

Оценка остаточного ресурса высоковольтной маслопропитанной изоляции на основе хроматографического анализа продуктов разложения. Задачи и перспективы

Заместитель директора
по аналитической и методологической работе
д.т.н. Дарьян Леонид Альбертович

Москва 2014





Хроматографический анализ растворенных в изоляционной жидкости продуктов разложения изоляции (ХАРГ) – один из наиболее чувствительных и эффективных методов оценки состояния маслопитанной изоляции.

ХАРГ позволяет выявить развивающиеся повреждения трансформаторного оборудования на ранней стадии их развития.



Выявляемые повреждения, приводящие к деградации внутренней изоляции:

■ **Электрические:**

- ЧР с различной плотностью энергий
- искровые и дуговые процессы
- «ползущие» разряды и т. д.

■ **Тепловые:**

- наличие «горячей точки»
- наличие перегревов в диапазоне температуры от 150⁰ С до 700⁰ С и выше

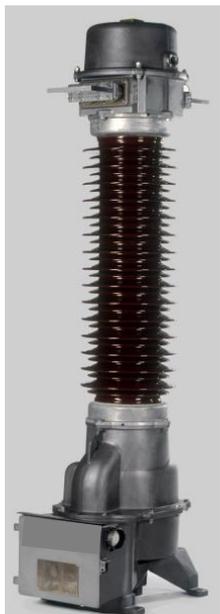


Применение ХАРГ для высоковольтного маслонаполненного электрооборудования

ХАРГ эффективно применяется и для менее ответственного оборудования



Трансформаторы
тока



Выявлены причины
массового выхода из строя
ТТ, эксплуатируемых на
одной из ПС РФ



Трансформаторы
напряжения



Высоковольтные
вводы



Высоковольтные
конденсаторы



Опыт использования ХАРГ
незначителен, однако
результаты, которые могут
получиться, очень важны



Конструктивные особенности высоковольтных конденсаторов

Секция – основной и наиболее электрически нагруженный элемент конструкции конденсатора.

Конденсатор пропитывается синтетической жидкостью или растительным маслом.

Большинство повреждений в конденсаторах связано с повреждениями секций.



Разрушение внутренней изоляции конденсаторов связано, главным образом, с критическими ЧР.

Это обстоятельство позволяет рассматривать более простую модель старения, чем, например, для трансформаторов, конструктивно состоящих из большого числа элементов.



Преимущества ВИК как объекта исследования физико-химических процессов в изоляции



- Силовые трансформаторы
- Трансформаторы тока
- Трансформаторы напряжения
- Высоковольтные вводы

- Высокий срок службы (25–30 лет)
- Высокая стоимость оборудования



Проведение ресурсных испытаний в номинальном режиме практически невозможно.



Проводятся ускоренные испытания (при повышенном напряжении) на моделях изоляции.

Возникает проблема соответствия физических явлений в изоляции: в условиях испытаний и в условиях эксплуатации.

ВИК



- Малый календарный срок службы
- Невысокая стоимость



Имеется возможность проведения ресурсных испытаний серийных образцов конденсаторов в номинальном режиме.



Исследование принципиальной возможности применения ХАРГ для силовых конденсаторов



Взятие проб



Нанесение повреждений секции

Число циклов «заряд – разряд»	10
H ₂	684,6
CH ₄	93,8
CO	154,6
CO ₂	177,2
C ₂ H ₄	446,4
C ₂ H ₆	81,7
C ₂ H ₂	824,2
C ₃	79,9



Исследование принципиальной возможности применения ХАРГ для силовых конденсаторов

$$P_{CF} = \frac{\epsilon_a U_m^2}{4d^2} (1 - \cos 2\omega t)$$

$$P_{EF} = \frac{\mu_a}{2} \frac{C^2 U_m^2 \omega^2 x^2}{2b^2 l^2} (1 - \cos 2\omega t)$$

ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость

d – ширина диэлектрика

t – время

U_m – амплитудное значение напряжения

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость

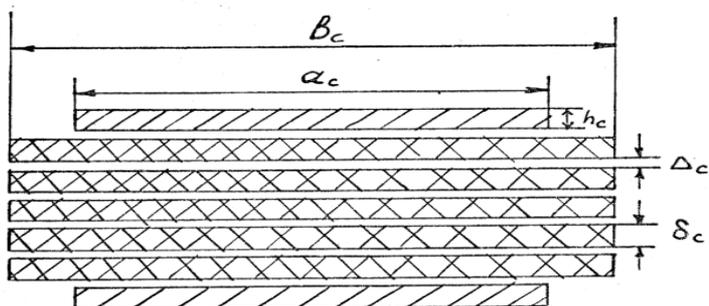
Δ_c – толщина масляной прослойки

a_c – ширина фольги

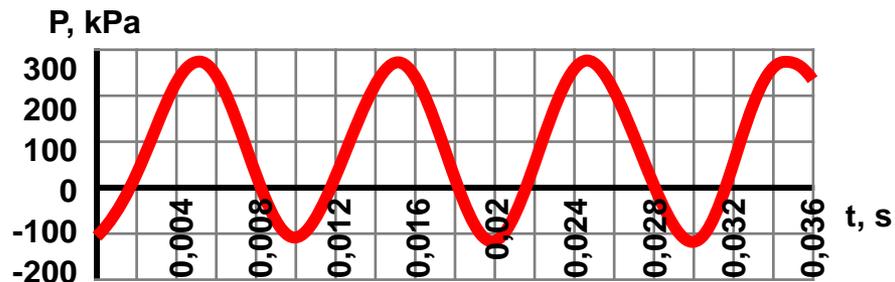
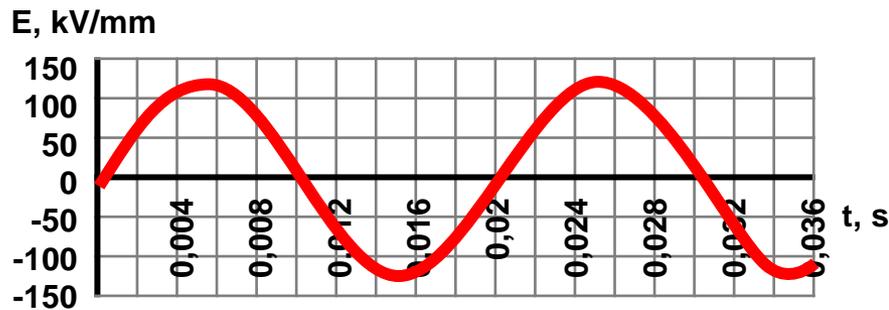
b_c – ширина бумаги

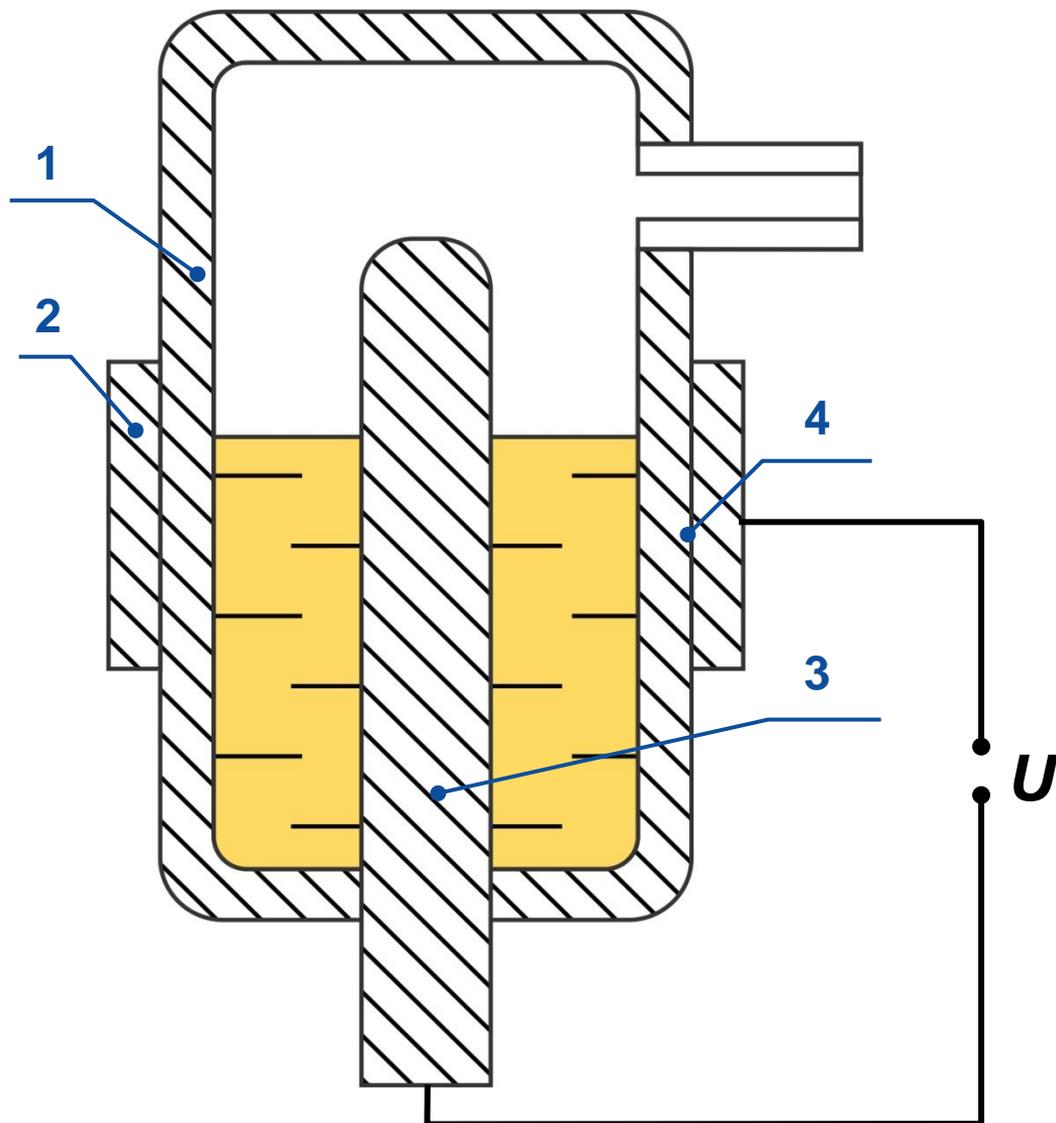
δ_c – толщина бумаги

h_c – толщина фольги



Изменение гидростатического давления в масле в зависимости от напряженности эл. поля



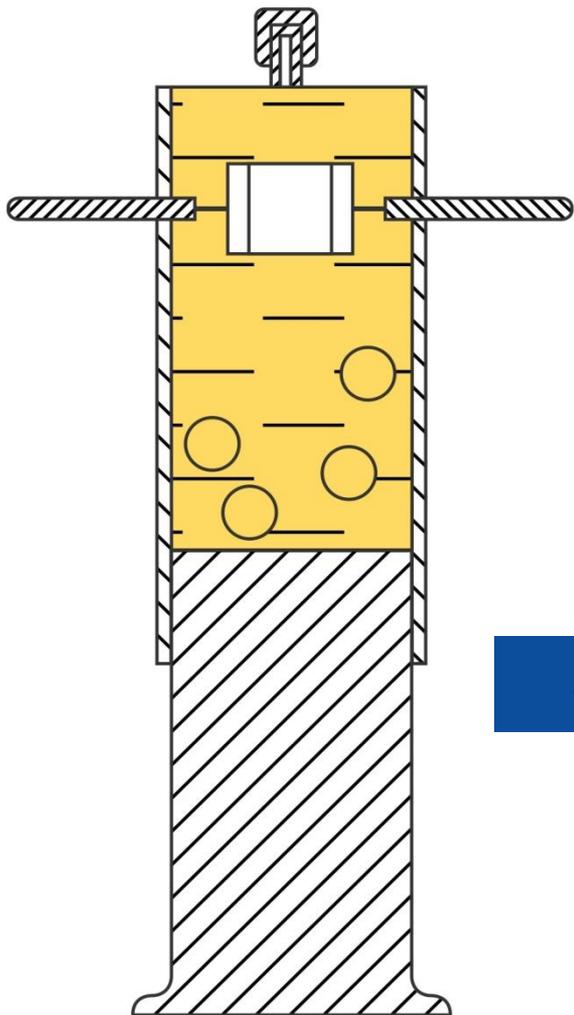


Реактор с «ионизированным газовым промежутком» МЭК 60628:

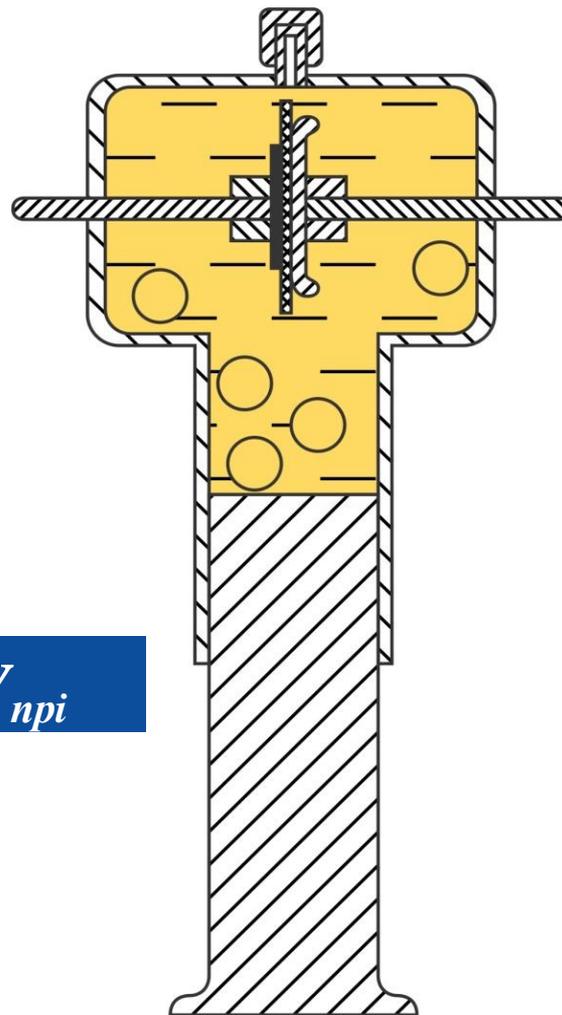
1. стеклянная колба
2. испытываемая жидкость
3. высоковольтный электрод
4. низковольтный электрод



1. С конденсаторной секцией



2. С масляным промежуток

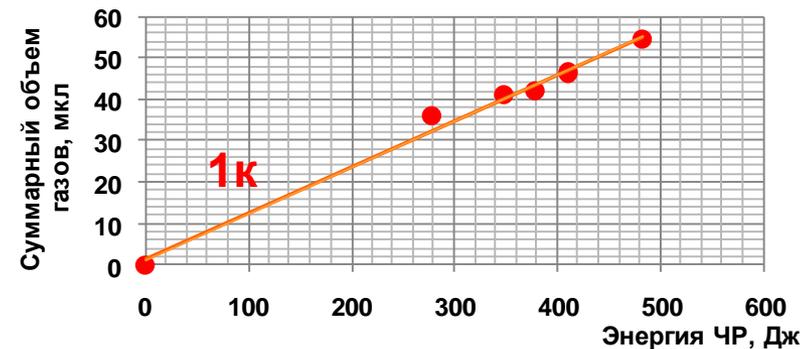
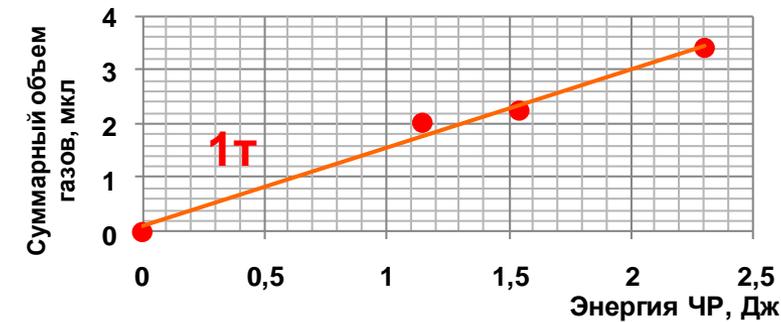
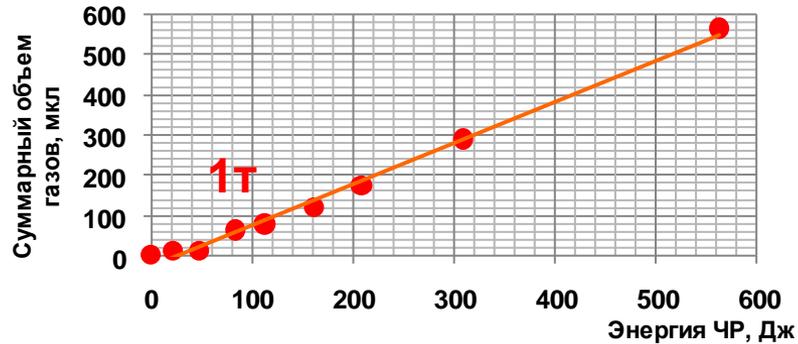


$$G_i = C_{i-1} V_{i-1} + C_i V_{npi}$$

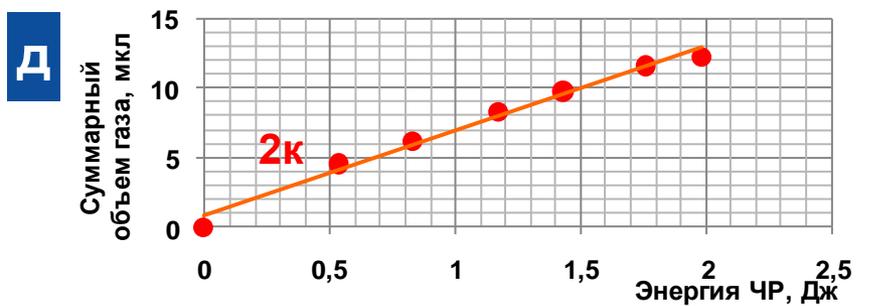
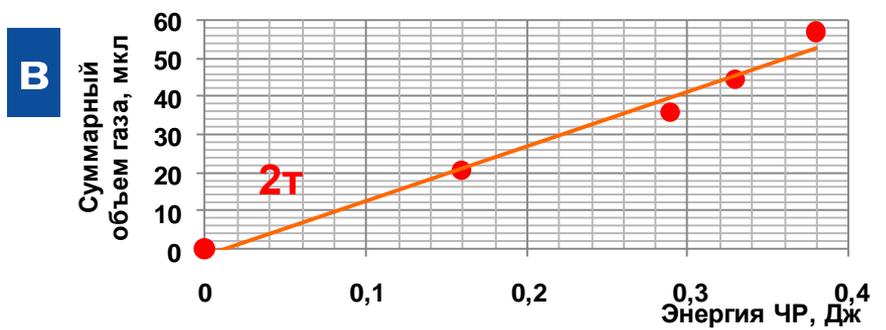


Зависимость объема образовавшихся газов в трансформаторном масле (т) и техническом касторовом масле (к) от энергии ЧР

1. Испытательная ячейка с конденсаторной секцией



2. Испытательная ячейка с масляным промежутком



а	б	в	г	д
0,92	1,5	120	0,12	7,2
мкл/ Дж				



Схема распределения энергии ЧР





Зависимость срока службы конденсаторов от концентрации газов при приемо-сдаточных испытаниях

Заводские испытания: - 20 импульсов «заряд-разряд» при повышенном напряжении

№ п/п	№ конденсаторов	Концентрация компонентов							Срок службы, имп
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	
1	319	1,3	1,8	48,2	147,8	1,4	19,4	0	4 240
2	320	0	1,2	38,5	106,9	0,6	18,4	0	4 600
3	321	1,3	1,3	36,4	119,0	1,0	20,0	0	10 980
4	323	151,9	18,9	56,3	88,0	49,8	147,0	61,5	400
5	332	4,8	2,9	32,8	126,9	1,7	17,9	0	25 790
6	334	2,2	0,9	32,1	121,1	1,0	19,6	0	16 680
7	429	8,8	1,7	46,4	202,9	0	16,9	0	18 200
8	434	1,1	1,6	26,7	293,2	1,3	18,3	0	87 800
9	435	298,8	80,0	114,0	351,6	277,8	109,1	574,2	103
10	437	0	0	30,9	213,6	1,9	74,7	0	32 640
11	494	8,2	1,6	90,0	100,1	2,4	47,1	0	53 380
12	504	40,0	18,7	43,1	132,9	6,8	49,5	13,2	1 440
13	430	65,2	28,4	69,8	178,7	10,4	86,6	17,6	200*
14	432	569,	15,7	39,0	107,8	4,1	52,6	9,2	200*
15	436	83,1	16,4	45,7	134,4	5,4	65,8	12,6	200*
16	511	2,6	7,1	57,8	223,0	5,1	65,2	2,9	2 800

* Сняты с испытаний для разборки

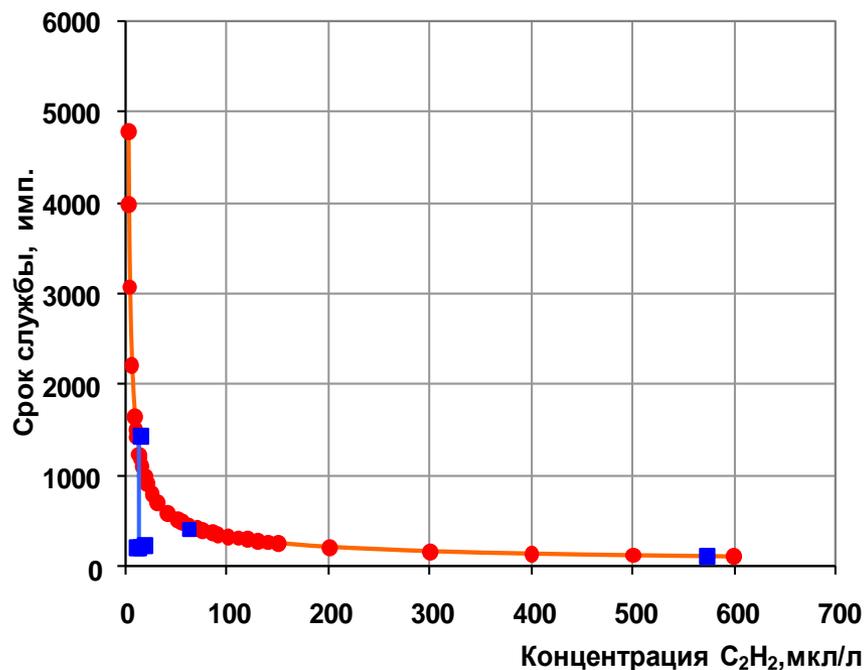


Зависимость срока службы конденсаторов от концентрации $C_{C_2H_2}$ при приемо-сдаточных испытаниях

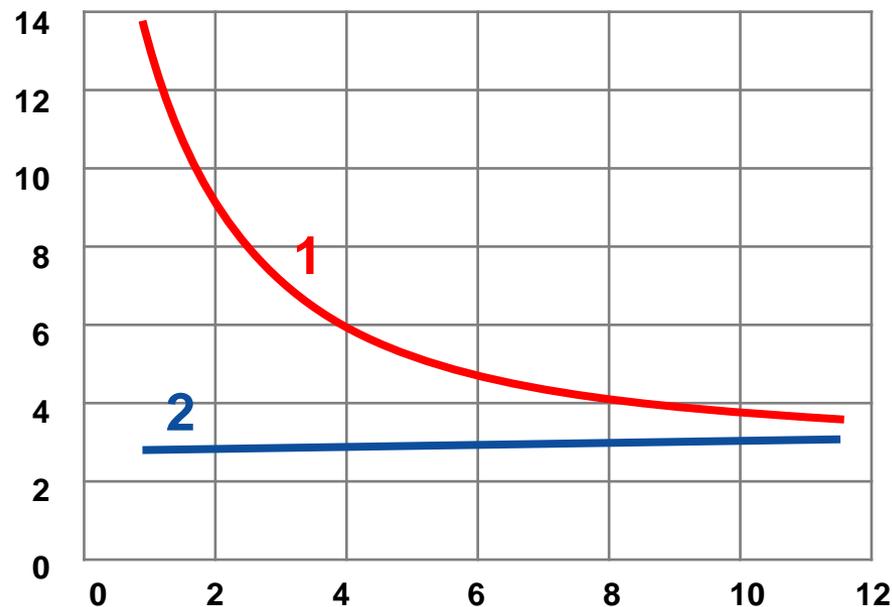
$$N = 6,2 \cdot 10^3 C_{C_2H_2}^{-0,64}$$

где $C_{C_2H_2}$ – концентрация ацетилена

Зависимость срока службы импульсных конденсаторов от концентрации $C_{C_2H_2}$



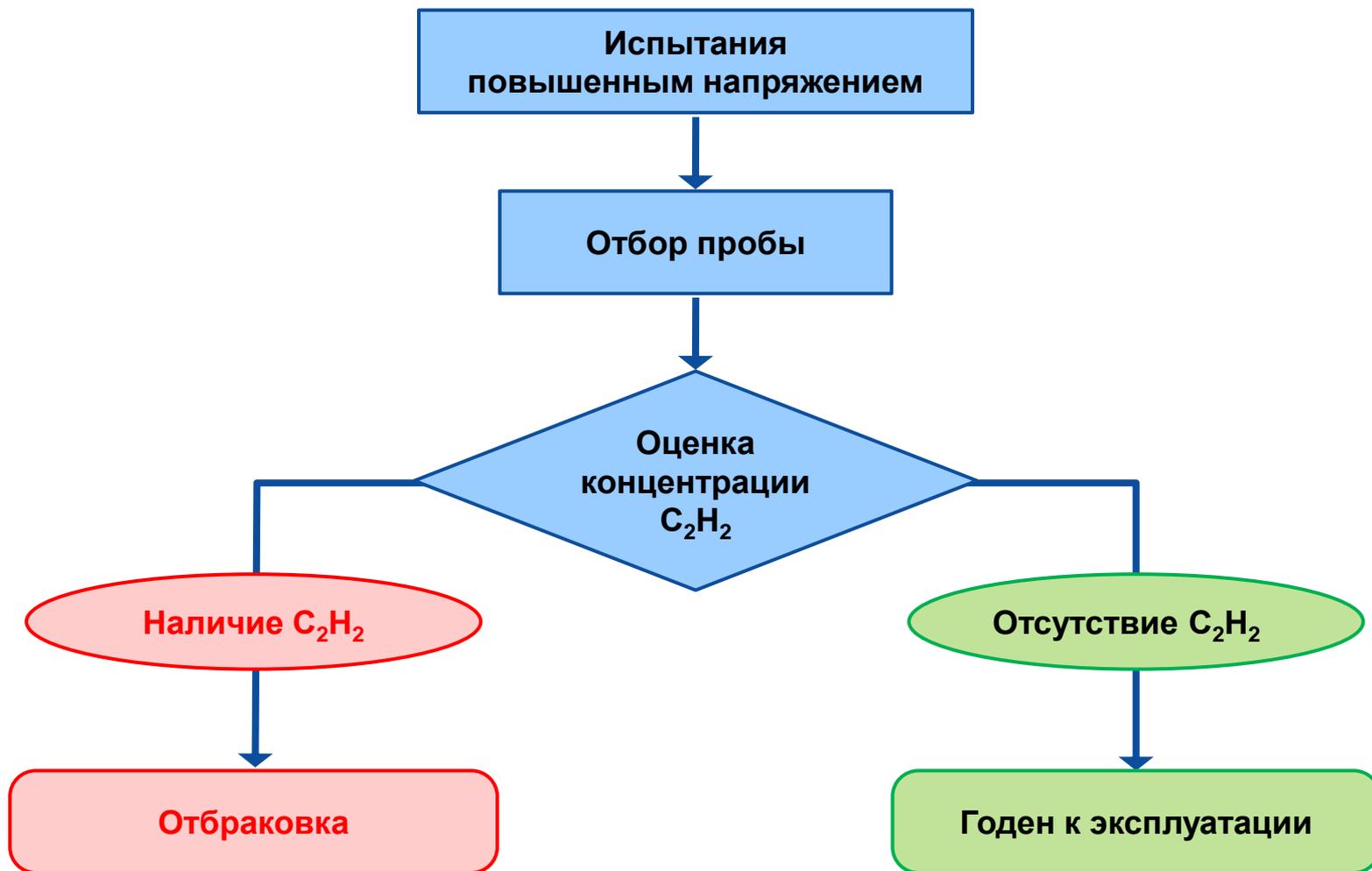
Зависимость интенсивности отказов от числа импульсов для конденсаторов, не прошедших отбраковку (1) и после отбраковки (2)



Основной показатель безотказности конденсаторов – вероятность безотказной работы $P(t)$ – возрос с 0,68 до 0,96, т. е. в 1,4 раза.



Блок-схема отбраковки импульсных конденсаторов по результатам ХАРГ при приемо-сдаточных испытаниях





Установление корреляции между сроком службы ВИК, прошедших приемо-сдаточные испытания и газообразованием

Концентрация газов: H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , C_nH_m , $H_2+C_nH_m$

Отношения концентраций газов:
 CH_4/H_2 , C_2H_2/CH_4 , C_2H_4/CH_4 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_2/C_2H_4 ,
 C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_6/C_2H_2 , CO_2/CO

Абсолютные и относительные скорости изменения концентрации газов

Срок службы ВИК

В процессе анализа не выявлено никаких общих закономерностей при построении следующих зависимостей:

1. $N = f(C_i)$

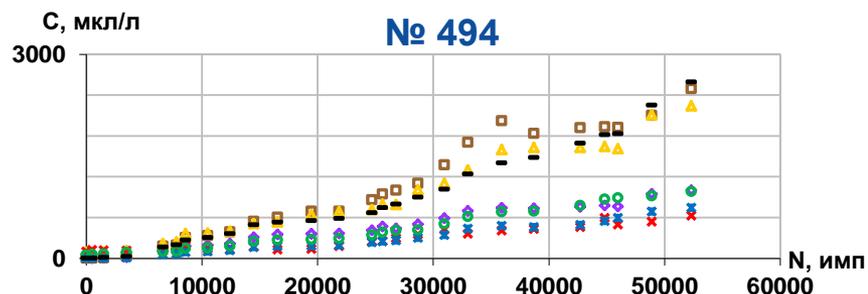
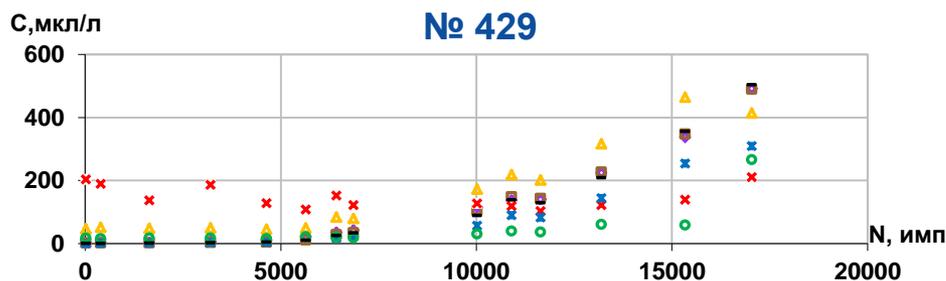
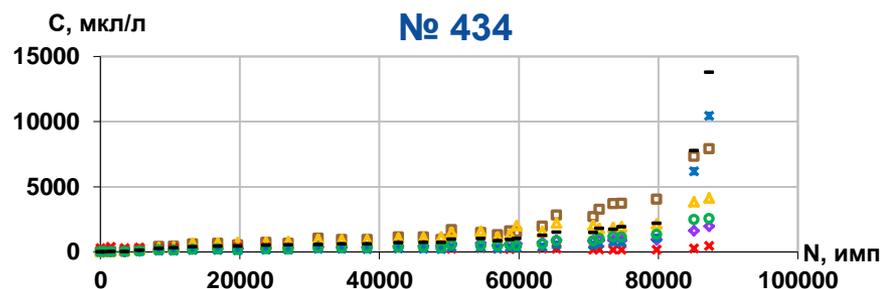
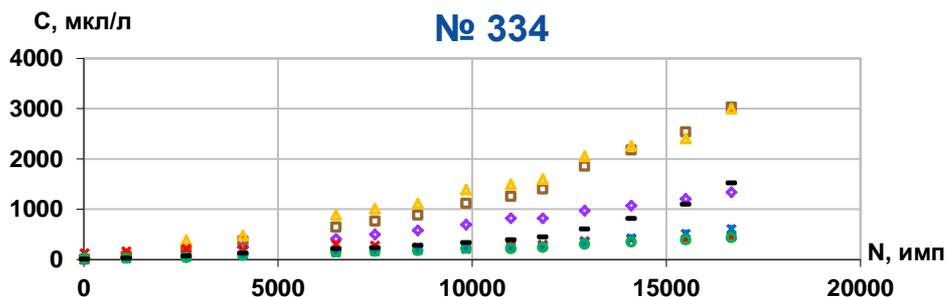
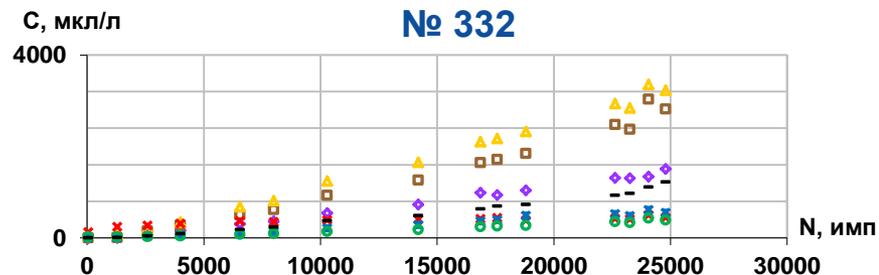
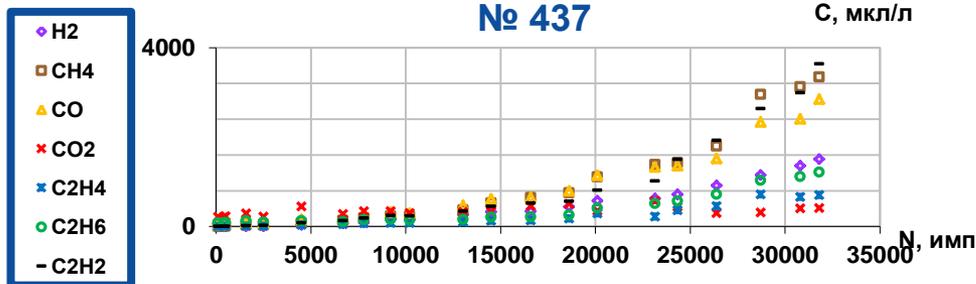
где N – число импульсов
 C_i – концентрация i -того газа

2. $N = f(V_i \text{ отн.})$, или $N = f(V_i \text{ абс.})$

где $V_i \text{ отн.}$ – относительная скорость изменения концентрации i -того газа
 $V_i \text{ абс.}$ – абсолютная скорость изменения концентрации i -того газа



Анализ экспериментальных данных. Зависимость концентрации газов от числа импульсов



Концентрации газов (как суммарные, так и отдельных компонентов), соответствующие предпробивному состоянию конденсаторов, **имеют существенный разброс и зависят от наработанного числа импульсов**: чем больше наработка, тем выше концентрации газов перед пробоем конденсатора.

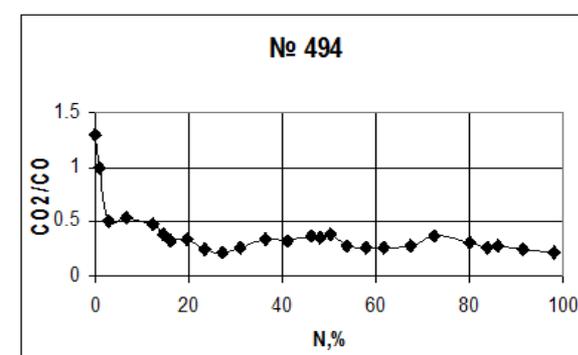
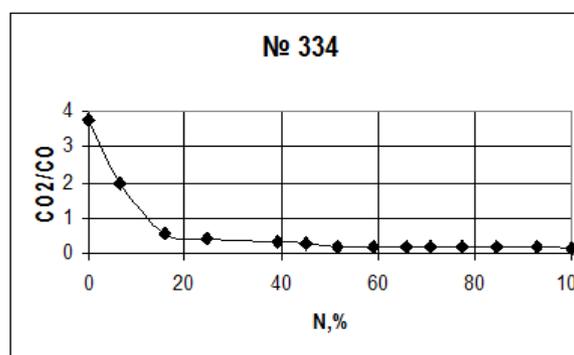
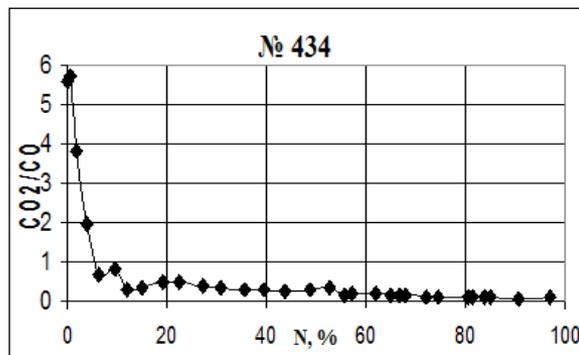
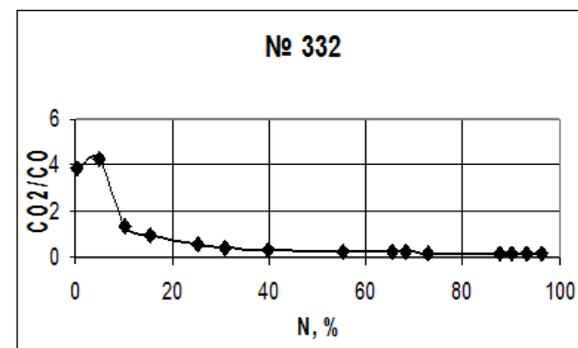
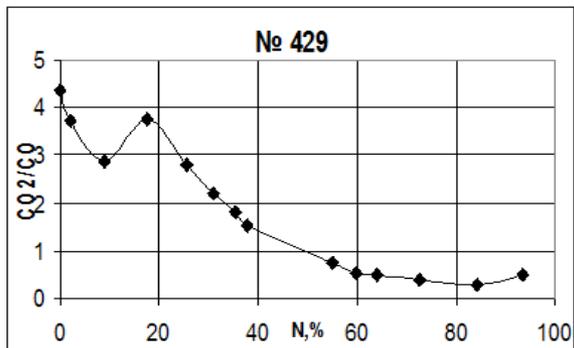
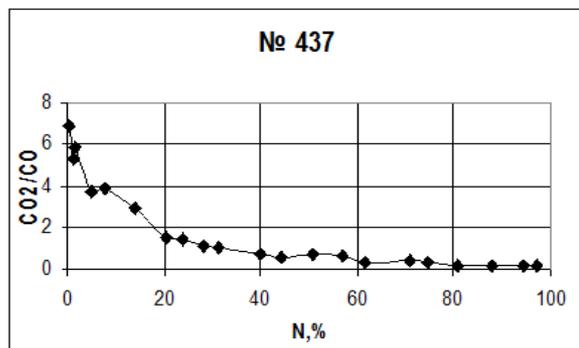


Зависимость отношения CO_2/CO от срока службы конденсаторов

Для разных конструкций конденсаторов эта величина может отличаться.

Можно принять для испытанного типа конденсаторов величину $\text{CO}_2/\text{CO}=0,15$ в качестве критерия, указывающего на интенсивное разрушение бумаги, и, следовательно, выход конденсатора из строя.

Соотношение CO_2/CO приближается к 0,15 при отработке примерно 60% срока службы.



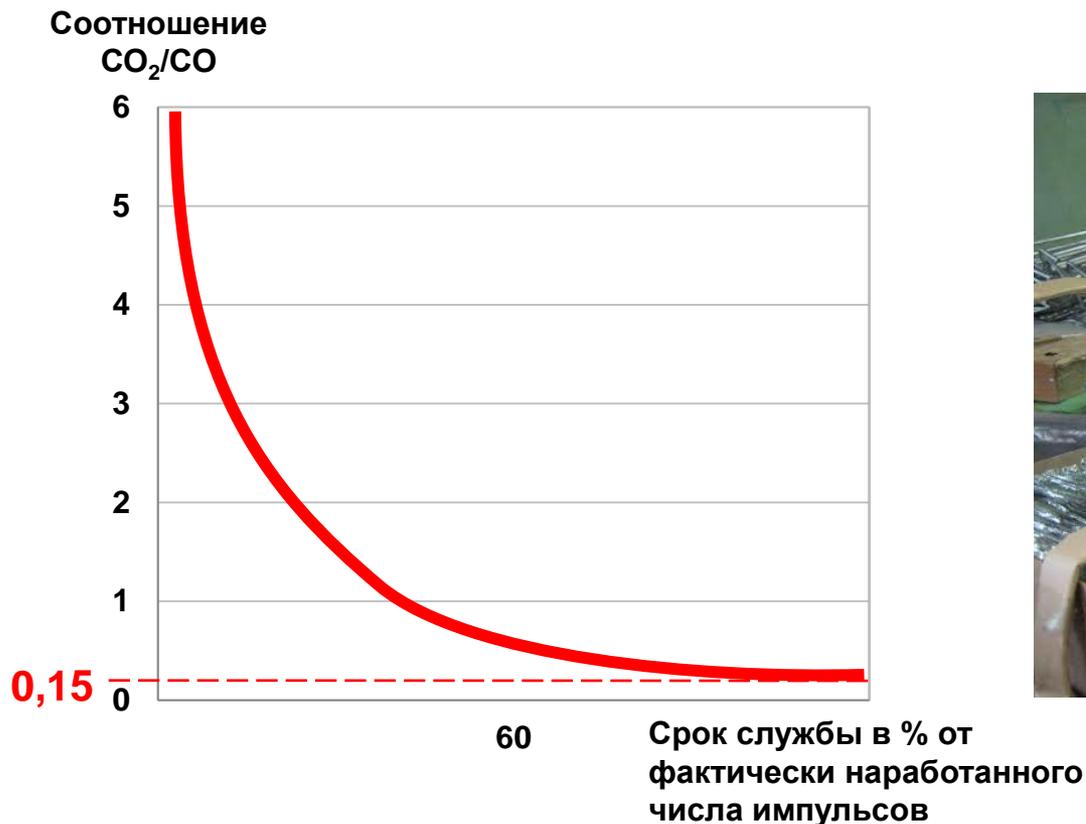


Выбор информативного параметра для оценки остаточного срока службы

Срок службы конденсаторной изоляции определяется, в первую очередь, стойкостью бумаги к эксплуатационным воздействиям.

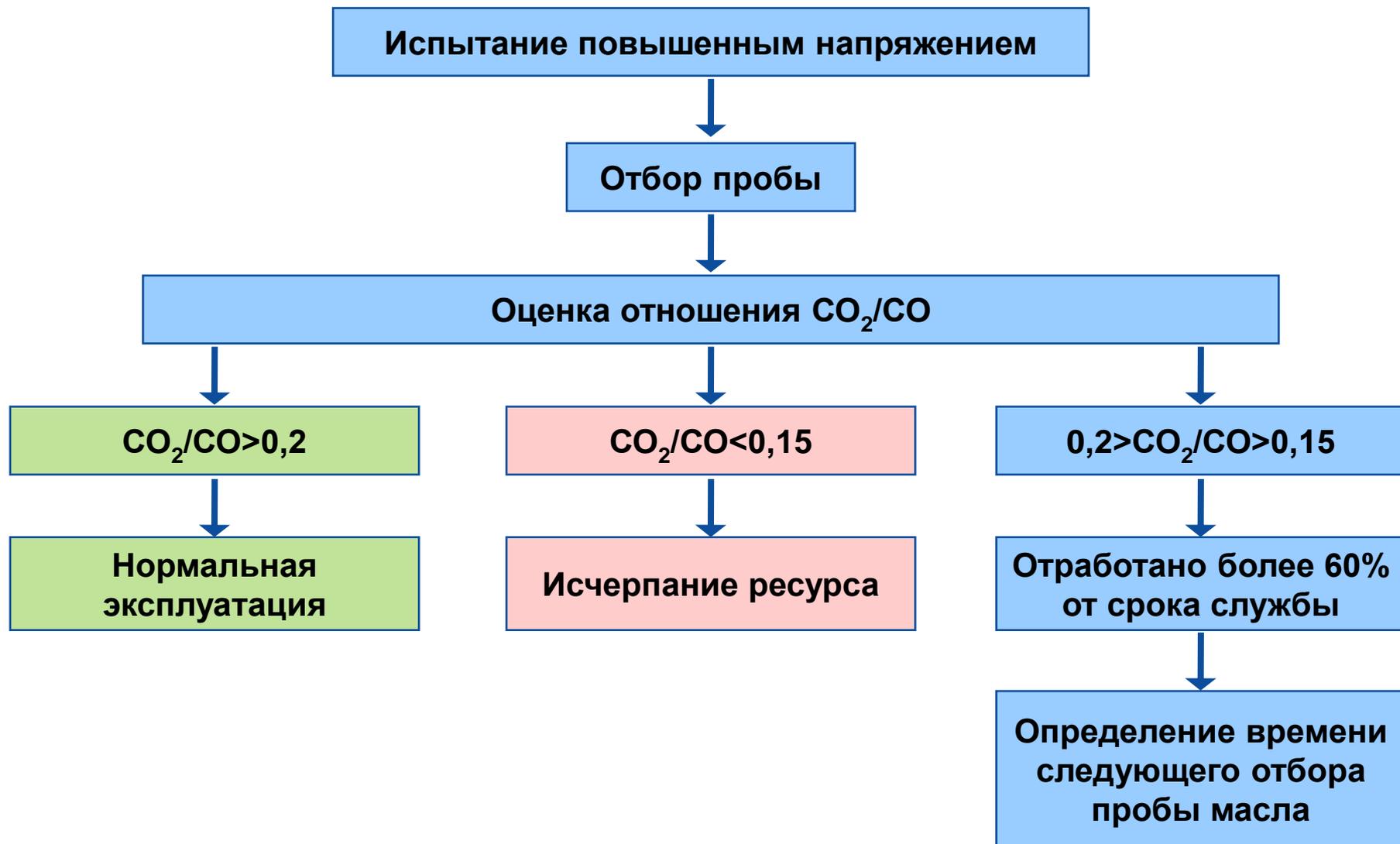
Наиболее критичным параметром является отношение CO_2/CO .

По мере наработки ресурса величина CO_2/CO стремится к вполне определенному значению, равному в данном случае 0,15.





Алгоритм оценки состояния ВИК в эксплуатации





Анализ причин аварийности конденсаторов

Хроматографический анализ газов, растворенных в синтетической жидкости косинусных конденсаторов

№ №	Содержание газов в масле, ppm							CO/CO ₂	Повреждение
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂		
1	915	1254	10	38	17	13	66	0,20	Течь масла
2	1 588	312	13	83	47	97	15	6,47	перегрев
3	11 723	2960	133	945	373	532	84	6,33	Течь масла
4	1 444	59	1	0,4	не обнар.	1	148	0,01	Течь масла
5	732	90	6	29	16	5	21	0,24	Течь масла
6	6 026	2391	119	867	368	290	87	3,33	Течь масла
7	1 246	356	14	92	51	45	47	0,96	Перегрев
8	772	59	не обнар.	0,7	не обнар.	0,5	98	0,01	Течь масла





1. Исследован процесс образования газообразных продуктов разложения в ВИК при приемо-сдаточных и ресурсных испытаниях
2. Выявлена связь между характеристиками газообразования и сроком службы ВИК. Показано, что наиболее информативным критерием оценки состояния конденсаторов являются концентрации C_2H_2 и отношение концентраций CO_2/CO . Определено «критическое» значения отношения CO_2/CO , соответствующее предпробивному состоянию конденсаторов
3. Предложена схема отбраковки конденсаторов как при заводских испытаниях, так и в эксплуатации по результатам ХАРГ
4. Показано, что ХАРГ является эффективным инструментом для анализа причин выхода из строя конденсаторов в эксплуатации
5. ХАРГ – эффективный инструмент для исследования новых конструкций в процессе разработки



Сделан только первый шаг в формировании идеологии оценки остаточного срока службы на основе ХАРГ.

Высоковольтные конденсаторы являются «удобным» видом оборудования для оценки остаточного срока службы, т.к. механизм старения изоляции связан только с одним видом воздействия.

Для совершенствования предложенной идеологии необходимо уделить большое внимание накоплению статистического материала по динамике газообразования в силовых конденсаторах, имеющих различную систему изоляции, и работающих при разных режимах.

Это позволит совершенствовать критерии диагностики конденсаторов при проведении исследований, приемо-сдаточных испытаниях, в эксплуатации и произвести дифференциацию по типам конденсаторов и нагрузке.

Спасибо за внимание!

ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС»

www.ti-ees.ru

Daryan-LA@ti-ees.ru

