

УДК 621.3.082.77+621.315.615.2

## **ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

**Н. В. ГРУНТОВИЧ, П. В. ЛЫЧЕВ**

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

**Е. В. ВОРОБЬЕВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** механические примеси, электрические разряды, состав масла, ИК-спектр, хроматография, диэлектрические потери, электроды, потенциал.

### **Введение**

Силовые трансформаторы со сроком службы 40–60 лет требуют пересмотра нормативных документов по проведению технического диагностирования [1]–[3]. Термографическое обследование и измерение частичных разрядов каждые 8 лет или перед капитальным ремонтом – это большой риск пропустить на ранней стадии дефекты и, следовательно, повреждение трансформатора. В работах [4], [5] 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 прессовки 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 [4].

После активного использования российского прибора по измерению частичных разрядов AP-700 [6]–[8] частичные разряды многие авторы ставят на первое место по информативности. Следует иметь в виду, что частичные разряды – это диагностический параметр и фактор, который приводит к повреждению трансформатора. В работе [9] группа авторов считает, что регистрация частичных разрядов в условиях высоковольтных станций и подстанций оказывается малоэффективной.

Что касается 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. Кроме того, авторы статьи [5] традиционные измерения на отключенном трансформаторе  $\text{tg}\delta$  (диэлектрических потерь) обмоток и вводов, сопротивления изоляции обмоток и вводов, сопротивления обмоток постоянному току, потерь холостого хода не рассматривают с точки зрения их диагностической ценности. С авторами данной ста-

ты можно также согласиться, что ни один из известных методов диагностирования не может дать достоверных результатов при выявлении дефектов. Целесообразно применение комплексного диагностирования без снятия напряжения.

Проверенный анализ результатов измерения силовых трансформаторов за последние пять лет и в 2018 г. показал, что эти данные по  $\text{tg}\delta$  не только малоинформативны, а в некоторой степени даже опасны, так как дают ложную информацию о техническом состоянии вводов и обмоток.

Как показали исследования, 60–70 % повреждений обмоток и вводов происходит из-за интенсивного развития частичных разрядов.

Автор статьи [10] приводит данные о количестве повреждений трансформаторов и экономических потерях от их повреждений, потерях от перерывов в электроснабжении и суммарных потерь. Суммарные потери могут изменяться от 20 млн долл. США до 150 млн долл.

Цель настоящей работы – исследование в лабораторных условиях влияния примесей на интенсивность частичных разрядов в открытом сосуде.

### **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 IEEE; методика Роджерса; методика Шлизенгера; Дорненбурга; Дюваля; российско-белорусская. По мнению рабочей группы СИГРЭ 15.01, ни один из национальных методов не пригоден для универсального применения [11]. 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.

### **Результаты исследований**

Влагосодержание [1], [2] и кислотность масла увеличивают скорость старения бумажной изоляции. Механические примеси более 10 отн. ед. вызывают частичные разряды. В лабораторных условиях испытание масла Р-646 проводилось в открытом сосуде. Очень важно было визуально определить момент возникновения частичных разрядов и измерить их интенсивность 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 можно было создавать напряжение до 70 кВ. Одновременно регистрировался ток утечки между электродами в сосуде. При малом напряжении между электродами 3–4 кВ органические шарики совершали хаотичное движение между электродами. С ростом подаваемого напряжения некоторая часть органических шариков выстраивалась в прямую линию между электродами с минимальным расстоянием друг от друга (рис. 1).



Рис. 1. Высоковольтная испытательная установка АИД-70М

Фактически сформировались условия для возникновения электрической дуги. При незначительном увеличении напряжения между электродами мгновенно возникла электрическая дуга. Расстояние между электродами в масле изменялось от 8 до 18 см. В результате проведенных экспериментов выявлено, что на возникновение частичных разрядов 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.

Частичные разряды регистрировались немецким зондом частичных разрядов М4202 (Lemke-5). Из-за большого загрязнения масла уже при напряжении 4 кВ регистрировались частичные разряды более 1000 пКл. После кратковременного воздействия (5 мин) 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, об. %						
	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:  $C_2H_2/C_2H_4 = 0,247/0,229 = 1,08$ ;  $CH_4/H_2 = 0,46$ ;  $C_2H_4/C_2H_6 = 3,55$ . Мы имеем разряды низкой и высокой энергии.

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 разряды низкой и высокой энергии.

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,  $tg\delta$  проверялся на установке измерения электрических потерь трансформаторного масла «Тангенс-3М». Результаты измерений представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Результаты испытания трансформаторного масла Р-646  
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 Р-646  
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. 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 гипотезу о том, что под воздействием частичных электрических разрядов появляются новые фракции в трансформаторном масле.

В ходе исследований проведен сравнительный анализ ИК-спектров проб трансформаторного масла. ИК-спектры снимали на Фурье-спектрометре Vertex 70 (фирма Brüker, Германия). Интенсивность полос поглощения выражали через площадь пиков поглощения (усл. ед.), которую определяли с помощью пакета программ OPUS 6.5.

Проба № 1 представляла собой контрольный образец масла, пробы № 2 и 3 взяты из сосудов, они предварительно подверглись кратковременному (проба № 2) или долговременному (проба № 3) воздействию электрических разрядов. В ИК-спектрах всех проб можно выделить три основные полосы поглощения:  $3100\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ ,  $1555\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ ,  $1655\text{--}1555\text{ см}^{-1}$ . Как мы видим из данных рис. 2, все три пробы масел имеют одинаковые частоты поглощения в ИК-области. Однако их относительная интенсивность поглощения различается, а значит после воздействия электрических разрядов происходят изменения структуры молекул масла. Данные проведенных расчетов представлены в табл. 4.

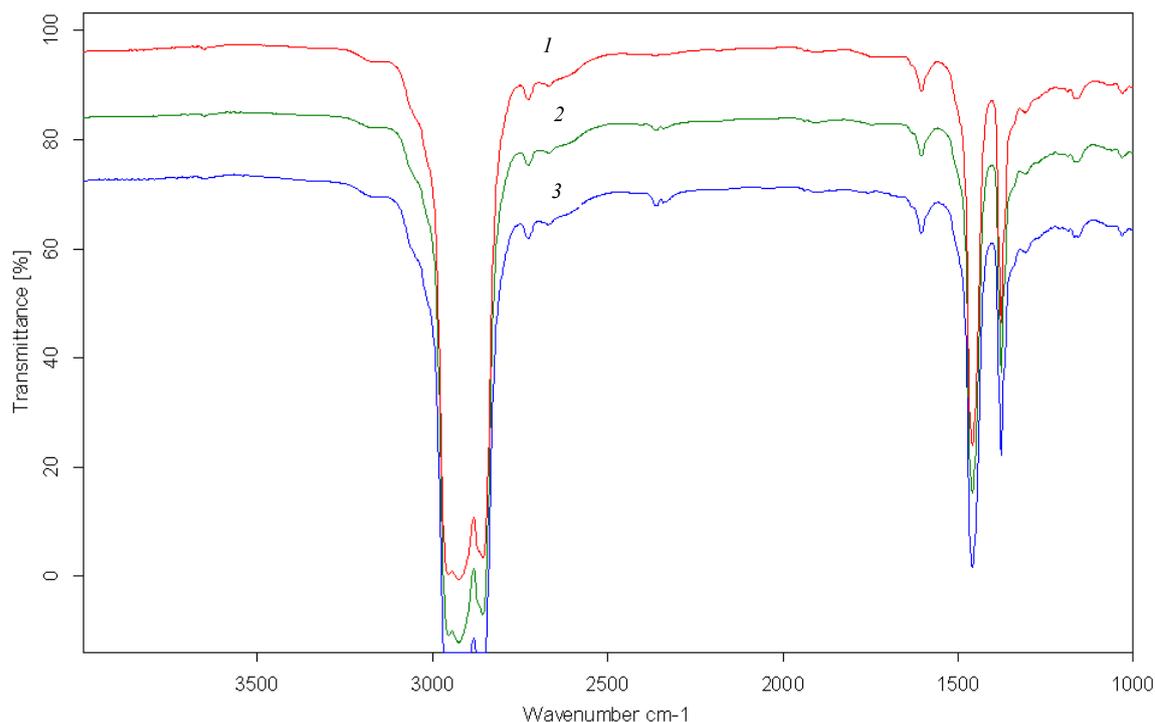


Рис. 2. ИК-спектры трансформаторного масла:  
проба № 1 – спектр 1; проба № 2 – спектр 2; проба № 3 – спектр 3

Полоса поглощения в области  $3100\text{--}2800\text{ см}^{-1}$  (основной пик в области  $2920\text{ см}^{-1}$ ) обусловлена валентными колебаниями алифатических метиленовых групп ( $-\text{CH}_2-$ ), содержащихся в молекулах масла, полоса поглощения  $1555\text{--}1400\text{ см}^{-1}$  (основной пик в области  $1460\text{ см}^{-1}$ ) обусловлена валентными колебаниями метильных групп ( $-\text{CH}_3$ ) [12], [13]. В качестве базовой полосы поглощения использовали интенсивность полосы  $3100\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ .

Соотношение интенсивностей полос  $S_{1460}/S_{2920}$  в спектрах проб № 2 и 3 выше (для пробы № 2 – 0,0817, для пробы № 3 – 0,0838) по сравнению со спектром контрольной пробы. Этот факт указывает на большее содержание метильных групп ( $-\text{CH}_3$ ) в пробах масла, подверженных воздействию электрических разрядов. При этом также возрастает количество кратных связей в составе органических молекул масел. Об этом можно судить по росту относительной интенсивности полосы поглощения  $1655\text{--}1555\text{ см}^{-1}$  (основной пик в области  $1600\text{ см}^{-1}$ ), которая относится к непредельным карбосоединениям [12], [13], данные приведены в табл. 4. Интенсивность этой полосы в контрольном образце является невысокой  $S_{1600}/S_{2920}$  и составляет всего 0,0037.

## Анализ ИК-спектров образцов трансформаторного масла

Пробы трансформаторного масла Р-646	$S_{1460}/S_{2920}$ (ед.)	$S_{1600}/S_{2920}$ (ед.)
Проба № 1 – до эксперимента (контрольная)	0,0800	0,0037
Проба № 2 – кратковременное воздействие	0,0817	0,0038
Проба № 3 – длительное воздействие	0,0838	0,0041

На основании полученных данных ИК-анализа о структуре молекул масел можно утверждать, что при воздействии электрических разрядов молекулы масла подвергаются деструкции. При этом накопление кислородсодержащих групп в составе масел не зафиксировано, так как в пробах № 2 и 3 отсутствует полоса поглощения в области  $1720\text{ см}^{-1}$  (см. рис. 2), относящаяся к валентным колебаниям карбонильных групп [12].

Отдельно необходимо отметить, что проба № 2 содержала отдельную фракцию, отличающуюся по цвету и консистенции – гелеобразный осадок. Этот осадок извлекли и подвергли ИК-анализу, ИК-спектр приведен на рис. 3. Из представленного спектра видно, что образовавшаяся фракция содержит воду, что следует из полос поглощения в области  $4000\text{--}3500\text{ см}^{-1}$  и в области  $1670\text{--}1590\text{ см}^{-1}$  [14].

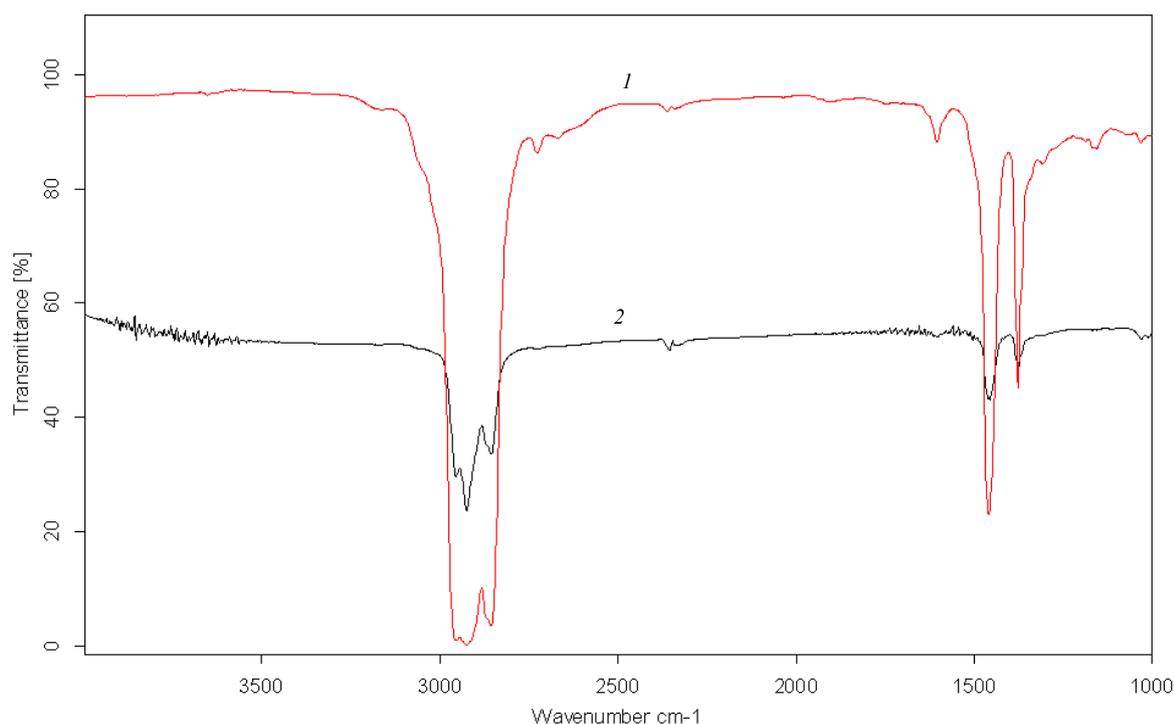


Рис. 3. ИК-спектр пробы № 2 трансформаторного масла (спектр 1) и ее осадочная фракция (спектр 2)

Значит, при воздействии электрических зарядов на трансформаторное масло изменяется химическая структура его молекул, а при длительном воздействии происходит выделение деструктурированных молекул в виде отдельной фракции.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено:

1. При загрязнении трансформаторного масла возникают частичные разряды высокой интенсивности, которые в определенных условиях превращаются в электриче-

ские разряды. Определено, что на возникновение частичных разрядов и на их переход в электрическую дугу влияют: расстояние между электродами; уровень загрязненности масла; диаметр органических примесей.

2. Под воздействием частичных и электрических разрядов меняется цвет масла, возникают новые фракции, что может снижать достоверность выявления дефектов при хроматографическом анализе горючих газов.

3. При изменении химического состава масла под воздействием частичных и электрических разрядов в 2–3 раза увеличивается тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  масла.

4. Для повышения достоверности выявления дефектов в силовых трансформаторах целесообразно наряду с хроматографическим анализом, ИК-анализом трансформаторного масла одновременно контролировать интенсивность частичных разрядов.

### Литература

1. СТП 33243.20.366–2016. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы / ГПО «Белэнерго». – Введен 01.11.2016. – Режим доступа: <https://energodoc.by/post/view?id=385>. – Дата доступа: 10.12.2018.
2. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2017. – 271 с. (Выш. образование: Бакалавриат).
3. Анализ проблемных вопросов эксплуатации маслонаполненных трансформаторов / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и Менеджмент. – 2017. – № 3 (96). – С. 2–6.
4. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б. В. Ванин [и др.] // Электр. станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
5. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации / И. Г. Гунн [и др.] // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 102–105.
6. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локации частичных разрядов / А. С. Карандаев [и др.] // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 105–108.
7. Николаев, А. А. Внедрение системы мониторинга технического состояния трансформатора 80 МВА энергоблока ТЭЦ ОАО «ММК» / А. А. Николаев // Электротехн. системы и комплексы (ЭСиК). – 2016. – № 2 (31). – С. 52–57.
8. Николаев, Ан. А. Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локации частичных разрядов / Ан. А. Николаев, Е. А. Храмшина, Ар. А. Николаев // Электротехн. системы и комплексы (ЭСиК). – 2018. – № 1 (38). – С. 48–54.
9. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока / П. Д. Андриенко [и др.] // Электротехника та електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 43–48.
10. Бартли, У. Обзор повреждений трансформаторов / У. Бартли // Энергия и Менеджмент. – 2011. – № 1. – С. 40–43.
11. Алексеев, Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б. А. Алексеев. – М. : НЦ ЭНОС, 2002. – 211 с.
12. Беллами, Л. Новые данные по ИК спектрам сложных молекул / Л. Беллами. – М. : Мир, 1971. – 318 с.

13. Казицына, Л. А. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектрологии в органической химии / Л. А. Казицына, Н. Б. Куплетская. – М. : Моск. ун-т, 1979. – 240 с.
14. Юхневич, Г. В. Инфракрасная спектроскопия воды / Г. В. Юхневич. – М. : Наука, 1973. – 208 с.

*Получено 12.09.2019 г.*