

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

УДК 621.3.082.77

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ**

**Н. В. Грунтович**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Для силовых трансформаторов со сроком службы 35–50 лет требуется пересмотр нормативных документов по проведению технического диагностирования [2]–[4]. Термографическое обследование и измерение частичных разрядов каждые восемь лет или перед капитальным ремонтом – это большой риск пропустить на ранней стадии дефекты и, следовательно, повреждение трансформатора. В работах [5], [6] приводится диагностическая ценность методов контроля и параметров. Авторы статей выполнили ранжирование диагностических параметров: хроматографический анализ газов; степень полимеризации бумажной изоляции; содержание фурановых соединений в масле; поверхностное натяжение масла; ИК-спектрометрия; тепловизионный контроль; частичные разряды; сопротивление короткого замыкания; измерение низковольтных импульсов для оценки динамической стойкости обмоток; измерение амплитудно-частотных характеристик обмоток для оценки пресовки обмоток.

Обращает на себя внимание тот факт, что Б. В. Ванин – один из ведущих специалистов в России по технической диагностике трансформаторов в 2001 г. поставил частичные разряды только на восьмое место [5] по ранжированию информативных параметров дефектов трансформаторов.

После активного использования Российского прибора по измерению частичных разрядов AP-700 [7]–[9] многие авторы ставят частичные разряды на первое место по информативности. Следует иметь в виду, что частичные разряды – это диагностический параметр и фактор, который приводит к повреждению трансформатора. В работе [10] группа авторов считает, что регистрация частичных разрядов в условиях высоковольтных станций и подстанций оказывается малоэффективной. Разработки российских ученых [11], [12] и исследования авторов статьи позволили установить факторы, которые могут выявить частичные разряды:

- пузырьки при локальных перегревах;
- пузырьки при кавитации масла при аварийной работе насоса;
- область двойного электрического слоя на границе масла с другими элементами трансформатора заряженных слоев разного знака, особенно при работе масляных насосов охлаждения;
- микрочастицы на поверхности деталей трансформатора;
- микрочастицы в масле;
- образование потенциала на острых краях электрических элементов;
- наличие микрополостей в бумажной изоляции, которые образуются под воздействием вибрации и влаги.

Для определения нарушения прессовки обмоток и магнитопровода, то все больше применяется методика фирмы «Виброцентр» из-за ее простоты, т. е. изменение общего уровня вибрации бака в диапазоне 10–1000 Гц. Как показали исследования, достоверность этого метода составляет 50–60 %, так как существует много факторов (дефектов), которые вызывают увеличение вибрации в диапазоне больше 1000 Гц.

Автор статьи [13] приводит количество повреждений трансформаторов и экономические потери от их повреждений, потери от перерывов в электроснабжении и суммарные потери, которые оцениваются в диапазоне от 20 до 150 млн долл. США.

**Постановка задачи исследований.** Хроматографический анализ горючих газов в масле и физико-химические испытания масла выполняются в Белорусской энергосистеме каждые шесть месяцев. На сегодняшний день известны следующие методики хроматографического анализа горючих газов: методика МЭК 599; методика ИЕЕЕ; методика Роджерса; методика Шлизенгера, Дорненбурга и Дюваля; российско-белорусская. По мнению рабочей группы СИГРЭ 15.01, ни один из национальных методов не пригоден для универсального применения [14]. В этой связи авторами было проверено около 50 проб трансформаторного масла по российско-белорусской методике и по Дорненбургу. Признаки термических дефектов совпали по двум методикам полностью. Что касается разрядов в масле, то методики показали большие расхождения в результатах при классификации дефектов. Следует отметить, что различают разряды малой и большой мощности и электрическую дугу. Надо полагать, что под воздействием различных разрядов и электромагнитного поля изменяется физико-химический состав трансформаторного масла. Возможно, при длительном воздействии частичных разрядов малой мощности или электрических разрядов эти изменения накапливаются, так как контроль масла выполняется один раз в шесть месяцев, очистка масла проводится еще реже. Необходимо было определить, при каких условиях частичные разряды переходят в электрическую дугу в силовых трансформаторах и изменяется ли физико-химический состав трансформаторного масла под воздействием частичных разрядов.

Исследования российских ученых направлены на моделирование повышенного давления в трансформаторах от дуги, на разработку предохранительных устройств для снятия давления и на разработку системы пожаротушения на основе контроля водорода  $H_2$  и  $CO$ .

**Результаты исследований.** В лабораторных условиях испытание масла проводилось в открытом сосуде. Очень важно было визуально определить момент возникновения электрической дуги и измерить интенсивность развития прибором М4202. Применялись органические примеси – шарики диаметром 1,5 и 3,5 мм (декоративная эпокочва). В качестве металлических примесей применялись стальные шарики диаметром 2,5 мм. Прибором АИД-70М (рис. 1) создавалось напряжение до 70 кВ. Одновременно регистрировался ток утечки между электродами в сосуде. В трансформаторе, где напряженность поля достигает при определенной концентрации зарядов критической величины, начинается ионизация, возникают частичные разряды. В лабораторной установке под воздействием напряженности поля частицы начинали хаотически перемещаться в сосуде. Вначале частичные разряды возникали на стенке сосуда. При дальнейшем увеличении напряжения на приборе АИД-70М микрочастицы соединяются в термоионизированный канал с высокой проводимостью и частичные разряды возникают между микрочастицами по всей длине канала, которые переходят в электрическую дугу. В отдельных экспериментах образовывались два канала высокой проводимости. Если во время эксперимента напряжение на приборе снижали, происходило гашение частичных разрядов и электрическая дуга не возникала.

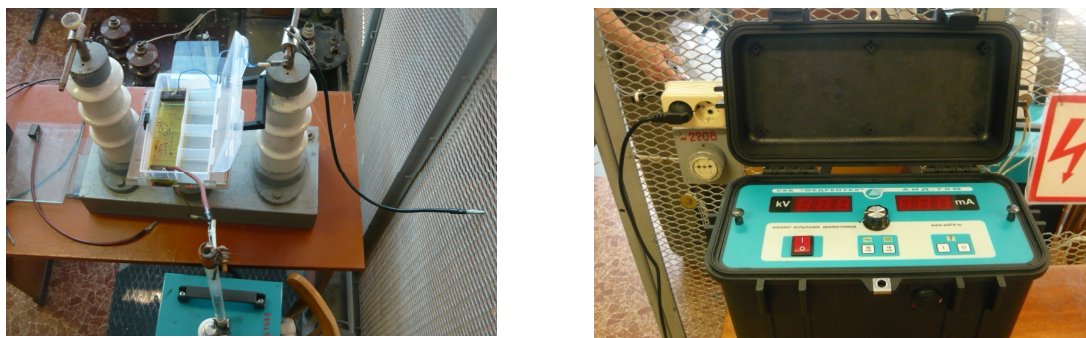


Рис. 1. Высоковольтная испытательная установка АИД-70М

Расстояние между электродами в масле изменялось от 8 до 18 см. В результате проведенных экспериментов выявлено, что на возникновение электрической дуги влияют: расстояние между электродами в сосуде; уровень загрязненности масла; диаметр органических примесей.

В частности, были выявлены следующие закономерности:

- чем меньше расстояние между электродами в сосуде, тем при меньшем уровне напряжения возникали частичные разряды;
- чем больше уровень загрязненности масла, а также диаметр органических примесей, тем при меньшем уровне напряжения возникали частичные разряды;
- чем больше диаметр органических примесей, тем при меньшем уровне напряжения возникали частичные разряды;
- электрическая дуга возникала сразу после образования электропроводящего канала из микрочастиц.

Частичные разряды регистрировались немецким зондом частичных разрядов M4202 (Lemke-5). Из-за большого загрязнения масла уже при напряжении 4 кВ регистрировались частичные разряды более 1000 пКл. После кратковременного воздействия (пять минут) частичных и электрических разрядов была взята проба № 2. После длительного воздействия электрическими разрядами в течение 15 мин взята проба № 3. Хроматографический анализ газов, растворенных в масле, проводился в лаборатории Гомельских электрических сетей на приборе «Кристалл-2000М». Результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты хроматографического анализа трансформаторного масла

Проба трансформаторного масла Р-646	Концентрация растворенных в масле газов, процент от объема						
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Проба № 1 (до эксперимента)	0,00044	0,00019	0,002	0,105	0,00018	0,00007	следы
Проба № 2 (кратковременное воздействие)	0,11058	0,05103	0,065	0,15	0,22905	0,06452	0,24767
Проба № 3 (длительное воздействие)	0,39237	0,17875	0,0178	0,125	0,69757	0,17738	1,22497

Как следует из табл. 1, процентный состав газов значительно увеличился в пробе № 3. Проверим, как изменилось соотношение газов, следуя принятым методикам МЭК и Дорненбурга.

Проба № 2:  $C_2H_2/C_2H_4 = 0,247/0,229 = 1,08$ ;  $CH_4/H_2 = 0,46$ ;  $C_2H_4/C_2H_6 = 3,55$ , что указывает на дуговые разряды.

Проба № 3:  $C_2H_2/C_2H_4 = 1,75$ ;  $CH_4/H_2 = 0,454$ ;  $C_2H_4/C_2H_6 = 3,2$ . В данном случае также наблюдаются дуговые разряды.

Визуально наблюдались разряды высокой энергии, переходящие в электрическую дугу. Прибором регистрировались частичные разряды более 1000 пКл. Хроматографический контроль горючих газов являлся дополнительным методом для оценки влияния частичных разрядов на трансформаторное масло.

Значительно изменилось соотношение газов  $C_2H_2/C_2H_4$ , т. е. увеличилось почти в 1,7 раза. Другие соотношения газов практически не изменились. Можно предположить, что под воздействием частичных и электрических разрядов в масле возникли новые фракции. Чтобы убедиться, что изменились физико-химические характеристики трансформаторного масла, проверялся  $tg\delta$  и проводился анализ ИК-спектр образцов масла. На установке измерения электрических потерь трансформаторного масла «Тангенс-3М» проверялся  $tg\delta$ . Результаты измерений представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Результаты испытания трансформаторного масла до воздействия частичными и электрическими разрядами**

Показатель	Температура $t$ , °C		
	21 °C	70 °C	90 °C
$tg\delta$	0,00058	0,00606	0,0121
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	2,265	2,019	1,878

Таблица 3

**Результаты испытания трансформаторного масла после воздействия частичными и электрическими разрядами**

Показатель	Температура $t$ , °C		
	19 °C	70 °C	90 °C
<i>После первого опыта. Проба № 2</i>			
$tg\delta$	0,0019	0,0139	0,026
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	2,29	1,89	1,77
<i>После второго опыта. Проба № 3</i>			
Мгновенный пробой масла (см. пояснение в тексте статьи)			

После кратковременного воздействия частичных и электрических разрядов  $tg\delta$  увеличился при температуре 19–21 °C в 3,21 раза, а при температуре 70 °C – в 2,3 раза. Измерить  $tg\delta$  масла пробы № 3 не получилось, так как срабатывала защита прибора «Тангенс-3М». Полученные результаты при измерении  $tg\delta$  подтверждают гипоте-

зу о том, что под воздействием частичных электрических разрядов появляются новые фракции в трансформаторном масле.

В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. При загрязнении трансформаторного масла возникают частичные разряды высокой интенсивности, которые в определенных условиях превращаются в электрические разряды. Установлено, что на возникновение частичных разрядов и на их переход в электрическую дугу влияют: расстояние между электродами; уровень загрязненности масла; диаметр органических примесей.

2. При образовании электропроводящего канала из механических примесей в трансформаторе вдоль данного канала образуется электрическая дуга, которая разрушает трансформатор.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хамитов, И. Ф. Разработка системы непрерывного контроля технического состояния высоковольтного трансформатора / И. Ф. Хамитов, Д. С. Трофимов, Д. Ю. Усатый // Энергетические и электротехнические системы : междунар. сб. науч. тр. ; под ред. С. И. Лукьянова, Е. Г. Нешпоренко. – Магнитогорск, 2019. – С. 354–362.
2. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы : СТП 33243.20.366–16: Приказ ГПО «Белэнерго» от 12.10.2016 № 268: утв. и с 01.11.2016 введ. в действие. – Режим доступа: <https://energodoc.by/post/view?id=385>. – Дата доступа: 10.12.2018.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2017. – 271 с. – (Высш. образование: Бакалавриат).
4. Анализ проблемных вопросов эксплуатации маслонеполненных трансформаторов / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 3 (96). – С. 2–6.
5. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б. В. Ванин [и др.] // Электр. станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
6. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации / И. Г. Гун [и др.] // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 102–105.
7. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов / А. С. Карандаев [и др.] // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 105–108.
8. Николаев, А. А. Внедрение системы мониторинга технического состояния трансформатора 80 МВА энергоблока ТЭЦ ОАО «ММК» // Электротехн. системы и комплексы (ЭСиК). – 2016. – № 2 (31). – С. 52–57.
9. Николаев, Ан. А. Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локализации частичных разрядов / Ан. А. Николаев, Е. А. Храмшина, Ар. А. Николаев // Электротехн. системы и комплексы (ЭСиК). – 2018. – № 1 (38). – С. 48–54.
10. Андриенко, П. Д. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока // П. Д. Андриенко [и др.] // Электротехника та електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 43–44.
11. Расщупкин, М. Д. Акустические сигналы от частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов / М. Д. Расщупкин, Е. Г. Ермаков, С. И. Хренов // Электричество. – 2011. – № 11. – С. 12–16.
12. Карандаев, А. С. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А. С. Карандаев [и др.] // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1 (37). – С. 105–108.
13. Бартли, У. Обзор повреждений трансформаторов / У. Бартули // Энергия и менеджмент. – 2011. – № 1. – С. 40–43.

14. Алексеев, Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М. : Изд-во НЦ ЭНОС, 2002. – 211 с.
15. Беллами, Л. Новые данные по ИК спектрам сложных молекул / Л. Беллами. – М. : Мир, 1971.
16. Казицына Л. А. Применение УФ-, ИК-, ЯМР-имасс-спектроскопии в органической химии / Л. А. Казицына, Н. Б. Куплетская – М. : Моск. ун-т, 1979. – 240 с.
17. Юхневич, Г. В. Инфракрасная спектроскопия воды / Г. В. Юхневич. – М. : Наука, 1973. – 208 с.