

УДК 621.314

А.Б. МУМИНОВ, м.н.с. (ИПЭ АН РУз)
Научный руководитель Д.Т. ЮСУПОВ, PhD, с.н.с. (ИПЭ АН РУз)
г. Ташкент

АНАЛИЗ ВИДОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Масляные силовые трансформаторы являются одним из основных энергетических оборудований, используемых для надежной, бесперебойной и эффективной работы в процессе передачи и распределения электроэнергии. Однако в процессе длительной эксплуатации физические и химические свойства масла изменяются, и в его составе образуются различные механические примеси – осадок, шлам, лаковые слои, ржавчина и углеродистые остатки. Эти вещества отрицательно влияют на изоляционную систему трансформатора, его охлаждающую способность и диэлектрическую прочность.

Примеси в масле образуются главным образом в результате реакций окисления, проникновения влаги и термического разложения органических веществ. В результате этих факторов ускоряются процессы нагрева, старения и коррозии в изоляционных материалах.

Рассмотрим влияние этих механических примесей на систему изоляции и метод определения.

Осадок:

Образуется в результате накопления твердых частиц (пыли, металломолома, оксидов) в масле в нижней части или в каналах охлаждения. Этот процесс происходит из-за медленной циркуляции масла и недостаточной фильтрации.

Эффективность охлаждения зависит от толщины осадочного слоя, а коэффициент теплообмена уменьшается следующим образом:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + \frac{\delta}{\lambda_{\text{осад}}}},$$

где α – начальный коэффициент теплообмена ($\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}$); δ – толщина осадочного слоя (м); $\lambda_{\text{осад}}$ – теплопроводность осадочного вещества ($\text{Вт}/\text{мK}$).

С увеличением толщины слоя значение α' уменьшается, что увеличивает риск локального нагрева и вызывает быстрый износ изоляции.

Шлам:

Толстая и вязкая масса, образующаяся в результате окисления масла, содержащая продукты окисления, влагу и мелкие частицы. Он в основном собирается в обмотке или втулке с низким расходом масла.

Диэлектрическая прочность масла изменяется обратно пропорционально содержанию шлама:

$$E_b = E_{b0} \cdot e^{-k_s C_s},$$

где E_b – диэлектрическая прочность в виде шлама (кВ/мм); E_{b0} – диэлектрическая прочность чистого масла; k_s – коэффициент влияния шлама; C_s – концентрация шлама (%).

В результате с увеличением содержания шлама электроустойчивость изоляционного масла экспоненциально снижается.

Лаковый слой:

Вязкий слой, образующийся в результате окисления компонентов масла, образующийся на поверхности обмоток и сердечника. Эти слои нарушают теплообмен и приводят к перегреву изоляции.

Температура горячей точки с увеличением толщины слоя определяется следующим уравнением:

$$\Delta T_{hot} = \frac{Q \cdot \delta_v}{\lambda_v \cdot A},$$

где Q – тепловой поток (Вт); δ_v – толщина слоя лака (м); λ_v – теплопроводность (Вт/мК); A – площадь, на которой распространяется тепло (м^2).

Если толщина слоя превышает 0,5 мм, температура изоляции может увеличиться до 10-15 °C, что удваивает скорость старения изоляции.

Ржавчина:

Продукт коррозии в форме Fe₂O₃ или Fe₃O₄, образующийся в металлических частях под воздействием влаги и кислорода.

Процесс коррозии оценивается согласно закону Фарадея:

$$v = \frac{I \cdot M}{n \cdot F \cdot \rho \cdot A},$$

где v – скорость коррозии (м/с); I – ток коррозии (А); M – молярная масса металла; n – число электронов; F – постоянная Фарадея (96485 Кл/моль); ρ – плотность (кг/м³), A – подверженная воздействию площадь (м²).

Образование ржавчины ослабляет металлическую структуру и создает вязкий коррозионный слой на поверхности изоляции, вызывая протекание электрического тока по нетипичным путям.

Углеродные отложения:

Это темные слои, образующиеся в результате разложения органических веществ в масле при высоких температурах. Они в основном накапливаются на контактах, переключателях ответвлений и изоляторах.

Эти слои обладают высоким сопротивлением, а тепловыделение на поверхности изоляции определяется следующим образом:

$$P = I^2 R_c,$$

где P – выделенное тепло (Вт); I – ток (А); R_c сопротивление углеродного слоя (Ом).

Высокое сопротивление слоя увеличивает потери мощности в горячих точках, вызывая сгорание или потемнение изоляции.

Образование механических примесей в трансформаторном масле существенно влияет на его эксплуатационные показатели. Они нарушают тепло-обмен, снижают стабильность изоляции и увеличивают скорость старения ма-сла.

Для обеспечения надежности рекомендуются следующие меры:

- регулярный лабораторный контроль диэлектрических параметров масла;

- очистка масла путем фильтрации и регенерации;
- профилактическая очистка каналов охлаждения;
- применение ингибиторов коррозии;
- постоянный мониторинг влажности и осадка.

Благодаря таким мероприятиям можно повысить надежность, термостойкость и энергоэффективность системы изоляции на 10-15%.

Список литературы:

1. Hironmay, D, Javin, N., Mun moon sun, N., Superdao, J., Dipankar, S. Transformer Oil Quality Diagnostic Using Spectroscopy Techniques - A Review // ADBU Journal of Electrical and Electronics Engineering (AJEEE), May 2019. –Volume 3. – Issue 1. – pp. 43–50.
2. Yong, Xu, Xiaojuan, Lu. Power Transformer Fault Diagnosis Based On Hybrid Intelligent Algorithm // Journal of Applied Science and Engineering, Mar. 04, 2023. – Vol. 27, No 1. – pp. 1859-1866.
3. Levin, V.M. Yahya, A.A. Boyarova, D.A. Predicting the technical condition of the power transformer using fuzzy logic and dissolved gas analysis method // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2022.–Vol. 12, №. 2, – pp. 1139–1146.
4. Yusupov, D.T. Muminov, A.B. Nosirov, A.I. Berdiev U.T. and Kutbidinov, O.M. Development of an algorithm of processes for cleaning power trans-

**VIII Международная молодежная научно-практическая
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

234-4

21-22 ноября 2025 г.

former oil in a circulatory way // 15th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, ICTEA 2024.

Информация об авторах:

Муминов Абдуллажон Бахромжонович, младший научный сотрудник, ИПЭ АН РУз, 100047, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Академика Яхъё Гуламова, д. 70, abdulloh0717@gmail.com

Юсупов Дилмурад Турдалиевич, ученый секретарь, PhD с.н.с., ИПЭ АН РУз, 100047, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Академика Яхъё Гуламова, д. 70, dilmurod85@list.ru