

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТА «МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ДИАГНОСТИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЮ УСТРОЙСТВ РПН ПО АРГ И ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА МАСЛА ИЗ БАКА КОНТАКТОРА ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-220 КВ»

В. В. Лопатин
Главный специалист группы диагностики
департамента эксплуатации

И. В. Давиденко
д. т. н., профессор кафедры «Электротехника» УрФУ

06.08.2025 | Тольятти

В соответствии с приказом ПАО «Россети» от 22.01.2021 № 21 «Об утверждении Плана разработки НТД» (в редакции приказа ПАО «Россети» от 02.09.2022 № 427) и письма ПАО «Россети» от 16.12.2022 № ЛЕ/332/192 «О согласовании технического задания» компании «Россети Тюмень» поручено выполнить разработку Стандарта организации «Методические указания по диагностированию технического состояния РПН по АРГ и показателям качества масла из бака контактора для трансформаторов 35-220 кВ» (далее – Стандарт) с привлечением специализированной организации.

Для исполнения данного поручения «Россети Тюмень» заключен договор с ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» и подготовлен репрезентативный массив данных по анализу растворённых в масле газов (далее – АРГ) из баков контакторов РПН силовых трансформаторов 35-110 кВ.

Для дополнения массива данных по выявленным дефектам РПН (контактора) с результатами АРГ и показателями качества трансформаторного масла были получены выборки от ДО и филиала МЭС ГК «Россети».

На сегодняшний день итоговая версия Стандарта направлена на рассмотрение Координационного Совета ПАО «Россети».

1. Доля повреждений переключающих устройств (РПН и ПБВ) составляет одну треть от общего числа повреждений силовых трансформаторов и занимает одно из первых мест их повреждаемости.
2. В отечественных руководящих документах отсутствуют критерии оценки концентраций газов из контактора РПН и идентификации вида дефекта по АРГ, а также требования к необходимости проведения планово-профилактических измерений и диагностике дефектов.
3. Снижение затрат на выявление дефектов в контакторе РПН без его разбора.
4. Критерии оценки параметров качества масла (ФХА) из баков РПН, указанные в действующих НТД и рекомендуемые заводами-изготовителями, не согласованы.
5. Применение критериев оценки результатов АРГ и ФХА из бака РПН, учитывающих режимы работы и конструкцию РПН, позволит сократить число случаев несвоевременного выявления дефектов и позволит снизить число необоснованных операций технического обслуживания и ремонта.

При разработке Стандарта «Методические указания по диагностированию технического состояния РПН по АРГ и показателям качества масла из бака контактора РПН для трансформаторов напряжением 35-220 кВ» должны быть устранены перечисленные выше недостатки.

Новый документ разрабатывается для применения в АО «Россети Тюмень» и других ДО и филиалах МЭС Группы «Россети».

Применение Стандарта позволит:

- повысить надежность эксплуатации переключающих устройств силовых трансформаторов;
- снизить риски ущербов;
- продлить ресурс работы трансформаторов за счет правильного и своевременного назначения необходимых операций технического обслуживания и ремонта на основе достоверной оценки технического состояния.

Достоверность оценки повышается за счет:

- разработки системы дифференцированных критериев оценки (регламентированных значений) результатов АРГ из контакторов РПН, адаптированной к парку силовых трансформаторов РФ, учитывающей влияние на концентрации газов конструктивных особенностей оборудования, режимов работы (количества переключений РПН), марок масел и срока эксплуатации;
- разработки метода идентификации вида развивающегося дефекта на основе результатов АРГ из контакторов РПН, адаптированного к парку РПН, эксплуатируемых в РФ, учитывающего влияние количества переключений РПН;
- усовершенствования методов интерпретации вида дефекта на основе АРГ из бака силовых трансформаторов и газового реле;
- уточнение системы критериев оценки (регламентированных значений) параметров качества масла контактора РПН с учетом влияния на контролируемые параметры конструктивных особенностей оборудования, режимов работы (количества переключений РПН), марок масел и срока эксплуатации.

Объем выборки для исследования:**1. Силовые трансформаторы 35 кВ**

- Пробивное напряжения, кВ – 3 696 шт.
- Влагосодержание тр. масла, г/т – 825 шт.
- Содержание мех. примесей, % массы (класс) – 497 шт.
- ХАРГ – 185 шт.

2. Силовые трансформаторы 110 кВ

- Пробивное напряжение, кВ – 27 077 шт.
- Влагосодержание тр. масла, г/т – 13 860 шт.
- Содержание мех. примесей, % массы (класс) – 10 033 шт.
- ХАРГ – 1 083 шт.

3. Силовые трансформаторы 220 кВ

- Пробивное напряжение, кВ – 2 073 шт.
- Влагосодержание тр. масла, г/т – 1 464 шт.
- Содержание мех. примесей, % массы (класс) – 409 шт.
- ХАРГ – 332 шт.

В базе данных ЭДИС «Альбатрос» было накоплено порядка 60-70 % данных, полученных из 8 филиалов АО «Россети Тюмень».

Недостающую информацию по оборудованию 35-220 кВ предоставили другие ДО и филиалы МЭС Группы «Россети», а также 2 инженерных центра (диагностические предприятия).

Проведен дисперсионный анализ данных для выявления влияния на контролируемые параметры АРГ и ФХА следующих факторов:

- тип устройства РПН;
- срок эксплуатации;
- марка залитого трансформаторного масла;
- количество активных переключений (переключений под нагрузкой);
- класс напряжения РПН;
- величина коммутируемого тока.

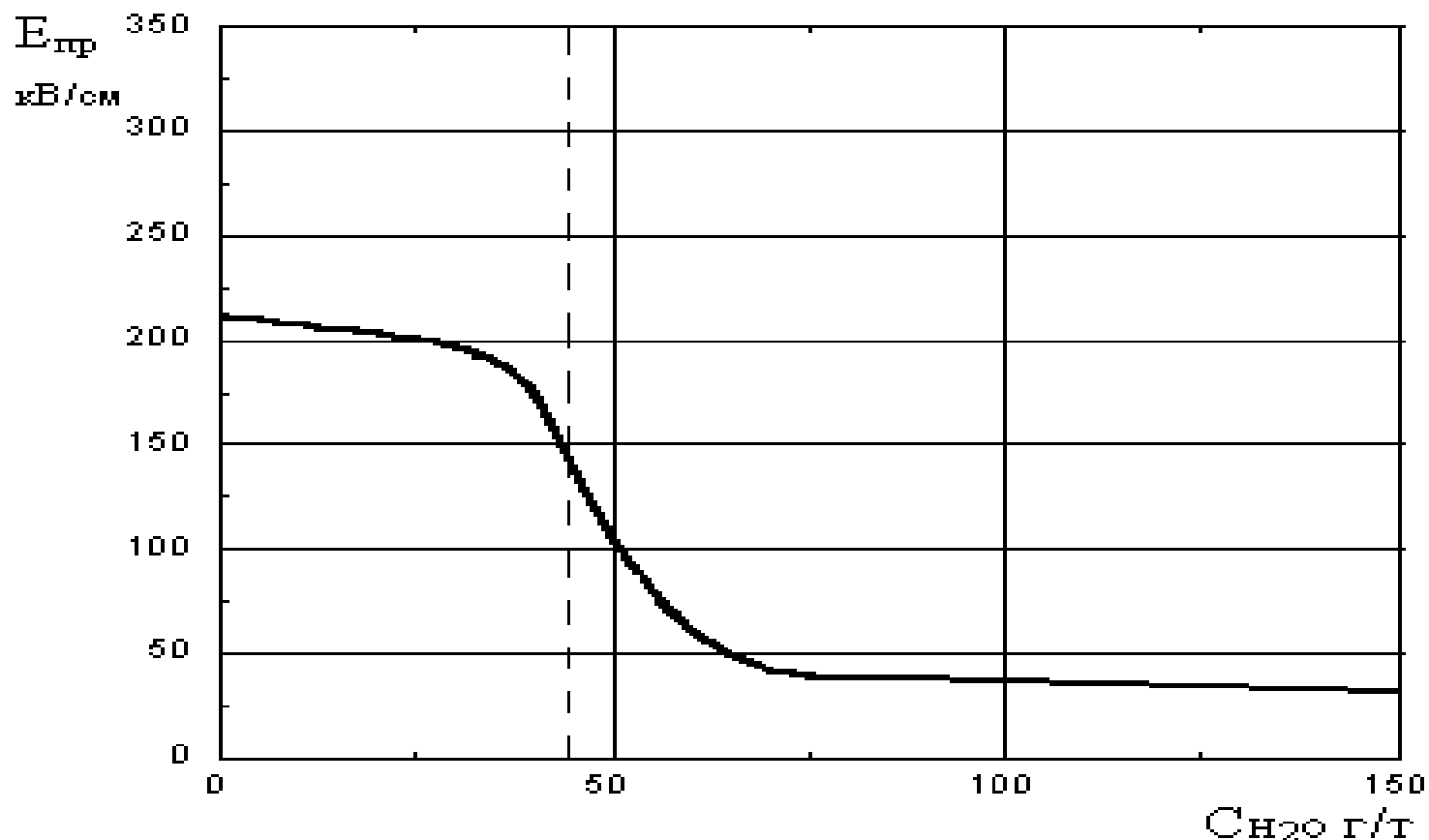
Регламентированные значения параметров качества масла бака устройств РПН классов напряжения 35–110 кВ, полученные на уровне интегральной функции распределения 0,95 для ПДЗ и 0,93 для ДЗ

Параметр качества масла	Марка масла	Класс напряжения устройства РПН, кВ	ДЗ параметра	ПДЗ параметра
Пробивное напряжение, кВ	все	35–110	34	30
Влагосодержание, г/т	Ca _{min} *	35	24	29
		110	21	26
	Ca _{mid} **	35	32	37
		110		
Класс чистоты	все	35–110	12	13

* Ca_{min} – марки масла с минимальным содержанием ароматических углеводородов, такие как ГК, ВГ, Nytro и т. п.

** Ca_{mid} – марки масла со средним и большим содержанием ароматических углеводородов, такие как Т-1500, ТСП, ТКП и т. п.

График зависимости электрической прочности трансформаторного масла от содержания влаги, с указанной границей предельной растворимости воды в трансформаторном масле



«Пробивное напряжение масла зависит не только от количественного содержания растворенной воды, но и от относительной влажности масла, что связано с повышением проводимости примесей в масле при увеличении концентрации воды», – отмечал один из ведущих специалистов современности в области диагностирования трансформаторного оборудования В. В. Соколов.

Периодичность и объем контроля параметров трансформаторного масла из бака РПН

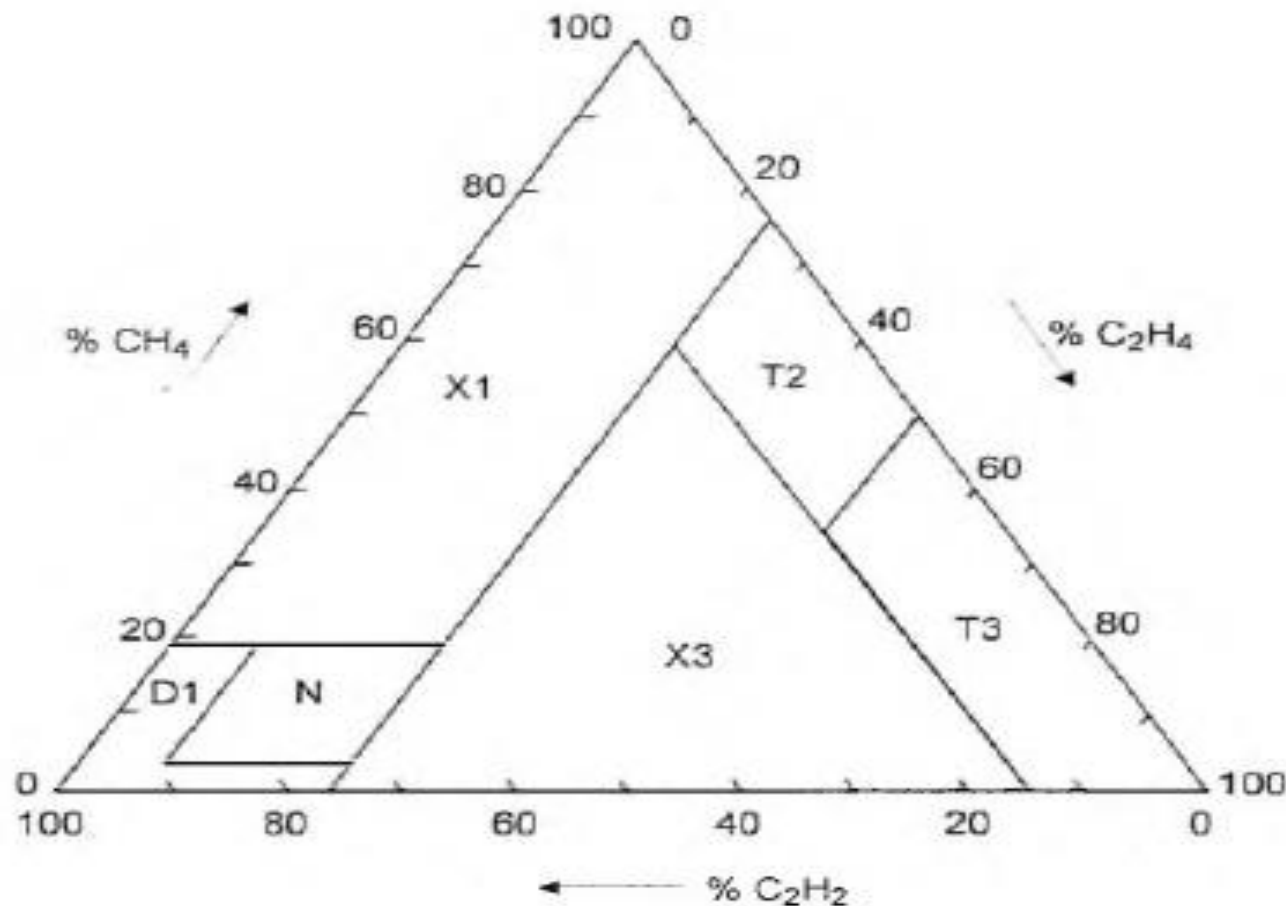
1. Пробивное напряжение и влагосодержание:

- РПН с частыми переключениями под нагрузкой или со сроком эксплуатации более 14 лет или нагрузка под номинал – не реже 1 раза в год;
- РПН, переключаемых со снятием нагрузки, редкими переключениями – 1 раз в 2 года.

2. Содержание механических примесей:

- с учетом интенсивности переключений (под нагрузкой);
- в случае получения неудовлетворительных результатов по пробивному напряжению (менее ДЗ) и допустимом значении влагосодержания (менее ДЗ).

Треугольник Дюваля для диагностики состояния РПН согласно требований МЭК 60599-2015



N – штатное функционирование

T3 – серьезное подгорание контактов при $t > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

T2 – серьезное подгорание контактов при $t > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

X3 – термический отказ, $t < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$;

X1 – перегрев при $t < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

D1 – нештатное образование дуги D1

Для оценки РПН за рубежом используются следующие пары газов, при этом значения ДЗ и ПДЗ для оценки АРГ масла из бака контактора РПН отсутствуют.

$$\text{Отношение } M_1 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2};$$

$$\text{Отношение } M_2 = \frac{C_2H_4 + C_2H_6 + C_2H_2}{C_2H_2}.$$

Отношение пар газов	Нуждается во внимании	Возможное повреждение
M1	≥ 1	$\geq 3...6$
M2	$\geq 0,8$	$\geq 2...4$

Проведя исследования (с помощью дисперсионного анализа) для определения значимости факторов наиболее влияющих на генерацию газов в РПН, была предложена следующая система оценки уровня концентраций газов:

РПН без АРКТ или с малым количеством переключений под нагрузкой (до 40 в год) были объединены в одну группу.

- Уровень определения ДЗ – 0,92, ПДЗ – 0,95 интегральной функции распределения (Давиденко И. В. Методика получения допустимых и предельно-допустимых значений контролируемых параметров маслonaполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных на примере анализа растворенных в масле газов // Электричество, 2009, № 6, С. 10-21.)
- При отсутствии или малом количестве переключений (менее 40 в год) для оценки АРГ в приставных баках устройств РПН могут быть использованы те же критерии, что установлены для трансформаторов (согласно CIGRE Technical Brochure 443: DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria; CIGRE Working Group D1-32; 2010)

Разработка критериев идентификации вида дефектов в контакторе РПН по результатам АРГ

Идентифицировать вид дефекта следует при превышении концентрации одним из газов соотношения своего ДЗ, а другим газом пары, достижения значения половины своего ДЗ.

Пары газов выбраны отличные от международного опыта. В соотношения C_2H_4 / C_2H_6 и CO_2 / CO включены газы, менее зависящие от числа переключений, а в соотношение H_2 / C_2H_2 – газы с одинаковой зависимостью от числа переключений.

Соотношение пары газов	Диапазон соотношения пары газов штатной работы устройства РПН	Дефект устройства РПН, выявляемый, при выходе соотношения пары газов из диапазона, соответствующего штатной работе
C_2H_4 / C_2H_6	10,0 ... 3,7	Термический дефект (перегрев контактов, токоограничивающего элемента, масла)
H_2 / C_2H_2	не ниже 1,4 ... 1,1	Аномальная работа контактов, сопровождающаяся искрением (дугой)
CO_2 / CO	17 ... 5,8	Интенсивное старение масла (увлажнение)

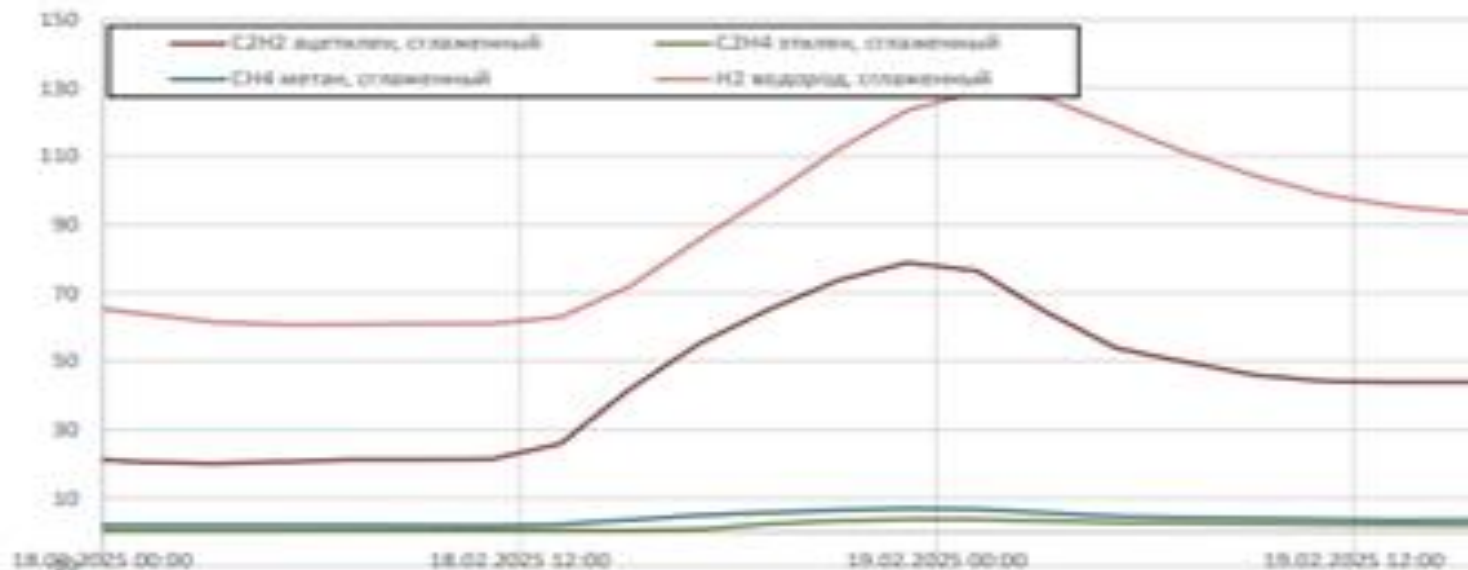
Тестирование разработанных критериев

Значения пар газов (критерии их оценки) впервые были получены с помощью корреляционного, статистического анализа и экспертной оценки.

В течение полугода проходило тестирование разработанных критериев оценки АРГ тремя способами.

В экспериментальном тестировании приняли участие:

- ООО «Хуамин», предоставившее РПН типа CVIII-350Y/72,5-10191W, имитирующий дефекты в РПН;
- ООО «БО-Энерго. АСТС», предоставившее online-газоанализатор 7 газов и разработавшее устройство присоединения к РПН;
- ООО «Эльмаш (УЭТМ)», предоставившее площадку для испытаний устройств РПН, собравшее экспериментальную установку и выполнивший программу эксперимента.



Выполнено 10 серий по 2 переключения в час. Заметно (почти одинаково) растут H_2 , C_2H_2 . Эксперимент подтвердил правильность выбора соотношения пары H_2 / C_2H_2 .

Были уточнены значения критериев оценки соотношения пары газов H_2 / C_2H_2 : для интенсивного режима работы – 1,1, для неинтенсивного – 1,4.

Также удалось имитировать дефект ослабленного контакта и слабого нагрева контакта.

РПН типа РС-4: гашение дуги в масле токоограничивающего элемента резистора, погружного, установленного на трансформаторе ТРНДЦН-40000/110.

Срок эксплуатации – 21 год. Наличие АРКТ – 700 переключений в год. В ходе ремонта обнаружено: разрегулировка контактов контактора РПН.

Оценка результатов АРГ по критерию регламентированных значений

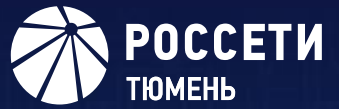
Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Концентрация, % об	2,1038	0,3586	3,1892	0,4002	0,0199	0,0416	0,3398
ПДЗ, % об	0,45	0,055	0,4	0,08	0,0046	0,055	0,410
ДЗ, % об	0,225	0,035	0,18	0,048	0,0027	0,045	0,320
Превышение ПДЗ, раз	4,68	6,52	7,97	5,00	4,33	0,76	0,83
Превышение ДЗ, раз	9,35	10,25	17,72	8,34	7,37	0,92	1,06

Соотношение концентраций пар газов

Пары газов	H ₂ / C ₂ H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	CO ₂ / CO
Значение соотношений газов из бака устройства РПН	0,66	20,11	8,1
Диапазон соотношения газов штатной работы устройства РПН	ниже 1,1	ниже 10...3,7	17...5,8

В ходе разработки Стандарта:

- 1) Создана система критериев оценки технического состояния РПН по результатам АРГ из бака контактора на основе дисперсионного анализа факторов, влияющих при эксплуатации на уровни АРГ в баке РПН.
- 2) Рассчитаны значения критериев оценки АРГ в масле контактора на основании статистики данных эксплуатации РПН.
- 3) Создан метод идентификации вида дефекта на основании АРГ из контактора РПН: определены пары газов и их значения.
- 4) Разработаны правила выбора технически обоснованных решений по дальнейшей эксплуатации РПН на основе данных по эксплуатации РПН, определена необходимая (расчетная) периодичность проведения АРГ и ФХА.
- 5) Создана система критериев оценки технического состояния РПН по параметрам ФХА, определены значения критериев и периодичность отбора.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!