

О.О. Матусевич. канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна)

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Вступ

Надійна робота електроустаткування підстанцій – один із основних чинників, що визначає стабільне тягове електропостачання залізниць. Силкові трансформатори є основними елементами електричних мереж та систем, які визначають надійність і економічність їх функціонування.

На сьогодні основною проблемою експлуатації трансформаторного парку є експлуатація значної кількості трансформаторів, які вже відпрацювали свій нормативний термін служби. На залізницях України тягове електропостачання здійснюється від 305 стаціонарних та пересувних тягових підстанцій (ТП). З них 233 стаціонарних (76,3 % від загальної кількості) та 10 пересувних з терміном служби понад 30 років [1]. На цей час процес старіння парку ТП та його силового електрообладнання практично не знижує своїх темпів. У цих умовах вдосконалення системи сервісного обслуговування старіючого електрообладнання ТП стає не лише завданням підтримки його працездатності, але і завданням підтримки на належному рівні надійності електропостачання в цілому.

Ключовими в цій ситуації стають такі питання:

- який фактичний або залишковий ресурс працездатності ТП та конкретної групи або одиниці електроустаткування?;

- які фактичні характеристики надійності конкретної групи або одиниці електроустаткування ТП, термін служби якого істотно перевищує зазначений в технічній документації?

Однак нині, абсолютно точних і однозначних відповідей на ці питання майже не існує. Це обумовлено, перш за все, відсутністю достовірних вихідних даних і складністю їх отримання в реальних умовах експлуатації.

Постановка проблеми досліджень

Згідно з дод. 2 роботи [2], термін служби трансформатора складає не менше 25 років, при цьому через 12 років необхідно виконувати капітальний ремонт. На цей час з 422 знижувальних та тягових трансформаторів напругою 110–220 кВ знаходиться в експлуатації 337 зі строком служби понад 25 років, що складає 79% від загальної кількості знижувальних та тягових трансформаторів. За наявності трансформаторів з терміном експлуатації понад 25 років, службами електропостачання Південної залізниці (48 трансформаторів – 70%), Південно-Західної (43 трансформаторів – 60%), Одеської (37 трансформаторів – 59%) у 2011 році роботи щодо ремонту та заміни навіть і не планувалися. В 2012 році проведено 11 капітальних ремонтів тягових трансформаторів [1].

Із досвіду експлуатації силових трансформаторів бачимо, що і після нормативного терміну служби значна їх частина зберігає свою працездатність при дотриманні допустимих навантажувальних режимів, своєчасному проведенні випробувань, діагностуванні, технічному обслуговуванні, ремонті та якісному їх виконанні. Однак термін служби трансформатора залежить від його залишкового ресурсу. У понятті ресурс трансформатора необхідно виділити дві складові [3]:

- перша складова, це поновлюваний ресурс. Це в першу чергу ресурс ізоляційної системи.

До поновлюваного ресурсу можна також віднести ремонт або заміну окремих компонентів трансформатора, таких як вводи, перемикаючі пристрої, насоси, вентилятори системи охолодження та ін.;

- друга складова, це ресурс целюлозної ізоляції, який не може бути відновлений, що, в кінцевому рахунку, він і визначає залишковий ресурс трансформатора в цілому.

Розглянемо можливі шляхи вирішення таких проблем на прикладі оцінки технічного стану силових трансформаторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведені в останні роки дослідження трансформаторів фахівцями України та Росії у тому числі НДЦ «ЗТЗ - Сервіс» (м. Запоріжжя) [4], з напрацюванням понад 20 років, дозволили виявити основні дефекти силових трансформаторів, які наведено у табл. 1.

Однак така велика кількість виявлених дефектів трансформаторів, ускладнює можливість якісно оцінювати та прогнозувати стан обладнання. Для вирішення цієї проблеми існує багато сучасних методів. У цьому напрямі японські вчені, в період становлення науки про якість, відібрали сім основних методів. Заслуга вчених полягає в тому, що вони забезпечили простоту, наочність, візуалізацію багатьох статистичних методів, перетворивши їх фактично в ефективні інструменти оперативного контролю якості [5]. Одним з таких інструментів є діаграма Парето, принцип якої оснований на відокремленні важливих факторів від малозначних і несуттєвих та дозволяє сфокусувати зусилля і ресурси на усунення найбільш вагомих проблем.

Таблиця 1.

Основні дефекти силових трансформаторів

Обладнання та вид дефекту	Кількість випадків	Частка, %
Система охолодження	146	23,1
Високовольтні вводи	92	14,5
Виділення газів в масло	58	9,2
Старіння масла	48	7,6
Дефекти в пристрої РПН (регулювання під навантаженням)	46	7,3
Витік з ущільнень обладнання трансформатора	44	7
Розпресування обмоток	42	6,6
Забруднення твердої ізоляції	34	5,4
Зволоження твердої ізоляції	26	4,1
Розпресування магнітопроводу	26	4,1
Забруднення масла	14	2,2
Деформація обмоток	10	1,6
Пошкодження в шафі автоматичного керування охолодженням трансформаторів	8	1,3
Підвищена вібрація	8	1,3
Пошкодження відводів	7	1,1
Пошкодження магнітних шунтів	6	0,9
Пошкодження пристроїв ПБЗ (перемикання без збудження)	6	0,9
Окислювання масла	4	0,6
Перегрів розімання	4	0,6
Порушення герметичності	4	0,6

Діаграма Парето, яка побудована на основі даних табл. 1, наведена на рис. 1.

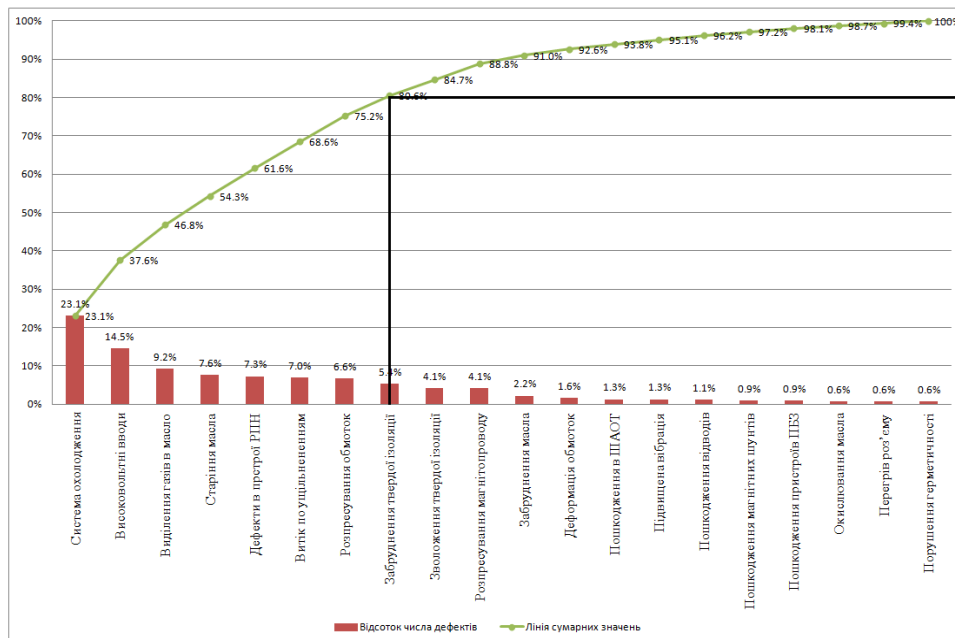


Рис. 1. Діаграма визначення основного обладнання та дефектів виходу з ладу трансформаторів

Як бачимо з діаграми, на 37% обладнання та видів дефектів трансформаторів доводиться 80% пошкоджень. З цих дефектів виділимо основні (на які доводиться 80% пошкоджень), це: пошкодження системи охолодження, надходження газів в масло, витік масла з ущільнень, забруднення масла та, як результат цих процесів, старіння трансформаторного масла.

Виклад основного матеріалу досліджень

Світовий досвід [6] засвідчив, що метод, в основі якого лежить аналіз масла, є головним при діагностуванні технічного стану машинного устаткування: насоси, компресори, двигуни внутрішнього згоряння, редуктори, трансформатори і т.д. В Україні, Росії та інших державах СНД цей метод технічного діагностування не набув широкого застосування. Проте у світовій практиці він вважається досить ефективним, оскільки дефекти трансформаторів, що виявляються під час аналізу масла, підтверджуються в 95% випадків при розбиранні маслonaповненого обладнання. Також слід зазначити, що стан і робочий ресурс обладнання більш ніж на 60–70% залежить від характеристики масла. Таким чином, аналіз масла дозволяє отримати достовірну інформацію про технічний стан маслonaповненого обладнання.

Крім того, даний метод має такі переваги:

- не вимагає припинення експлуатації обладнання;
- не потребує розбирання обладнання;
- виявлення несправностей обладнання на самій ранній стадії їх виникнення;
- можливість заміни масла за його фактичним станом, а не за часом використання;
- невисокі економічні затрати на проведення діагностування й аналізу отриманих даних.

У результаті старіння трансформаторного масла [7, 8] погіршуються його електроізоляційні властивості, накопичується бруд на активних частинах трансформатора (обмотках, магнітопроводі), що ускладнює відведення від них теплоти. Старіння масла прискорюється при підвищеній температурі трансформатора, наявності дотику з киснем повітря, сильного електричного поля тощо. Домінуючим чинником старіння трансформаторного масла, до складу якого входять вуглеводи, смолисті та сірчисті продукти, є окислювальні перетворення. Усі наведені фактори сприяють погіршенню властивостей масла: збільшуються кислотне число, зольність, температура спалаху, в'язкість, ізоляційні властивості (пробивна напруга та $\text{tg}\delta$). Вищезгадані причини процесу старіння паперово-масляної ізоляції силових трансформаторів дозволяють виявити основні показники діагностування ізоляції (рис. 2).

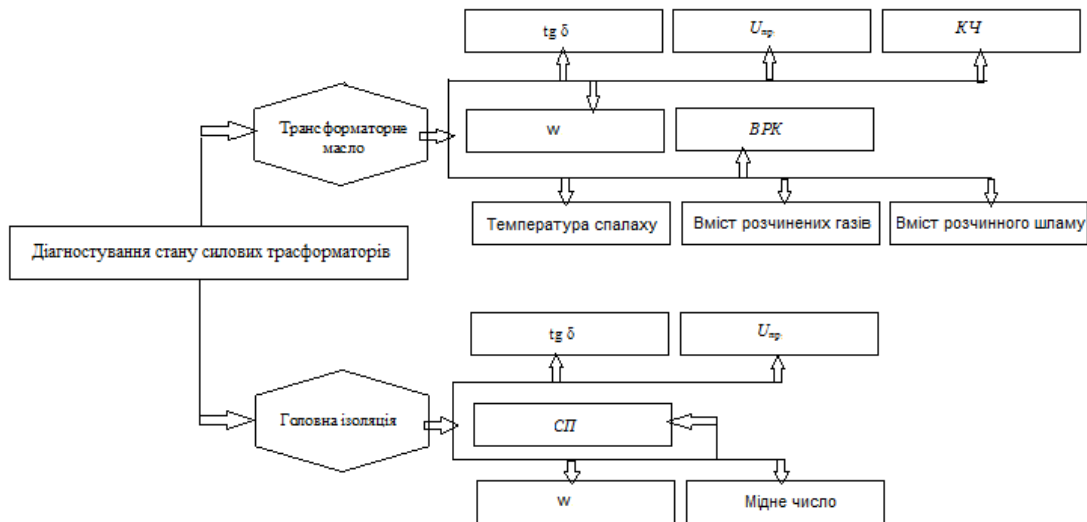


Рис. 2. Схема класифікації показників діагностування паперово-масляної ізоляції силових трансформаторів:
 $\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат; $U_{сп}$ – пробивна напруга; КЧ – кислотне число; W – вологовміст; СП – ступінь полімеризації; ВРК – водорозчинні кислоти.

Як бачимо, широкий спектр показників діагностування стану силових трансформаторів вказує на складність їх об'єктивної і достовірної оцінки. Однак на даний час для аналізу масла в лабораторіях підприємств в основному використовуються тільки лабораторні методи, так званої «мокрої хімії», які є тривалими, вимагають значної кількості реагентів і розчинників, а також кваліфікованих фахівців, що мають допуск до роботи з небезпечними хімічними реактивами. У цих умовах, на наш погляд, основним напрямом зменшення використання даних реактивів є застосування нових підходів і сучасних методів діагностування, а також нового лабораторного обладнання.

Останнім часом дуже поширеним методом для аналізу масла, який вирішує головні завдання в комплексі, є інфрачервона спектроскопія (ІЧ – спектроскопія) [9]. Інфрачервоне випромінювання займає спектральну область між червоним кінцем видимого світу (з довжиною хвилі $\lambda = 0,74$ мкм) і мікрохвильовим випромінюванням ($\lambda = 1-2$ мм). Інфрачервоне випромінювання також називають «тепловим» випромінюванням, при цьому довжина хвиль, що випромінюються обладнанням, залежить від температури нагрівання: чим вище температура, тим коротше довжина хвилі і вище інтенсивність випромінювання. Цей метод аналізу рідкої та твердої ізоляції є перспективним і дає можливість отримати відомості про фактичний стан силових трансформаторів та іншого наповненого маслом обладнання.

Ряд промислових компаній вже перейшли на сучасні портативні прилади, які працюють за тими ж принципами, що і лабораторне устаткування, але з істотним зменшенням часу аналізу, зменшенням необхідності в реагентах і розчинниках, а також з усуненням використання небезпечних і шкідливих хімічних реагентів. Наприклад, нове покоління портативних мінілабораторій для аналізу масел серії BALTECH OA «Oil Analyzer» усувають необхідність у небезпечних реактивах і інтерпретації результатів аналізу масла та значно знижують вартість і час, потрібний для діагностування фактичного стану силових трансформаторів. Компанія "BALTECH" є представником компанії Fixturlaser (Швеція) на території Росії, СНД і країн Балтії. Основні елементи обладнання міні-лабораторії "Oil Analyzer" зображено на рис. 3.

Особливо привабливо цей метод виглядає при виконанні переносного ІЧ – аналізатора 1100, пропонуваного даною компанією. Зовнішній вигляд ІЧ – аналізатора 1100 наведено на рис. 4.



Рис. 3. Портативна міні лабораторія для аналізу трансформаторного масла



Рис. 4. ІЧ- аналізатор 1100

Даний прилад дозволяє визначати такі важливі характеристики масла, як обсяг води, загальне лужне число, загальне кислотне число, вміст сажі, гліколя, присадок і окислення масла. Крім того, він не вимагає застосування розчинників і пробопідготовки, характерних для класичного лабораторного ІЧ - аналізу. За допомогою ІЧ – аналізатора 1100 можливо отримати інформацію про критичний стан масла за 2 хвилини. Як правило, в комплекті з переносним ІЧ - аналізатором 1100 слід застосовувати портативний віскозиметр 3050, який дозволяє визначати кінематичну в'язкість масла (одного з основних показників масла) також на робочому місці і мати, таким чином, повне уявлення про стан масла. Результати порівняння традиційної системи аналізу масла та сучасних методів наведені в табл. 2.

Таблиця 2.

Порівняння традиційної системи аналізу масла та сучасних методів

Основні речовини, засоби та напрями аналізу	Традиційна система аналізу масла	Портативна міні лабораторія BALTECH
1	2	3
Небезпечні реактиви	1. Небезпечні реактиви: <ul style="list-style-type: none"> • гідрид кальцію • розчинник для екстракції газів • ортофосфорна кислота • розчинник Стоддарта 2. Вимагається система очищення від використаних реактивів і матеріалів 3. Значна вартість реактивів і матеріалів необхідних для аналізу	1. Немає: <ul style="list-style-type: none"> • небезпечних реактивів • вибухонебезпечних речовин • хімічних реактивів • очисників • доставки 2. Мінімальні витрати – тільки на піпетки і серветки
Безпечні речовини	1. Вплив на працівника 2. Багато заходів безпеки слід прийняти перед тим, як фахівці почнуть працювати із застосуванням небезпечних реактивів	1. Не впливає на працівника 2. Оператор може брати зразки безпосередньо із джерела, щоб зменшити потік забруднень
Навчання	1. Тільки атестований фахівець 2. Навчання транспортуванню, зберіганню, роботі і утилізації небезпечних реактивів 3. Навчання проведенню аналізу води в маслі, загальному кислотному числу	1. Вимагається мінімальне навчання 2. Не потрібно спеціальної атестації
Проведення тестів	Ручна робота	Автоматична робота
Лабораторне калібрування	Періодичне	Не вимагається
Універсальність	Використається головним чином тільки для спеціальних тестів	Охоплює усі маслонаповнені системи підприємства

Як бачимо, даний підхід значно скорочує витрати та підвищує якість моніторингу і діагностування та є новим кроком до переведення устаткування на обслуговування за фактичним станом. За допомогою цього підходу можна знизити показники витрат і зменшити потреби в персоналі, що проводять аналіз масла, на 25%, а також вартість аналізу масла на 75% за рахунок обмеження купівлі, транспортування та утилізації небезпечних реактивів [9].

Розглянута концепція, в основу якої покладено фізико-хімічне діагностування за допомогою спектрального аналізу, дозволяє швидко, а, головне, точно проводити обстеження обладнання в робочих умовах з мінімальними витратами. Це в декілька разів може скоротити періодичність обстеження та дозволити виявити більшість дефектів, які швидко розвиваються.

Оцінку зносу ізоляції силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць, можна проводити за одним із основних чинників прискореного старіння ізоляції: підвищена температура, зволоження ізоляції, окислення масла та зростання концентрації кисню, розчиненого в маслі бака трансформатора. Вирішення цієї проблеми можливе за допомогою формули Монтзінгера [7].

Модифікована формула Монтзінгера [10] для розрахунку відносного зносу ізоляції з інтервалом часу $(t_0, t_0 + T)$ має такий вигляд:

$$L(t_0, t_0 + T) = \int_{t_0}^{t_0 + T} V(\theta_h, K_w, K_a, K_{O_2}) \cdot dt \quad (1)$$

де: V – швидкість відносного зносу ізоляції, в.о.; θ_h – температура найбільше нагрітої точки обмотки, °С; K_w, K_a, K_{O_2} – коефіцієнти впливу вологи, розчинених кислот та кисню відповідно, в.о.

З урахуванням впливу розглянутих експлуатаційних чинників, швидкість відносного зносу ізоляції:

$$V = \left(\frac{C_w}{C_{w.b}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_a}{C_{a.b}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.b}} \right)^\gamma \cdot 2^{\frac{\theta_h - 98}{6}} \quad (2)$$

де: C_w, C_a, C_{O_2} – вміст вологи твердої ізоляції, кислот та кисню в маслі відповідно, г/т; $C_{w.b}, C_{a.b}, C_{O_2.b}$ – базові значення вмісту вологи у твердій ізоляції, вміст кислот та кисню в маслі відповідно, г/т; α, β, γ – показники які визначені в роботі [7].

Ще одною із причин, що суттєво знижує надійність трансформаторів, є дефекти конструкції і виготовлення силових трансформаторів, а також недоліки експлуатації і ремонту [11], які наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Недоліки експлуатації і ремонту силових трансформаторів

Причина відмов	Частка відмов силових трансформаторів, %
Зміна властивостей матеріалів (старіння)	21,6
Дефекти конструкції і виготовлення	19,4
Недоліки експлуатації	16,8
Сторонні дії	10,3
Неочікувані режими в мережі	5,8
Дефекти ремонту	4,2
Кліматичні і зовнішні дії	3,5
Інші явища	18,4

Як бачимо у табл. 3, 21 % ушкоджень вносить низький рівень їх експлуатації і ремонту, тобто практично стільки ж, скільки обумовлено природним старінням ізоляції. У процесі дослідження технологічних відмов маслонаповненого електротехнічного устаткування виявляється, що практично в кожному випадку існує наявність серйозних недоліків під час його експлуатації, а це 16,8 та 18,4% причин відмов, які на цей час ще не вивчено. Аналіз експлуатаційної документації виявив, що 21% устаткування, яке здебільше випадків вийшло з ладу, експлуатувалося з характеристиками масла та ізоляції, що мали неприпустимі відхилення від нормативних значень. Це ще раз підтверджує необхідність своєчасного виявлення стану трансформаторного масла та підвищення його якості, діагностування та технічного обслуговування і ремонту силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Надійна робота електроустаткування ТП – один з основних чинників, що визначають стабільне тягове електропостачання залізниць. Однак основною проблемою трансформаторного парку ТП є – експлуатація значної кількості трансформаторів, які вже відпрацювали свій нормативний термін служби (79 % від загальної кількості тягових трансформаторів ТП працюють з терміном служби понад 25 років).

1. За допомогою принципу Парето виявлено основні складові частини обладнання та дефекти виходу з ладу силових трансформаторів ТП. Встановлено, що на 37% складових частин обладнання та видів дефектів трансформаторів припадає 80% пошкоджень, це – пошкодження системи охолодження, виділення газів в масло, забруднення масла та як результат цих процесів – старіння трансформаторного масла.

2. Визначено, основні показники діагностування паперово-масляної ізоляції силових трансформаторів. Широкий спектр даних показників указує на складність об'єктивної і достовірної оцінки фактичного стану трансформатора.

3. Визначено методи комплексної діагностики силових трансформаторів ТП. Перевага надана методам діагностування, які дають можливість організувати контроль електроустаткування без його відключення (під робочою напругою).

4. Запропоновано методику проведення розрахунку зносу ізоляції за допомогою формули Монтзінгера, яка дозволяє використовувати числові значення при інтегруванні однієї із чотирьох складових старіння масла, це підвищення температури, зволоження ізоляції, окислення масла та зростання концентрації кисню, розчиненого в маслі трансформатора.

5. Виявлено низький рівень експлуатації і ремонту тягових трансформаторів, тобто практично стільки ж, скільки обумовлено старінням ізоляції – 21,6 %. Це вказує на необхідність підвищення рівня якості та ефективності діагностування, експлуатації, технічного обслуговування і ремонту силових трансформаторів ТП електрифікованих залізниць, і відповідно розробки сучасної системи діагностування та моніторингу стану силових трансформаторів. За допомогою цієї системи можна вирішувати такі проблеми:

- розробка критеріїв, схем, методів і засобів діагностики силових трансформаторів;
- впровадження прогресивних фізико-хімічних методів оцінки для своєчасного виявлення стану трансформаторного масла;
- підвищення рівня якості й ефективності експлуатації, діагностування та технічного обслуговування і ремонту силових трансформаторів тягових підстанцій
- розроблення системи забезпечення лабораторій уніфікованою вимірювальною апаратурою і методиками виміру та контролю якості вимірів;
- створення нормативно-технічної документації (методичні вказівки, методичні рекомендації, керівні документи, тощо) з метою використання сучасних досягнень науки та техніки з технічного обслуговування та ремонту маслонаповненого силового обладнання ТП електрифікованих залізниць;
- перехід на технічне обслуговування та ремонт трансформаторів ТП за фактичним станом.

Список літератури

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2011 році [Текст] / - К.: Видавництво ТОВ «ВД «Мануфактура», 2012. - 244 с.
2. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць [Текст] / - К.; ТОВ «Інпрес», 2008. - 125 с.
3. Долин, А. П. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов [Текст] / А. П. Долин, Н. Ф. Першина, В. В. Смекалов // Электрические станции. - 2000. - № 6. С. 46-52.
4. Алексеев, Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов [Текст] / Б. А. Алексеев // - М.; : Издательство «НЦ ЭНАС», 2002. – 214 с.
5. Николаева, Э. К. Семь инструментов качества в японской экономике [Текст] / Э. К. Николаева // - М.; - Издательство стандартов, 1990. - 45 с.
6. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110...500 кВ в эксплуатации [Текст] / Б. В. Ванин и др. // Электрические станции. – 2001. - № 9 - С. 53-58.
7. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина // - М.; Энергоиздат, 2004. - 616 с.
8. Черножуков, Н. И., Крейн С. Э. Окисляемость минеральных масел [Текст] / Н. И. Черножуков, С. Э. Крейн // - М.; - Гостоптехиздат, 1959. - 370 с.
9. Гарифуллин, М.Ш. Прибор для спектральных исследований масел в диапазоне 600-1100 нм [Текст] / М. Ш. Гарифуллин, В.К. Козлов // Известия Вузов. Проблемы энергетики. -2001. - № 9-10.- С. 114-116.
10. Конограй, С. П. Применение модели старения твердой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации [Текст] / С. П. Конограй // Електротехніка і електромеханіка. - 2010. - № 1. - С. 43-45.
11. Бузаев, В. В. О необходимости единой системы физико-химической диагностики изоляции оборудования трансформаторных подстанций [Текст] / В. В. Бузаев и др.// ОАО "ВНИИЭ" — ОАО "ФСК ЕЭС" Энергетик. – 2004. - №11. - С 9 – 12.

Рекомендовано до друку: к-том техн.- наук, доц. Остапчуком О.В.