРОС»

«Звезда Альбатрос» - это трехкомпонентный ПТК с открытой архитектурой, созданный для анализа и управления техническим состоянием силовых маслонаполненных трансформаторов: определения вида развивающегося дефекта, его локализации и прогнозирования хода событий на основании полученных off-line и on-line данных.

Роль оффлайн информации в подсистеме анализа онлайн данных нужна для реализации следующих задач:

- поступающая из оффлайн подсистемы информация влияет на:
  - изменения параметров моделей прогнозирования значений DGA, увлажнения изоляции, расхода остаточного ресурса и пр.;
  - изменение критериев оценки параметров on-line контроля.
- использование для уточнения результатов расчётов, выполняемых по онлайн-данным;
- используется в блоке формирования оперативных рекомендаций персоналу по необходимым операциям ТОиР;
- используется для прогнозирования нагрузочной способности конкретного СТ.



РАСШИРЕННЫЙ ФУНКЦИОНАЛ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ «ЗВЕЗДА АЛЬБАТРОС»

Функционал расширен по сравнению с АСМД по СТО по следующим направлениям:

Расчет влагосодержания в масле и твёрдой изоляции.

- Определены как одни из первоочередных для контроля ресурса Т (АТ, ШР).

Расчет влагосодержания в масле

- Определена необходимость измерения влажности в наиболее нагретой зоне. Поставлена на контроль температура в месте измерения влажности для учета при анализе измерений влажности.
- Введен комплексный графический анализ динамики параметров этой группы, выявление корреляции для формирования диагностических критериев.
- Введены расчеты по достижению ДЗ и ПДЗ по трендам (прогнозам).
- Учтена возможность работы АСМД с внешними системами осушки масла и интеллектуальными осушителями, введены в прогнозные модели сигналы вкл/выкл системы охлаждения

Расчет ресурса твердой изоляции (ТИ)

- Применена полная формула расчета ресурса ТИ (с учетом влияния старения масла)
- Введены показатели максимальной скорости износа изоляции и фактического израсходованного ресурса (относительное и абсолютное исчисление) за Х дней (от дня до года), с возможностью автоматического и ручного выбора.

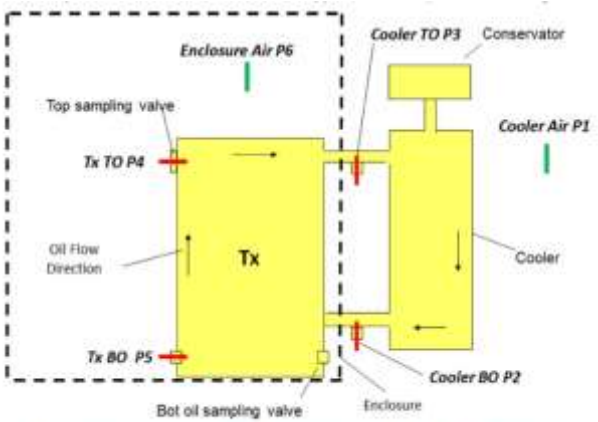
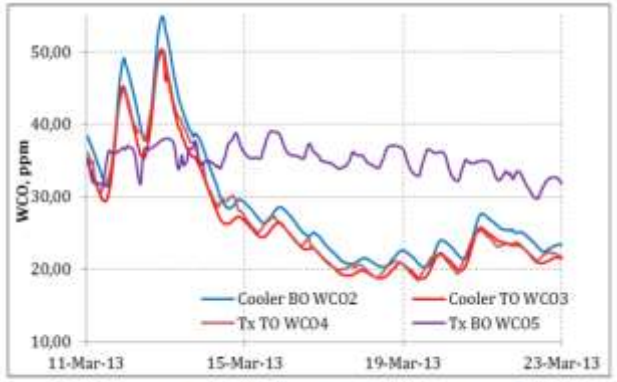


Figure 5.20 Positioning of the moisture probes at the tank and coolers



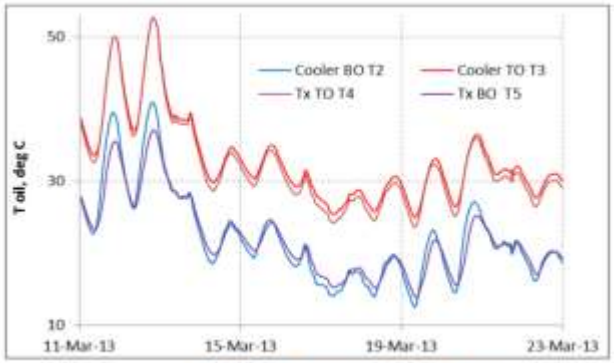


Figure 5.21 Temperature at the sensors

РАСШИРЕННЫЙ ФУНКЦИОНАЛ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ «ЗВЕЗДА АЛЬБАТРОС»

Температура наиболее нагретой точки обмотки

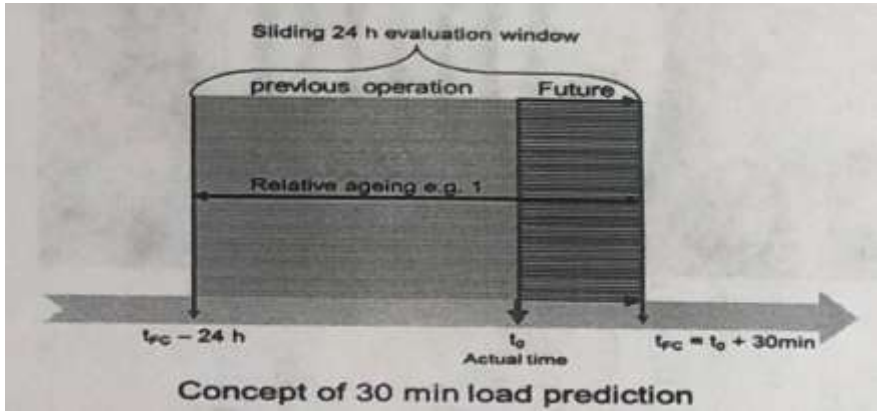
- Применен ряд уточнений в формулах, введены механизмы взаимодиагностики датчиков температуры верхних и нижних слоев масла (Т ВСМ и Т НСМ), алгоритмы верификации on-line измерений;
- Модели корректируются на температуру в камере трансформатора (около оборудования при закрытом размещении), ранее использовалась только температура окружающей среды (Т ОКР).

Контроль и управление нагрузочной способностью (КНС)

- В группе моделей КНС использованы данные износа твердой изоляции (ТИ) и других факторы.
- Введены (по аналогии с зарубежными) динамические показатели допустимого времени перегрузки с учетом различных эксплуатационных факторов.
- Альтернативно стандартному подходу предложена модель, организованная по «Требованиям к перегрузочной способности Т (АТ) по приказу 81 Минэнерго от 08.02.20», в нее включена возможность автоматического пересчета текущего ИТС (или его замены на экспертный ИТС) и последующего перехода между нормативными коэффициентами нагрузки.

Состояние системы охлаждения

- Введена возможность приема данных в АСМД от средств фотофиксации и аудиоконтроля (микрофоны).



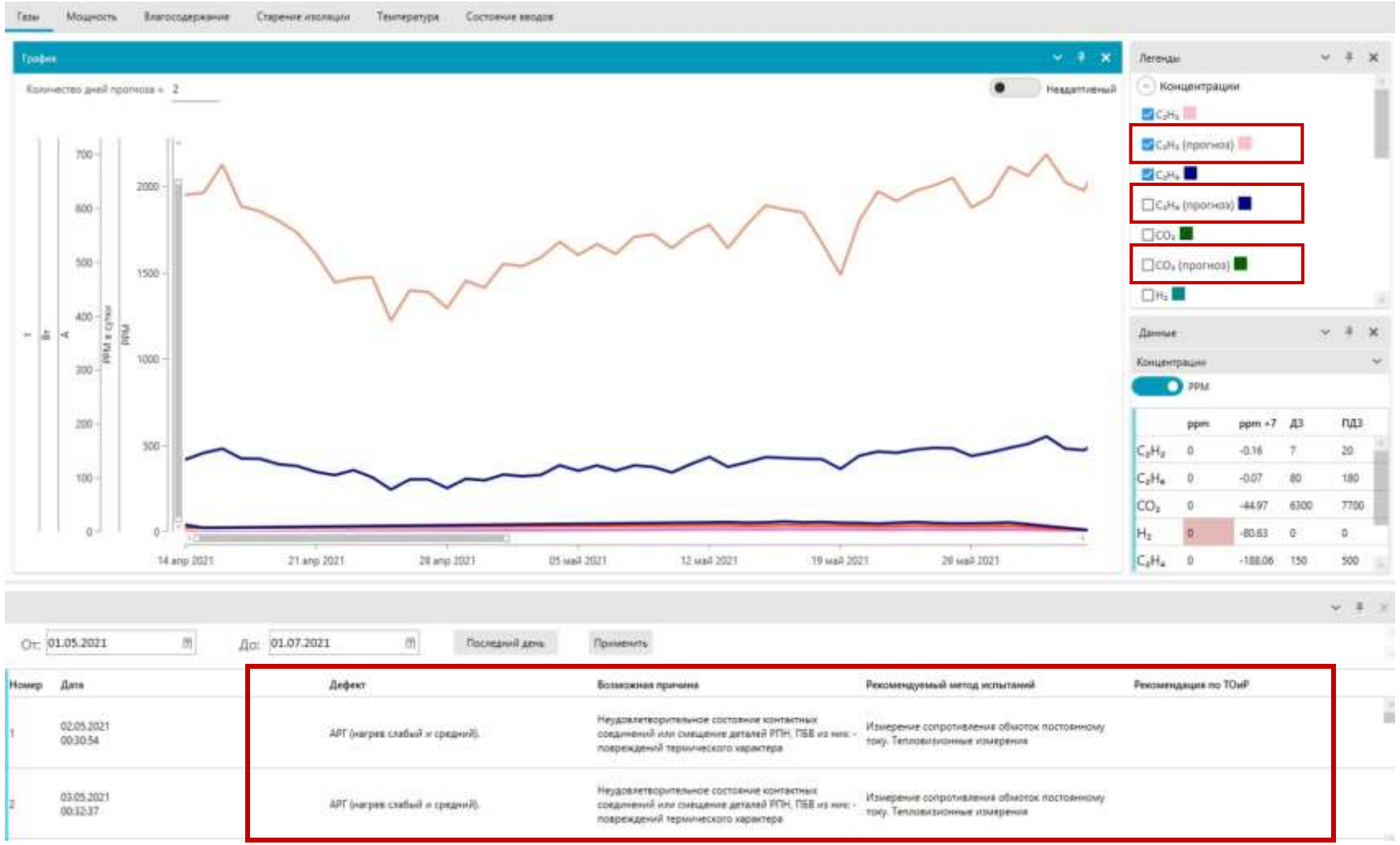
Concept of 30 min load prediction

Режим нагрузки	Коэффициент допустимой длительной перегрузки при температуре охлаждающего воздуха (воды), °С						
	-20	-10	0	10	20	30	40
Нормальный (без повышенного износа изоляции)	1,20	1,20	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82
С возможным повышенным износом изоляции	1,25	1,25	1,25	1,25	1,20	1,15	1,08

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ «ЗВЕЗДА АЛЬБАТРОС»

Контроль параметров трансформаторного оборудования в динамике

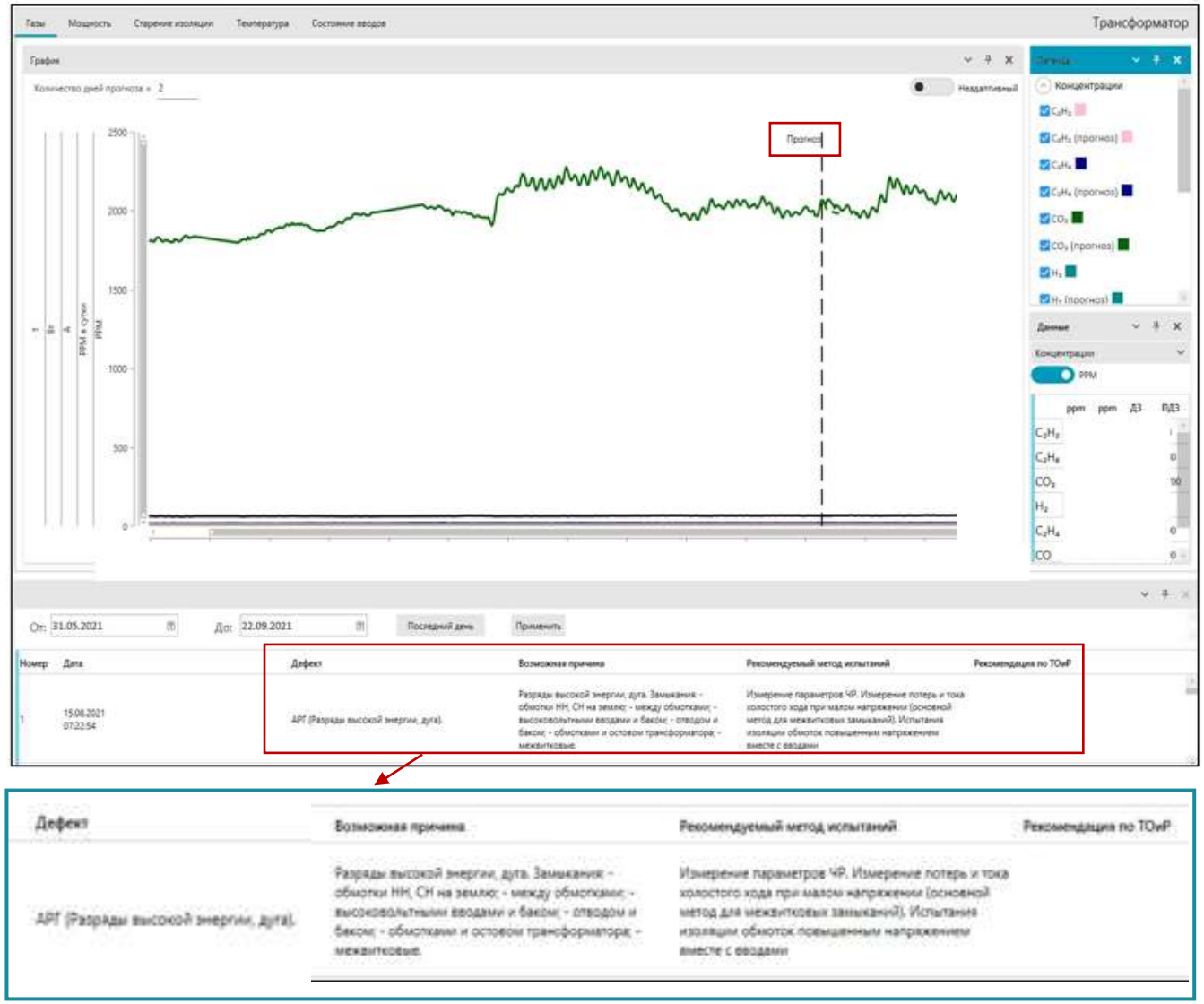
В предлагаемой экспертной модели акцент сделан не только на контроль текущих значений, но и на динамику диагностических параметров, в том числе их тренды и время достижения этих трендов допустимых и предельно допустимых значений. Такой подход позволяет не только оперировать текущими параметрами и состоянием оборудования, но и реагировать на опережение и предотвращать возникновение и развитие потенциального дефекта с дальнейшим аварийным отключением оборудования.



Основной экран, тематическое окно, отображающее показатели, соответствующие одной группе моделей с возможностью выбора индикации ДЗ, ПДЗ

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ «ЗВЕЗДА АЛЬБАТРОС»

- применение модуля off-line, содержащего базу знаний и данные о технических характеристиках каждого трансформатора, результатах традиционных испытаний и измерений;
- использование совместно данных on-line и off-line с последующей их обработкой, что уточняет результат диагностирования и исключает вовлечение в процесс диагностирования некорректных данных on-line измерений;
- адаптивность алгоритмов, используемых в системе, которая позволяет в том числе уточнить математические модели в применении к конкретному типу трансформатора, в приложении к изменяющимся режимным параметрам, данным окружающей среды, текущим и историческим данным контролируемых параметров;
- функционал уточнения индекса технического состояния (ИТС) трансформатора, рассчитываемого off-line по методике Минэнерго, на текущий момент времени по данным on-line.



Основной экран, тематическое окно, отображающее показатели.

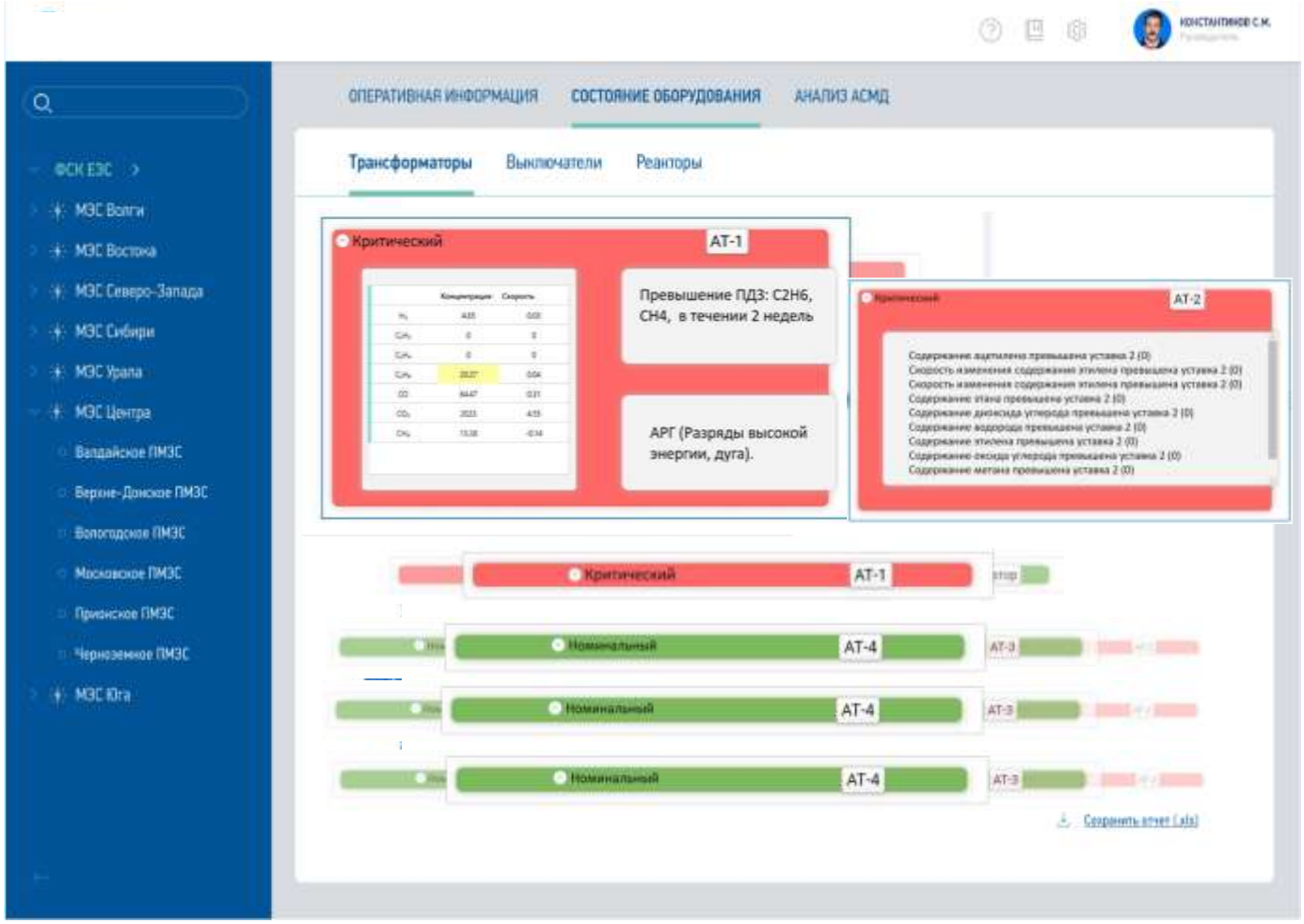
ПОДСИСТЕМА ON-LINE ДИАГНОСТИКИ

Разворачивается на подстанционном уровне АСМД силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов.

Предназначена для отображения данных мониторинга и диагностики силовых трансформаторов на основе набора диагностических моделей в виде графиков, таблиц и цветовых индикаторов.

Инсталлируется вместе с OPC-сервером, настроенным для сбора сигналов с приборов мониторинга и датчиков, установленных на баках.

ПО внесено в Реестр Российского ПО (Приказ Минцифры России от 21.04.2021 № 396 Приложение №1, реестровый №10309)

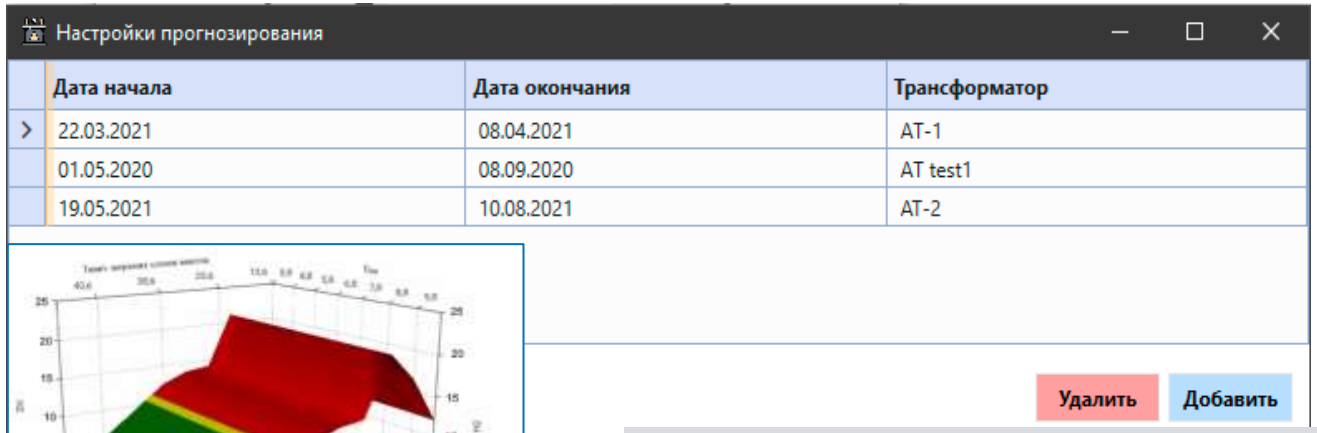


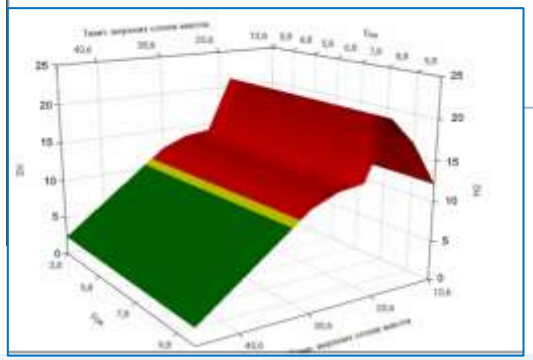
Адаптивный экран

ФУНКЦИИ ПОДСИСТЕМЫ ON-LINE «ЗВЕЗДА АЛЬБАТРОС»

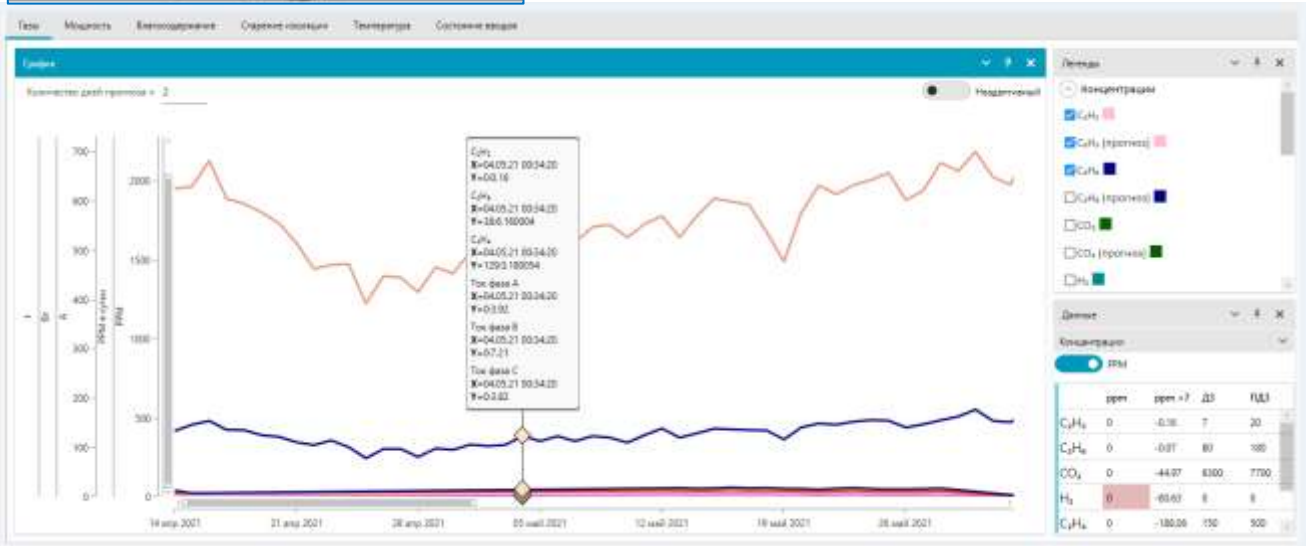
Ключевые функции системы:

- Измерение и сбор текущих параметров с последующей обработкой и хранением диагностической информации, ее архивирование и представление пользователю;
- Формирование интегральной оценки по функциональным узлам и по оборудованию в целом с помощью диагностических моделей, составленных в соответствии с российскими и международными стандартами, в режиме реального времени, включая прогнозный период;
- Регистрация и отображение отклонений значений диагностических параметров с помощью классической сигнализации «светофорного типа», но с выходом на **характер дефекта, диагноз**;
- **Прогнозирование возникновения аварийных ситуаций с учетом текущего технического состояния высоковольтного оборудования** – результат совместной работы с рядом ВУЗов РФ и ОПЭ в МЭС Центра ПАО «ФСК ЕЭС»;
- Контроль и предупреждение возникновения аварийных ситуаций;
- **Выдача рекомендаций по действиям эксплуатационного персонала**.





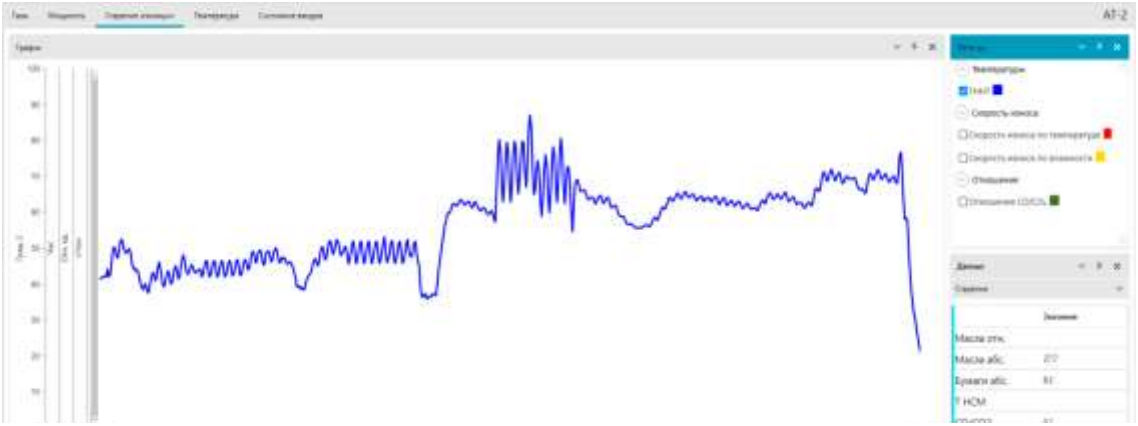
Инструмент отображения трехмерных графиков для визуализации сложных прогнозных зависимостей.

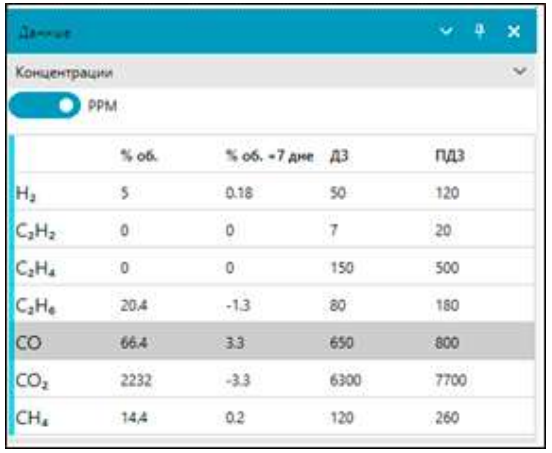


УГЛУБЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В ПОДСИСТЕМЕ ON-LINE «ЗВЕЗДА АЛЬБАТРОС»

В on-line подсистеме проводится углубленный анализ данных в следующих направлениях:

- температурные режимы работы, включая взаимные расчеты температур верхних слоев масла и температуры наиболее нагретой точки;
- влагосодержание масла и твердой изоляции обмоток с учетом данных о температуре, марке масла и степени его старения;
- оценка технического состояния по результатам анализа концентраций газов, растворенных в трансформаторном масле;
- разноплановые оценки остаточного ресурса изоляции, включая его расход с учетом режима работы и технического состояния системы изоляции бумага-масла, а также проведенных операций ТОиР;
- контроль нагрузочной способности с учетом срока эксплуатации СТ, а также индекса технического состояния, рассчитанного по данным off-line и on-line контроля.



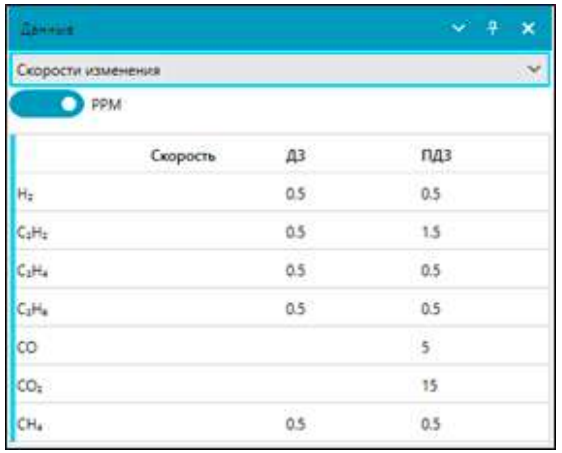


Данные

Концентрации

PPM

	% об.	% об. -7 дне	ДЗ	ПДЗ
H_2	5	0.18	50	120
C_2H_2	0	0	7	20
C_2H_4	0	0	150	500
C_2H_6	20.4	-1.3	80	180
CO	66.4	3.3	650	800
CO_2	2232	-3.3	6300	7700
CH_4	14.4	0.2	120	260



Данные

Скорости изменения

PPM

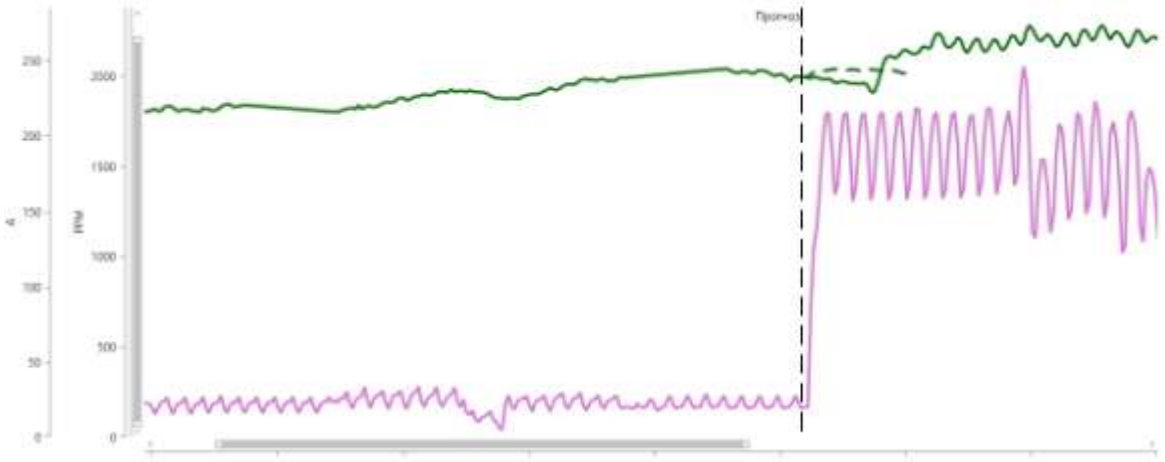
	Скорость	ДЗ	ПДЗ
H_2		0.5	0.5
C_2H_2		0.5	1.5
C_2H_4		0.5	0.5
C_2H_6		0.5	0.5
CO			5
CO_2			15
CH_4		0.5	0.5

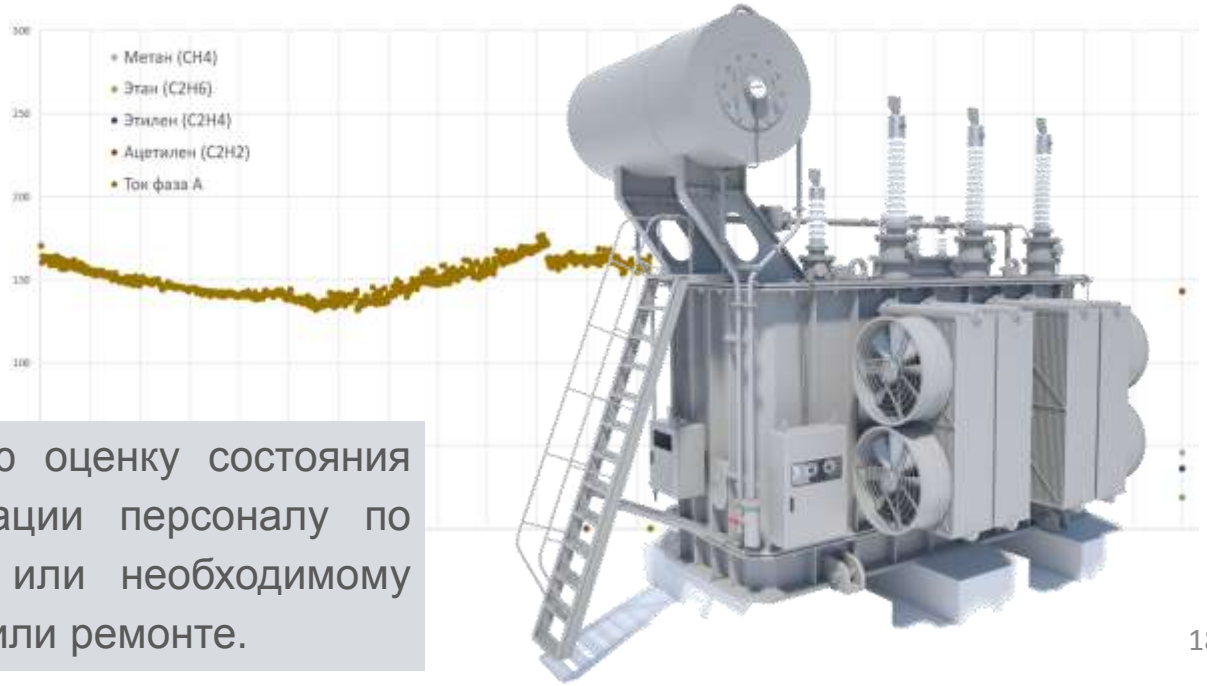
Прогнозирование по каждому диагностируемому газу с формированием оценки типа развивающегося дефекта. Точность прогноза до 90%

ЭФФЕКТ ОТ СОВМЕЩЕНИЯ ON-LINE И OFF-LINE ДАННЫХ

Комплексный подход к прогнозированию имеет практическую полезность для предупреждения дефектов на ранней стадии. Совмещение полученных off-line и on-line данных применимо для:

- взаимной проверки достоверности (верификации) данных;
- онлайн-контроля и корректировки показаний, учитывающих процессы старения материалов; **автоматические корректировки моделей** повышают точность on-line диагностики
- прогнозирования развития параметров трансформатора для определения начала отклонения режима работы трансформатора от нормального;
- формирования рекомендаций об обслуживании и внесении изменений в режим работы трансформатора на основе off-line и on-line измерений;
- усиление комплексной диагностики по данным off-line за счет дополнительного использования данных on-line о режиме работы транс-ра, ТННТ, скорости расхода ресурса и увлажнения твердой изоляции.





Система в конечном итоге выдает интегральную оценку состояния каждого трансформатора, диагноз и рекомендации персоналу по необходимому изменению режима его работы или необходимому сейчас или в будущем техническом обслуживании или ремонте.