

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Вступ

Надійна робота електроустаткування підстанцій є одним з основних чинників, що визначають стабільне тягове електропостачання залізниць. Силові 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 тягових підстанцій працюють 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 наступні 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, в даний час абсолютно точних і однозначних відповідей на ці питання майже не існує. Це обумовлено, перш за все, відсутністю достовірних вихідних даних і складністю їх здобуття в реальних умовах експлуатації.

Постановка проблеми досліджень

Згідно додатку 2 «Інструкції з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць» (ЦЕ-0024), термін служби трансформатора складає не менше 25 років, при цьому через 12 років необхідно виконувати капітальний ремонт [2]. На цей час з 422 понижувальних та тягових трансформаторів напругою 110-220 кВ знаходиться в експлуатації 337 трансформаторів зі строком служби понад 25 років, що складає 79% від загальної кількості понижувальних та тягових трансформаторів. При наявності трансформаторів з терміном експлуатації понад 25 років, службами електропостачання Південної залізниці (48 трансформаторів - 70%), Південно-Західної залізниці (43 трансформаторів - 60%), Одеської залізниці (37 трансформаторів - 59%) у 2011 році роботи з ремонту і заміни навіть не планувались. В 2012 році проведено капітальний ремонт 11 тягових трансформаторів [1].

Як бачимо досвід експлуатації силових трансформаторів показує, що і після нормативного терміну служби значна частина трансформаторів зберігає свою працездатність при дотриманні допустимих навантажувальних режимів, своєчасному проведенні випробувань, діагностування, технічного обслуговування ремонтів 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 та вентилятори системи охолодження, тощо;
- друга складова ресурсу, 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 таблиці 1.

Однак, така велика кількість виявлених дефектів трансформаторів, які наведені у таблиці 1, ускладнює можливість якісно оцінювати та прогнозувати стан обладнання. Для вирішення цієї проблеми є множина сучасних методів. У цьому напрямі японські вчені, в період становлення науки про якість, віді-

брали 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 семи методів є діаграма Парето, принцип якої заснований на відокремленні важливих факторів від малозначущих і несуттєвих та дозволяє сфокусувати зусилля і ресурси на усунення найбільш значимих проблем.

Таблиця 1.

Основні дефекти силових трансформаторів

Обладнання та вид дефекту	Кількість випадків	Частка, %
1	2	3
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 по ущільненням 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 управління 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 роз'єму	4	0,6
Порушення герметичності	4	0,6

Діаграма Парето, яка побудована на підставі даних таблиці 1, представлена на рис.1.

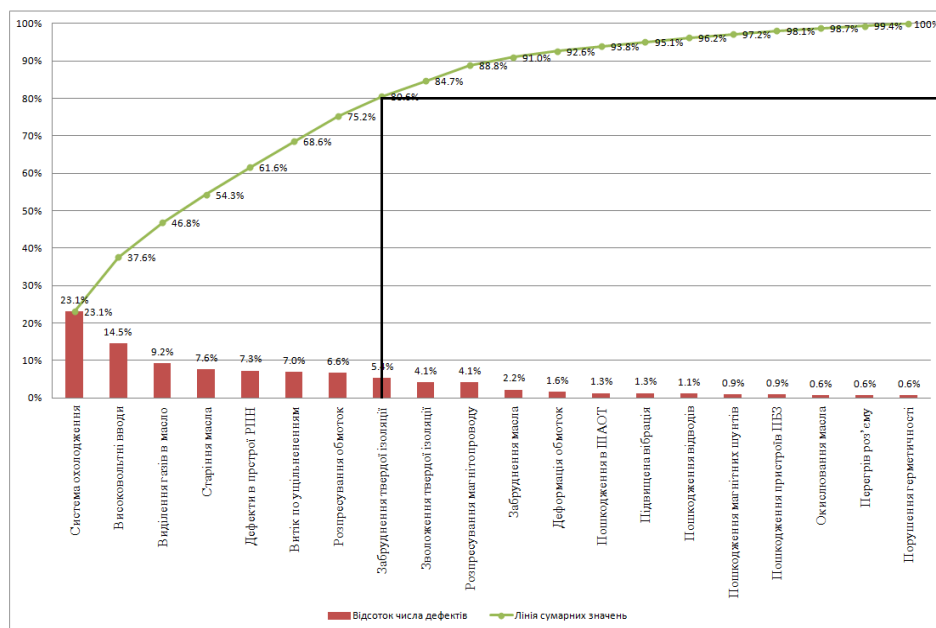


Рис. 1. Визначення основного обладнання та дефектів виходу з ладу трансформаторів

Побудована діаграма показує, що на 37% обладнання та видів дефектів трансформаторів доводиться 80% пошкоджень. З цих дефектів виділимо основні (на які доводиться 80% пошкоджень), це: пошко-

дження системи охолодження, виділення газів в масло, витік масла по ущільненням, забруднення масла, та, як результат цих процесів – старіння трансформаторного масла.

Виклад основного матеріалу досліджень

Світовий досвід [6] показує, що аналіз масла є основним методом при діагностиці технічного стану наступного машинного устаткування: насоси, компресори, двигуни внутрішнього згорання, редуктори, трансформатори і інші. У Україні, Росії і та інших державах СНД цей метод технічної діагностики не має значущої історії. На цей час даний метод у світовій практиці вважається досить ефективним, оскільки дефекти трансформаторів, що виявляються при аналізі масла, підтверджуються в 95% випадків при розборі маслonaповненого обладнання. Також слід зазначити, що стан і робочий ресурс обладнання більш ніж на 60-70% залежить від стану масла. Таким чином, аналіз масла дозволяє отримати достовірну інформацію про технічний стан маслonaповненого обладнання.

Крім того даний метод характеризується наступними перевагами:

- не вимагається припинення експлуатації обладнання;
- не потрібне розбирання обладнання;
- виявлення несправностей обладнання на самій ранній стадії виникнення;
- можливість заміни масла по його фактичному стану, а не за часом використання;
- невисокі економічні затрати на проведення діагностування і аналізу результатів.

У результаті старіння трансформаторного масла [7, 8] погіршуються його електроізоляційні властивості, відбувається накопичення осаду 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 приводять до того, що всі властивості масла погіршуються: збільшуються кислотне число, зольність, температура спалаху, в'язкість, ізоляційні властивості (пробивна напруга та $\text{tg}\delta$). Вищерозглянуті причини процесу старіння паперово - масляної ізоляції силових трансформаторів дозволяють виявити основні показники діагностування ізоляції (рис.2.).

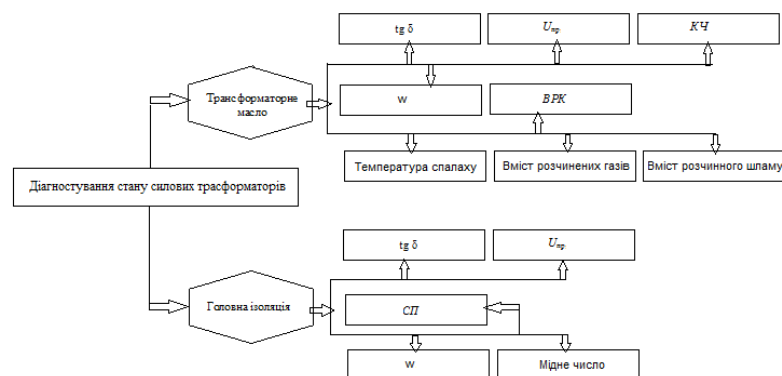


Рис. 2. Класифікація показників діагностування паперово - масляної ізоляції силових трансформаторів
 Де: $\text{tg}\delta$ - тангенс кута діелектричних втрат; $U_{\text{пр}}$ - пробивна напруга; $КЧ$ - кислотне число; W - вологовміст; $СП$ - ступінь полімеризації; $ВРК$ - водорозчинні кислоти.

Як бачимо, широкий спектр показників діагностування стану силових трансформаторів, вказує на складність об'єктивної і достовірної оцінки представлених показників. 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 лаборантів, що мають допуск до роботи з небезпечними хімічними реактивами. В цих умовах, на наш погляд, основним напрямом зменшення використання даних реактивів є використання нових підходів і сучасних методів діагностування та застосування 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 довжини хвиль, що випромінюються обладнанням, залежать 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 масла наповненого обладнання.

Ряд промислових компаній вже перейшли на сучасні портативні прилади, які працюють по тих же принципах, 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 в 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 мінілабораторії "Oil Analyzer" представлено на рис. 3.

Особливо привабливо цей метод виглядає у виконанні переносного ІЧ аналізатора 1100, пропонованого даною компанією. Зовнішній вигляд ІЧ аналізатора 1100 представлено 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 вміст води, загальне лужне число, загальне кислотне число, зміст 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 найбільш критичні властивості масла за 2 хвилини. Як правило, в комплекті з переносним ІЧ - аналізатором 1100 слід застосовувати портативний віскозиметр 3050, який дозволить визначити кінематичну в'язкість масла (одного з основних показників масла) також на робочому місці, і, таким чином, мати повне уявлення про стан масла. У таблиці 2 наведено порівняння традиційної системи аналізу масла та сучасних методів.

Таблиця 2.

Порівняння традиційної системи аналізу масла та сучасних методів

Основні речовини, засоби та напрями аналізу	Традиційна система аналізу масла	Портативна міні лабораторія BALTECH
Небезпечні реактиви	<ol style="list-style-type: none"> Небезпечні реактиви: <ul style="list-style-type: none"> гідрид кальцію розчинник для екстракції газів ортофосфорна кислота Розчинник Стодарта Вимагається система очищення від використаних реактивів і матеріалів Значна вартість реактивів і матеріалів необхідних для аналізу 	<ol style="list-style-type: none"> Немає небезпечних реактивів Немає вибухонебезпечних речовин Немає хімічних реактивів Немає очисників Немає доставки Мінімальні витрати - тільки на піпетки і серветки
Безпека	<ol style="list-style-type: none"> Вплив на працівника Багато заходів безпеки слід прийняти перед тим, як фахівці почнуть працювати з застосуванням небезпечних реактивів 	<ol style="list-style-type: none"> Немає впливу на працівника Оператор може брати зразки безпосередньо з джерела, щоб зменшити потік забруднень
Навчання	<ol style="list-style-type: none"> Тільки атестований фахівець Навчання транспортуванню, зберіганню, роботі і утилізації небезпечних реактивів Навчання аналізу води в масла, загальному кислотному числу 	<ol style="list-style-type: none"> Вимагається мінімальне навчання Не вимагається 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 і є новим кроком до переведення устаткування на обслуговування за фактичним станом. За допомогою цього підходу можна знизити вартість витрат і зменшити потребу в персоналі, що проводить аналіз масла на 25%, а вартість аналізу масла може зменшитися на 75% за рахунок обмеження купівлі, транспортування і утилізації небезпечних реактивів [9].

Розглянута концепція діагностування, в основу якої покладено фізико-хімічне обстеження 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 по основним факторам 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, для інтервалу часу $(t_0, t_0 + T)$, має вигляд:

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

Де: V - швидкість відносного зносу ізоляції, в.о.; θ_h - температура найбільше нагрітої точки обмотки, $^{\circ}\text{C}$; K_w, K_a, K_{O_2} - коефіцієнти впливу вологи, розчинених кислот та кисню відповідно, в.о.

При цьому швидкість відносного зносу ізоляції з урахуванням впливу розглянутих експлуатаційних чинників матиме наступний вигляд:

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

Де: C_w, C_a, C_{O_2} - зміст вологості твердої ізоляції, зміст кислот та кисню в маслі відповідно, г/т; $C_{w.b}, C_{a.b}, C_{O_2.b}$ - базові значення змісту вологі твердої ізоляції, змісту кислот та кисню в маслі відповідно, г/т; α, β, γ - показники які визначені в [7]; θ_h - температура найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора, $^{\circ}\text{C}$.

Ще одним з напрямів, який суттєво знижує надійність трансформаторів, є дефекти конструкції і виготовлення силових трансформаторів, а також недоліки експлуатації і ремонту [11], які наведені у таблиці 3.

Таблиця 3.

Недоліки експлуатації і ремонту силових трансформаторів

Причина відмов	Доля відмов трансформаторів (%)
Зміни властивостей матеріалів - (старіння)	21,6
Дефекти конструкції і виготовлення	19,4
Недоліки експлуатації	16,8
Сторонні дії	10,3
Нерозрахункові режими в мережі	5,8
Дефекти ремонту	4,2
Кліматичні і зовнішні дії	3,5
Інші причини	18,4

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

Висновки і перспективи подальших досліджень

Надійна робота електроустаткування ТП є одним з основних чинників, що визначають стабільне тягове електропостачання залізниць. Однак, основною проблемою експлуатації 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. Визначено, що на 37% складових частин обладнання та видів дефектів трансформаторів доводиться 80% пошкоджень, це - пошкодження системи охолодження, виділення газів в масло, забруднення масла та як результат цих процесів – старіння трансформаторного масла.

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

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

4. Запропоновано проведення розрахунку зносу ізоляції за допомогою формули Монтзінгера при інтегруванні чисельних значень множення 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, скільки обумовлено старінням ізоляції - 21,6 %. Це вказує на необхідність підвищення якості і ефективності діагностування, експлуатації, технічного обслуговування і ремонту силових трансформаторів ТП електрифікованих залізниць.

Проведене дослідження вказує на необхідність розробки сучасної системи діагностування та моніторингу стану силових трансформаторів ТП дистанцій електропостачання електрифікованих залізниць України. За допомогою цієї системи можна вирішувати наступні проблеми:

- розробка критеріїв, схем, методів і засобів діагностики силових трансформаторів;
- впровадження прогресивних фізико-хімічних методів оцінки для своєчасного виявлення стану трансформаторного масла;
- підвищення якості і ефективності експлуатації, діагностування та технічного обслуговування і ремонту силових трансформаторів тягових підстанцій
- створення системи забезпечення лабораторій уніфікованою вимірною 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 ремонту 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 повреждении 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 // Электротехніка 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.