

УДК 621.315.615:532.73

<https://doi.org/10.26661/2071-3789-2024-1-2-08>

Ільїн Сергій Віталійович, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет

Волков Єгор Володимирович, аспірант, Запорізький національний університет
ORCID: 0009-0002-8659-4964

Погребна Юлія Сергіївна, аспірант, Запорізький національний університет.
ORCID: 0009-0003-0976-8964

АНАЛІЗ СТАНУ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В ПЕРЕМИКАЧАХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

У світовій практиці електроапаратобудування питанню експлуатаційної працездатності приділяється особлива увага. Для компенсації втрат кінетичної енергії, що витрачається на процеси комутації, провідні фірми «Poertech Corporation» США, «Hundai» (Республіка Корея), Індія, Китай, «Рейнгаузен», «АЄГ» (Німеччина), «Ферранті» (Італія), «АСЕА» (Швеція), «ВІТ» (Україна) застосовують періодичне чи постійно діюче очищення трансформаторного масла або використовують матеріали, що не утворюють при згорянні побічних продуктів у вигляді часток різної дисперсності [5, 6, 8, 9, 12, 22, 24].

Прагнення підвищити ресурс роботи перемикачів призводить до перерозподілу ролі механічного та електричного впливу на елементи конструкції. Тому вивчення механічних пошкоджень деталей, умов їх виникнення та закономірності розвитку набуває важливого значення при розробці концепції управління процесами, характерними для експлуатації досліджуваного обладнання.

Різноманітність видів часток забруднення робочого середовища, умов їх виникнення та розвитку, регламентується факторами зовнішньо-механічної дії в зоні комутації. До основних особливостей факторів, що визначають характер, якість і швидкість комутації при протіканні механо-фізико-хімічних процесів при високих температурах у перемикачах, відносять: використання різнорідних матеріалів, умови, вид і характер механічної взаємодії, наявність струму високої щільності і т. ін.

У процесі експлуатації високовольтних перемикачів геометрія поверхонь контактних вузлів зазнає значних змін. Кінематичний розрахунок комутаційних контакт-деталей ведеться, як правило, на стадії проектування для поверхонь з ідеальною геометрією, без урахування наступних експлуатаційних змін [14].

У багатьох роботах зазначається, що пошкодження поверхневого шару є структурно-чутливою характеристикою матеріалів. Саме цим обумовлений металознавчий підхід до дослідження контактних процесів поверхонь металів.

Ключові слова: технологія перемикання, трансформаторне масло, кінематичні характеристики, частка забруднення, експлуатація, регулювання під напругою, енергосистема.

Вступ. Сучасний стан електротехнічного обладнання високовольтних розподільчих мереж електротехнічних комплексів потребує проведення реконструкції з метою максимального використання робочого ресурсу, оптимального залучення трудових ресурсів обслуговуючого та ремонтного персоналу. Основними технічними засобами регулювання напруги є силові трансформатори з пристроями регулювання під напругою (РПН), що мають обмежений ресурс експлуатації [1].

Серед фахівців, які внесли і вносять вагомий внесок у вирішення проблеми регулювання й оптимізації функціонування енергосистем треба відмітити таких науковців, як Ананьєв К.А., Баркан Я.Д., Веніков В.А., Веселов А.Д., Герман Л.А., Говоров П.П., Гончар М.І., Ідельчик В.І., Клімаш В.С., Лежнюк П.Д., Мельніков М.А., Мокін Б.І., Рогальський Б.С. та інші [2].

До цього часу вичерпних уявлень про природу утворення поверхневого пошкодження не існує [8, 9, 23]. Автори акцентують увагу на великому впливі температури та температурних градієнтів на процес пошкодження трансформаторного масла.

За даними Акціонерного товариства «Український науково-дослідний проектно-конструкторський та технологічний інститут трансформаторобудування» (АТ ВІТ), температура нагрівання трансформаторного масла істотно впливає на характеристики роботи перемикачів. Зі зростанням температури збільшуються сили опору зрушення, що негативно впливають на кінематику рухомих деталей електромеханічних вузлів [4, 6, 7, 9, 10, 19].

Питання термостійкості матеріалів продовжує зберігати свою актуальність, оскільки безпосередньо впливає на вибір і прийняття конструкторських рішень та розвиток технології комутаційних процесів в електроенергетиці.

Таким чином, температурний фактор є одним із домінуючих і вимагає більшої конкретизації при визначенні концепції, що пояснює експлуатаційну працездатність маслонаповнених електричних перемикачів високої напруги.

Трансформатори з повздовжнім регулюванням напруги під навантаженням, тобто з вбудованим вузлом РПН мають спеціальний пристрій перемикача зі значною кількістю ступенів регульованих відгалужень [6].

Трансформаторне масло найчастіше є робочим середовищем, що слугує одночасно тепло- і електроізоляцією в конструкціях перемикачів [6]. Якість сировини (сира нафта), з якої виготовляється трансформаторне масло відрізняється за своїм хімічним складом залежно від родовища, табл 1.

Основною складовою трансформаторного масла є нафтові вуглеводні. Нафти – хороші діелектрики, мають низький та стабільний тангенс кута діелектричних втрат [11, 17, 21].

Таблиця 1 – Характеристика нафт різних родовищ [5, 18]

Місце знаходження	Щільність, віднос. од.	В'язкість при 50°C	Парафіни, %	Вміст, %		
			Т плавл., °C	сірка	смола	асфальтени
1. Башкортостан:						
Туймазинське	0,852	4,46	5,9/50	1,47	10,9	3,9
Арланське	0,893	10,90	4,7/49	2,84	20,3	5,2
2. Татарстан:						
Ромашкінське	0,867	6,54	4,87/50	1,62	11,6	4,16
3. Азербайджан:						
Сураханське	0,896	11,0	0,96	0,23	–	–

За змащувальними властивостями вуглеводні розташовуються в такий ряд: ароматичні, ізопарафінові, нафтові, Н-парафінові. Нафтові вуглеводні активно реагують з киснем повітря, особливо в присутності металів під час нагрівання під впливом електричної дуги та електричного поля. Під час роботи маслонаповненого обладнання високої напруги трансформаторне масло піддається впливу електричного поля, при цьому швидкість окисних реакцій зростає. На думку авторів [18] за наявності електричного поля в маслі утворюється в 4–5 разів більше води, ніж за тих самих умов але без електричного поля, забруднюючі частинки осаду мають більші розміри.

Цікавими є результати аналізів поведінки включень, що неминуче присутні в трансформаторному маслі. У [8, 16] вказується, що локальні електричні поля, що виникають між перемикачами, напруженість яких достатня для того, щоб елементарні об'єми масла підпадали під короткочасний неглибокий крекінг-процес. «Повторний крекінг» викликає прискорене самоперетворення масла, зокрема, в низькомолекулярні продукти: водень H_2 і метан CH_4 . Осад, що утворюється при цьому, накопичується в зоні максимальної напруженості електричного поля [11, 13], що погіршує процес тепловіддачі із зони комутації.

Вода H_2O в трансформаторному маслі може бути у вигляді розчину, емульсії (крапель діаметром ~ 10 мкм), відстою на дні резервуара перемикача. Домішки води в кількості до 0,01% знижують електричну міцність масла настільки, що роблять її непридатною для роботи в маслонаповнених перемикачах високої напруги.

Як правило, під впливом сил електричного поля краплі води набувають подовженої форми в напрямі силових ліній поля і переміщуються до країв електроконтактів і є осередками розвитку електричного пробою та крекінгу масла з утворенням кисню O_2 , водню H_2 , метану CH_4 [15].

Вміст сірки в маслах різних родовищ може відрізнятись у 10 разів. Найбільш активними із сірчаних сполук є меркаптени. Дані про їх вплив на контактне робоче та критичне навантаження при механічному контакті суперечливі і мають описовий характер.

Сполуки смолистої консистенції поділяються на метанольні та оцтово-кислі. Вони здатні зменшувати механічне руйнування контактних поверхонь і збільшувати критичне навантаження, проте їх кількість у маслах, що застосовуються у високовольтних електричних перемикачах, обмежується високими вимогами до діелектричних показників.

Дослідження впливу неуглеводних компонентів на експлуатаційні властивості масел показали, що більшість сірчаних і азотистих сполук мають корозійні властивості.

Підвищена робоча температура трансформаторного масла сприяє процесам окислення та корозії. Сталь, нікель, хром, кадмій, титан мало руйнуються у середовищі трансформаторного масла. Найбільш інтенсивно протікає корозія міді та сплавів на її основі. Швидкість реакції залежить від кількості міді. Чим більший вміст основного металу, тим швидше здійснюється окислення [9, 16, 19]. У утворенні оксидів металів може брати участь розчинений у маслі молекулярний кисень, перекиси та кислоти. Роль перекисів зводиться до окислення металів, а кислоти взаємодіють з оксидами металів, утворюючи мила, розчинні в маслі або такі, що випадають у осад. При відсутності перекисних сполук та кисню корозія міді, інших металів не відбувається, що підтверджується дослідженнями в герметичних ємностях без доступу повітря [17, 19, 20].

Відомо, що наявність у маслі вагових 0,001% міді та заліза (у вигляді органічних солей) збільшує глибину окислення в 10-20 разів у порівнянні з дією чистих металів. За силою каталізуючих властивостей у трансформаторному маслі метали розташовуються таким чином: (температура масла $120^\circ C$): мідь, покрита оксидами; мідь чиста; луджена мідь.

Постановка завдання. У даній роботі ставиться завдання проведення поглиблених розрахунків параметрів потоку трансформаторного масла в перемикачі за його кінематичними характеристиками в умовах необхідної періодичної заміни забрудненого масла на чисте, необхідно визначитись інтегральним характеристичним показником чутливим до зміни стану потоку, ступеня забруднення, величини нерівномірності руху та температури, роботи переміщення твердих фракцій у потоці масла. Такою величиною, на нашу думку, може бути зміна тиску у потоці трансформаторного масла забрудненого різнорідними фракціями, тобто фактично двофазного потоку, що рухається під певним кутом до горизонтальної площини – днища масляного баку РПН.

Результати дослідження. Нисхідний потік у масляному бакові РПН виникає на першій стадії очищення від гранично допустимого забрудненого масла для уникнення осідання часток забруднення на елементах конструкції та короткого замикання або заклинювання вузлів при комутації, тобто виникнення аварійної ситуації.

Керуючись припущеннями і висновками при розгляді моделі руху двофазного потоку трансформаторного масла, скористаємось формулами розрахунку втрат тиску при переміщенні моделі забруднюючих часток, приведених до однакового розміру та коефіцієнта парусності $X_n = \text{const}$.

Розрахункова схема сил діючих у низхідному потоці та план швидкостей показані на рис. 1.

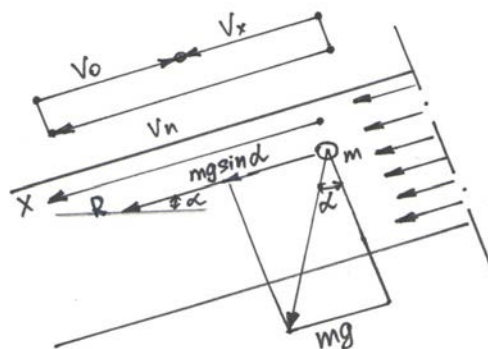


Рисунок 1 – Розрахункова схема сил потоку трансформаторного масла

Вважаємо, що $V_x < V_n$, де швидкість потоку $V_n = \text{const}$, а $V_x = V_n - V_0$.
Рівняння руху для нашого випадку запишемо:

$$-m \frac{dV_0}{dt} = R + mg \sin \alpha,$$

де R – сила дії потоку на частку забруднення.

Відомо [4, 5], що

$$R = C \frac{\gamma F}{2g} V_0^2, \text{ а } K_n = C \frac{\gamma F}{2mg}.$$

Величина C є математичною константою, яка віддзеркалює постійну частину тиску у потоці трансформаторного масла, оскільки предметом дослідження є теоретичне визначення зміни тиску $\pm \Delta H$, як характеристики, що вказує на наявність турбулентності.

Необхідно зазначити, що фізична константа як математична величина визначається незалежно від будь-яких фізичних вимірювань і є не важливою незалежно від того, що може мати певне фізичне значення. Отже, C є постійною інтегрування, тобто довільним дійсним числом у деякій множині дійсних чисел. Константи C виникають у рішеннях диференціальних рівнянь, у яких не є заданими початкові або граничні умови як у нашому випадку [3].

Прийmemo до уваги, що

$$\sigma = V_k \sqrt{\sin \alpha},$$

де V_k – критична швидкість, що відповідає положенню частки у стані зависання та отримаємо:

$$-\frac{dV_0}{V_0^2 + \sigma^2} = K_n dt.$$

Після інтегрування

$$-\frac{1}{A} \operatorname{arctg} \frac{V_0}{A} + C_1 = K_n t.$$

При $t = 0$ $V_0 = V_{0_1}$ – $C_1 = \frac{1}{A} \operatorname{arctg} \frac{V_{0_1}}{A}$.

Після підстановки отримаємо:

$$V_0 = \sigma \operatorname{tg}(\varphi_1 - \sigma K_n t), \quad (1)$$

де $\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{V_{0_1}}{A}$.

Абсолютна швидкість становить

$$V_x = V_n - \sigma \operatorname{tg}(\varphi_1 - \sigma K_n t). \quad (2)$$

Поточне значення переміщення частки забруднення розраховується за формулою:

$$= V_n t - \frac{1}{K_n} \ln \frac{\cos(\varphi_1 - \sigma K_n t)}{\cos \varphi_1}. \quad (3)$$

При зміні кута α до 0, $\alpha \rightarrow 0$ відносна швидкість змінюється до величини:

$$V_0 \rightarrow \left(\frac{V_{0_1}}{1 + V_{0_1} K_n t} \right).$$

При вертикальному потоці при $\alpha = \frac{\pi}{2}$, $\sigma = V_k$ матимемо переміщення частки забруднення

$$x = V_n t - \frac{1}{K_n} \ln \frac{\cos(\varphi_1 - V_k K_n t)}{\cos \varphi_1}, \quad (4)$$

$$V_x = V_n - V_k \operatorname{tg}(\varphi_1 - V_k K_n t), \text{ а} \quad (5)$$

$$V_0 = V_k \operatorname{tg}(\varphi_1 - V_k K_n t). \quad (6)$$

Отримані формули мають певні межі використання і є справедливими для умов, коли $V_k < V_n$, оскільки при $V_x > V_n$ сила R змінює знак на протилежний і диференціальне рівняння матиме інший вид. Тому, спочатку необхідно знайти час t_p , за який частки, що переміщуються під дією потоку масла і силою ваги (або її складової), набудуть швидкості потоку.

Такий підхід дозволяє визначити граничне переміщення моделей часток забруднення в масляній ванні (середовищі) і встановити межі використання знайдених рівнянь.

Для часу t_p вирівнювання швидкостей часток і потоку за умови $V_0 = 0$ із формули (1) матимемо:

$$t_p = \frac{\varphi_1}{\sigma K_n}. \quad (7)$$

Координати точки вирівнювання швидкостей x_p із формули (3) будуть:

$$x_p = V_n \frac{\varphi_1}{\sigma K_n} + \frac{1}{K_n} \ln \cos \varphi_1. \quad (8)$$

Висновки. Таким чином проведені розрахунки вказують на зміну кінематичних характеристик двофазного потоку, а саме забруднюючих часток та трансформаторного масла у перемикачах РПН під час комутації та витікання забрудненого масла при його заміні.

Схожість математичного апарату, що використаний для розрахунків висхідного та низхідного потоків вказують на загальну ідентичність процесів у режимі турбулентності.

В межах поставленої задачі досліджень достатньо обмежитись якісними характеристиками масляного потоку, отриманими на теоретичному рівні для підтвердження режиму турбулентності на першій стадії очистки РПН.

Аналіз отриманих формул (1–8) підтверджує гіпотезу, що і у висхідному як і у низхідному потоках масла перемикачів РПН має місце зміна кінематичних характеристик під дією режиму турбулентності. На цій підставі справедливо припустити, що має місце або підвищення тиску низхідного потоку або його пониження при транспортуванні часток забруднення масою m . За допомогою заданого коефіцієнта парусності K_n можливо знайти час t їх руху на заданому відрізку руху x , можливо підтвердити наближене значення тиску H та його складових $+\Delta H$.

Бібліографічний перелік

1. Карпов Ю.О., Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Пиріжок М.І. Прогнозування якості функціонування пристроїв регулювання під напругою трансформаторів в умовах нечітких результатів випробувань. Вісник ВПІ, 2007. №2. С.61-65.

2. Грабко В.В. Система автоматичного керування трансформаторами з повздовжньо-поперечним регулюванням напруги під навантаженням: монографія. / В.В. Грабко, С.М. Левицький. Вінниця: ВНТУ, 2010. 119 с.

3. Charles M. Grinstead, J. Laurie Snell. Introduction to probability theory (Wikipedia <http://uk.m.wikipedia.org/wiki>)

4. Андреева Н. А. Разработка технологии внутреннего окисления сплавов системы Cu - Zn : Автореферат дис... канд. техн. наук : Ленинград., 1981. 11 с.

5. Боцар Т., Фрац П., Змерзлий Д. Аналіз оптичного спектра світла, що випускається електричними розрядами в масляній ізоляції / Т. Боцар, // *Фізика і хімія твердого тіла*, 2003. № 4. С. 729-735.

6. Грабко В. В. Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів : монографія / В. В. Грабко, Б. І. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 74 с.

7. ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. М. : Стандартинформ, 2008. 18 с.

8. Джасім Д. М. Удосконалення методу контролю вологості масла та ізоляції трансформаторів по її електричній добротності : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.11.13 : захищ. 15.11.12 / Джасім Джамед Джасім.–Луганськ. 2012. – 20 с.

9. Дмитренко А. И. Влияние деформирования контактов и марок масел на скорость роста посторонних пленок // Электрические контакты, пути повышения качества и надежности. Киев. : 1983. С. 30–34.

10. Залесский А. М. Электрическая дуга отключения. М. – Л. : ГЭИ, 1983. 266 с.

11. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование : монография / В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия. – 1969. – 304 с.

12. Ильин С. В. Влияние ультразвука на тепловые процессы в обмотках масляных трансформаторов / С. В. Ильин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. № 2/5(56). – С. 7-8.
13. Козлов В. В. Проблеми моделювання теплових режимів у силових трансформаторах // Електротехніка та електроенергетика. Запоріжжя : ЗНТУ. 2002. №1. – С. 47–48.
14. Костерев Н. В. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации Н. В. Костерев, Б. И. Бардик // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». 2006. Ч. 3. С. 39–43.
15. Круковский П. Г., Яцевский В. А. Гидродинамические особенности течения и теплообмена во взаимосвязанных каналах силовых масляных трансформаторов. *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. № 9. С.72 –78.
16. Куцова В. З., Коваленко К. И. Влияние магнитной обработки на свойства литейных сплавов // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах. – Запорожье. 1991. – С. 164.
17. Лазарев В. Б., Соболев В. В., Шаплыгин И. С. Химические и физические свойства простых окислов металлов. М. : Наука, 1983. 239 с.
18. Остроумов Г. А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М. : Наука, 1979. 319 с.
19. Сахно О.А. Система безперервного контролю та прогнозу залишкового ресурсу високовольних трансформаторів струму : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02. Львів, 2012. 20 с.
20. Теодорович О.К. Материалы для электрических контактов высоковольтных выключателей // Сильноточные электрические контакты и электроды. Киев. : Наукова думка. 1972. – С. 221–228.
21. Україна, МКИ Н 02 J 3/12. Спосіб регулювання напруги електричної підстанції / Пат. 4222А Україна, МКИ Н 02 J 3/12 / П.П. Говоров (Україна); Харківська академія міського господарства. – 2000116702; Заявл. 27. 11. 2000; Опубл. 15. 10. 2001.
22. Abu-Siada, A., Islam, S. A new approach to identify power transformer criticality and asset management decision based on dissolved gas-in-oil analysis. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2012, 19, 1007-1012. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Degeratu S., Rotaru P., Rizescu S., Danoiu S., Bizdoaca N. G., Alboteanu L. I., Manolea H. O. Condition monitoring of transformer oil using thermal analysis and other techniques. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. Vol. 119. №. 3. pp. 1679-1692. doi: <https://www.doi.org/10.1007/s10973-014-4276-3>.
24. Reddy BK. Latest Trends in Use of Transformer Oils. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 67(7), 37-39, 2019.

References

1. Karpov Y.O., Lezhnyuk P.D., Rubanenko O.E., Pyrizhok M.I., Visnyk VPI Forecasting the quality of functioning of transformer voltage regulation devices in conditions of unclear test results – 2007.-№2. P.61-65.
2. Hrabko V.V. System of automatic control of transformers with longitudinal-transverse regulation of voltage under load: monograph./V.V. Hrabko, S.M. Levitskyi. – Vinnytsia: VNTU, 2010.-119 p.
3. Charles M. Grinstead, J. Laurie Snell. Introduction to probability theory (Wikipedia <http://uk.m.wikipedia.org/wiki>)
4. Botsar T. Analysis of the optical spectrum of light emitted by electric discharges in oil insulation / T. Botsar, P. Frats, D. Zmerzly // Physics and chemistry of solids. – 2003. –4, No. 4. P. 729-735.
5. Golovan G. D. Influence of steel, brass and titanium alloys on the oxidation of oil transformers // EP. High voltage devices. 1973. No. 3/23. P. 16–17.
6. Grabko V.V. Models and systems of technical diagnostics of high-voltage circuit breakers: monograph / VV Grabko, B. I. Mokin. – Vinnytsia: UNIVERSUM- Vinnytsia, 1999. – 74 p.
7. GOST 6581-75. Liquid electrical insulation materials. Methods of electrical testing. M.: Standartinform, 2008. 18 p.
8. Jasim D. M. Improvement of the method of controlling the humidity of oil and insulation of transformers according to its electrical quality: autoref. thesis Ph.D. technical Sciences: 05.11.13: defense. 15.11.12 / Jasim Jasim Mohamed Jasim.–Luhansk. 2012. – 20 p.
9. Dmytrenko A. I. The influence of deformation of contacts and oil brands on the growth rate of extraneous films // Electric contacts, ways of improving quality and reliability. Kyiv. : 1983. P. 30–34.
10. Zalesskii A.M. Electric arc tripping. Moscow – L.: GEI, 1983. 266 p.
11. Ivanov-Smolensky A. V. Electromagnetic fields and processes in electric machines and their physical modeling: monograph / V. Ivanov-Smolensky. – M.: Energy. – 1969. – 304 p.
12. Ilyin S. V. Influence of ultrasound on thermal processes in the windings of oil transformers / S. V. Ilyin // Vostochno-Evropeyskii zhurnal peredovykh tehnologii. – 2012. – No. 2/5(56). – P. 7-8.
13. Kozlov, V.V. Problems of modeling thermal regimes in power transformers // Electrical engineering and power engineering. Zaporizhzhia: ZNTU. 2002. No. 1. – pp. 47–48.
14. Kosterev N. V., Fuzzy modeling of electrical equipment for evaluation and decision-making about the strategy of further exploitation N. V. Kosterev, B. I. Bardyk // Technical electro-dynamics. Subject. issue "Problems of modern electrical engineering". 2006. Part 3. P. 39–43.
15. Krukovsky P. G., Yatsevsky V. A. Hydrodynamic features of flow and heat exchange in interconnected channels of power oil transformers. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2012. No. 9. P.72-78.

16. Kutsova V. Z., Kovalenko K. I. Influence of magnetic treatment on the properties of casting silumenes // Nonmetallic inclusions and gases in casting alloys. – Zaporozhye. 1991. – P. 164.
17. Lazarev V. B., Sobolev V. V., Shaplygin I. S. Chemical and physical properties of simple metal oxides. Moscow: Nauka, 1983. 239 p.
18. Ostroumov G. A Interaction of electric and hydrodynamic fields. M.: Nauka, 1979. 319 p.
19. Sakhno O.A. The system of continuous monitoring and forecasting of the residual resource of high-voltage current transformers: autoref. thesis ... candidate technical Sciences: 05.14.02. Lviv, 2012. 20 p.
20. Teodorovych O.K. Materials for electrical contacts of high-voltage switches // High-voltage electrical contacts and electrodes. Kyiv. : Scientific opinion. 1972. – P. 221–228.
21. Ukraine, MKY N 02 J 3/12. The method of regulating the voltage of an electric substation: Pat. 4222A Ukraine, MKY N 02 J 3/12 / P.P. Govorov (Ukraine); Kharkiv Academy of Urban Economy. – 2000116702; Application 27. 11. 2000; Publ. 15. 10. 2001.
22. Abu-Siada, A., Islam, S. A new approach to identify power transformer criticality and asset management decision based on dissolved gas-in-oil analysis. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012, 19, 1007-1012. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Degeratu S., Rotaru P., Rizescu S., Danoiu S., Bizdoaca N. G., Alboteanu L. I., Manolea H. O. Condition monitoring of transformer oil using thermal analysis and other techniques. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. Vol. 119. №. 3. pp. 1679-1692. doi: <https://www.doi.org/10.1007/s10973-014-4276-3>.
24. Reddy BK. Latest Trends in Use of Transformer Oils. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 67(7), 37-39, 2019.

Ilyin Serhii, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University

Volkov Egor, graduate student, Zaporizhzhia National University,
ORCID: 0009-0002-8659-4964

Pogrebna Yuliya, graduate student, Zaporizhzhia National University,
ORCID: 0009-0003-0976-8964

ANALYSIS OF THE CONDITION OF USED TRANSFORMER OIL IN SWITCHES OF ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF METALLURGICAL ENTERPRISES

In the global practice of electrical apparatus construction, special attention is paid to the issue of operational efficiency. To compensate for the loss of kinetic energy spent on switching processes, the leading companies "Poertech Corporation" USA, "Hundai" (Republic of Korea), India, China, "Reinghausen", "AEG" (Germany), "Ferranti" (Italy), "ACEA" (Sweden), "VIT" (Ukraine) use periodic or continuous purification of transformer oil or use materials that do not form by-products during combustion in the form of particles of different dispersion.

The desire to increase the service life of switches leads to a redistribution of the role of mechanical and electrical influence on structural elements. Therefore, the study of mechanical damage to parts, the conditions of their occurrence and the regularity of their development acquires an important importance in the development of the concept of management of processes characteristic for the operation of the investigated equipment.

The variety of types of particles of contamination of the working environment, the conditions of their occurrence and development, are regulated by factors of external mechanical action in the commutation zone. The main features of the factors that determine the nature, quality and speed of commutation when mechanical, physical and chemical processes occur at high temperatures in switches include: the use of dissimilar materials, conditions, the type and nature of mechanical interaction, the presence of a high density current, etc.

In the process of operation of high-voltage switches, the geometry of the surfaces of the contact nodes undergoes significant changes. Kinematic calculation of switching contact details is usually carried out at the design stage for surfaces with ideal geometry, without taking into account subsequent operational changes.

In many works, it is noted that damage to the surface layer is a structurally sensitive characteristic of materials. This is what determines the metallurgical approach to the study of contact processes of metal surfaces

Key words: switching technology, transformer oil, kinematic characteristics, contamination rate, operation, regulation under voltage, power system.