

УДК 621.315.615:621.319.4

Малюшевська А. П.¹, Дмитрішин О. Я.², Топоров С. О.³¹Канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна, E-mail: dphc@ijpt.com.ua²Молодший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна³Провідний інженер Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА Т-1500 В ПЛІВКОВИХ ІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Обрано критеріальні параметри, що дозволяють достовірно оцінювати термостабільність експлуатаційних властивостей діелектричних рідин. Проаналізовано зміну експлуатаційних властивостей трансформаторного масла Т-1500 в ході його взаємодії з пропіленою і поліетилентерефталатними плівками під впливом підвищеної температури. Виявлено вплив морфологічних особливостей поверхні поліпропіленої плівки на термостабільність плівкового просоченого діелектрика, а також низький ступінь термостимульованої взаємодії поліетилентерефталатної плівки з трансформаторним маслом Т-1500.

Ключові слова: плівковий просочений діелектрик, електроізоляційні рідини, старіння діелектрика, термостабільність

ВСТУП

У високовольтній техніці особлива увага приділяється стану внутрішньої ізоляції, яка підпадає під вплив різних факторів, що змінює, в кінцевому підсумку, її електрофізичні властивості. Внутрішня ізоляція, як правило, є комбінацією різних діелектриків (рідких і твердих, газоподібних і твердих). Неминучим для внутрішньої ізоляції електроустаткування є старіння, яке у практичному аспекті електротехніки являє собою погіршення електричних характеристик у процесі експлуатації. Розрізняють три основні форми старіння діелектриків – іонізаційну, теплову, електрохімічну. Загальновідомим є той факт, що при будь-яких формах старіння найбільш слабкою ланкою є просочуюча рідина [1].

Діелектрики, які використовуються для виготовлення внутрішньої ізоляції високовольтного устаткування, повинні мати комплекс високих електричних, теплофізичних і механічних властивостей та забезпечувати необхідний рівень електричної міцності, а також необхідні теплові й механічні характеристики ізоляційної конструкції при розмірах, яким відповідають високі техніко-економічні показники всієї установки в цілому. Тривала практика створення й експлуатації високовольтного устаткування показує, що у багатьох випадках весь комплекс вимог щонайкраще задовольняється при використанні в складі внутрішньої ізоляції комбінації з декількох матеріалів, що доповнюють один одного й виконують дещо різні функції.

Проведені в ШПТ НАН України дослідження [2] показали, що підвищення питомих енергетичних характеристик, ресурсу і частоти проходження зарядів-розрядів високовольтних імпульсних конденсаторів може бути досягнуто при застосуванні в якості робочого діелектрика секцій конденсаторів комбінованої поліпропіленово-поліетилентерефталатної плівкової ізоляції, просоченої не-

полярною рідиною з низьким тангенсом кута діелектричних втрат. Використання плівкового діелектрика дозволяє створювати конденсатори з більш високими питомими характеристиками й низькими діелектричними втратами в порівнянні з конденсаторами на основі паперово-плівкового діелектрика.

Однак, спроба дослідити процес старіння поліпропіленово-поліетилентерефталатної діелектричної системи, що просочена неполярною органічною рідиною (трансформаторним маслом марки Т-1500 ГОСТ 982-80), в цілому, без розділення компонентів системи, дозволило одержати тільки вельми суперечливі дані в частині зміння електрофізичних характеристик секцій із вказаною діелектричною системою. У той же час дослідження проб трансформаторного масла з макетів конденсаторів з такими секціями, що пройшли ресурсні випробування, показало значне збільшення тангенса кута діелектричних втрат у порівнянні з початковим станом. Таким чином, стає очевидною необхідність вивчення особливостей процесів, що розвиваються саме в сучасних просочуючих рідинах для конденсаторів.

Метою цих досліджень є вивчення термостабільності експлуатаційних властивостей трансформаторного масла Т-1500, що використовується в поліпропіленово-поліетилентерефталатних діелектричних системах високовольтних імпульсних конденсаторів. При цьому необхідно брати до уваги, що за умов відсутності початкових часткових розрядів основною причиною зниження працездатності просоченої плівкової ізоляції є процеси, які пов'язані з термоокисною деструкцією самої рідини й термостимульованою взаємодією компонентів діелектричної композиції. При вивченні факторів, що впливають на працездатність рідких електроізоляційних компонентів діелектричної системи високовольтних імпульсних конденсаторів із просоченням неполярними рідина-

ми під впливом підвищеної температури, доцільно приділити увагу саме тепловому впливу, а в якості критеріальних вибирати параметри, найбільш чутливі до розвитку руйнуючих термостимульованих процесів.

Конденсаторні просочуючі рідини є надзвичайно важливим і у той же час досить проблемним компонентом діелектричної системи. До них пред'являються досить жорсткі вимоги, такі як: високі питомий об'ємний опір і діелектрична проникність; малий тангенс кута діелектричних втрат; мала в'язкість у робочому діапазоні температур; висока стабільність електричних характеристик; стійкість до впливу електричних і теплових полів конденсатора; хімічна стійкість; сумісність із компонентами діелектричної системи й конструктивних матеріалів; мала випаровуваність; висока температура кипіння; нетоксичність; негорючість; екологічність [1].

Методика досліджень. Велику кількість досліджень присвячено вивченню властивостей низки нафтових масел і, зокрема, трансформаторного масла через широке його застосування в електротехнічних пристроях (трансформаторах, конденсаторах, кабелях, високовольтних вводах, вимикачах тощо). Відомо, що нафтові масла взагалі і трансформаторні зокрема являють собою складну суміш вуглеводнів парафінового, нафтового, ароматичного ряду з невеликою (до 1%) домішкою інших компонентів, що містять атоми сірки, кисню, азоту. Ароматичні вуглеводні є необхідною складовою частиною нафтових електроізоляційних масел.

Кількісний і структурний склад багато в чому визначає фізико-хімічні та електричні характеристики масел. Для трансформаторного масла марки Т-1500, яке досить часто використовується в ШПТ НАН України для просочення високовольтних імпульсних конденсаторів, характерне наступне співвідношення числа вуглецевих атомів в ароматичній, нафтовій і парафіновій структурах: відповідно 12,5; 39,8; 47,7%, розраховуючи на 100 вуглецевих атомів.

Негативним наслідком взаємодії компонентів просоченого полімерного плівкового діелектрика є зростання діелектричних втрат провідності просочуючої рідини за рахунок десорбції із плівки (разом із аморфною складовою полімеру) іонів (Al, Cu, Fe, Cl, Cr), іоногенних домішок, технологічних забруднень і продуктів старіння полімеру [3, 4]. Поява продуктів розкладання самої рідини й руйнування плівки незмінно буде впливати на експлуатаційні властивості рідини, зокрема електрофізичні. Тому необхідно контролювати такі характеристики електроізоляційних рідин, як тангенс кута діелектричних втрат, діелектрична проникність, питомий об'ємний електричний опір, короточасна електрична міцність.

При дослідженні впливу полімерної плівки на діелектричні втрати просочуючої рідини – трансформаторного масла марки Т-1500 дотримувались наступного співвідношення компонентів: 15 мас. частин рідини на 1 мас. частину полімерної плівки. Використовувалися двостороннє шорстка поліпропіленова плівка TERVAKOSKI

FILM марки RER товщиною 10 мкм, гладка поліпропіленова плівка ТУ 619-057-65-87 товщиною 10 мкм і гладка поліетилентерефталатна плівка ПЭТ-КЭ ГОСТ 24234-80 товщиною 15 мкм. Зразки плівок являли собою стрічки шириною 80 мм і довжиною, що відповідала вищенаведеному масовому співвідношенню рідина – плівка. Зразки плівок попередньо висушувалися при температурі 80°C протягом двох годин і поміщалися у скляні ємності. Потім плівки заливалися попередньо відфільтрованим, висушеним і дегазованим трансформаторним маслом марки Т-1500, після чого ємності встановлювалися в термостат. Крім того, температурному впливу піддавалися зразки трансформаторного масла без полімерної плівки. Температура старіння зразків рідини (з плівками й без них) витримувалась постійною – 100°C. Загальний час старіння модельних зразків становив 300 год, кожні 50 год проводилися виміри тангенса кута діелектричних втрат, діелектричної проникності, питомого об'ємного електричного опору. Температура, при якій здійснювали виміри електрофізичних характеристик, була постійною – 100°C (за винятком вимірювань короточасної електричної міцності, для якого була обрана температура вимірювань 18–20°C).

Для кількісної оцінки ступеня впливу полімеру на діелектричні втрати трансформаторного масла використовувався коефіцієнт дестабілізації (D) [5]. Для зразків рідини, зістареної без плівки, цей коефіцієнт представляє собою відношення тангенса кута діелектричних втрат рідкого діелектрика після його термостаріння до $\text{tg}\delta$ похідної рідини, тобто коефіцієнт D в даному випадку ілюструє вплив термоокисної деструкції рідини на діелектричні втрати. Для решти зразків коефіцієнт дестабілізації є відношенням тангенса кута діелектричних втрат рідини, зістареної в контакт з полімерними плівками, до $\text{tg}\delta$ рідини після її термостаріння в ідентичних умовах без плівки, тобто він ілюструє ступінь впливу термоокисної деструкції та взаємодії рідини з полімером на її діелектричні властивості.

Для діагностики стану електроізоляційних просочуючих рідин, крім традиційних методів виміру їх електрофізичних властивостей все частіше використовують методи, що базуються на вивченні оптичних властивостей рідких середовищ [6, 7]. Є доцільним використання методу оцінки термостабільності плівкового просоченого діелектрика, заснованого на аналізі кінетики оптичних властивостей просочуючого складу при термостарінні в контакт з полімерною плівкою. За додатковий критеріальний параметр, що відображає оптичні властивості просочуючої рідини, було обрано відносну характеристику, а саме – коефіцієнт відносного світлопропускання, що ілюструє зміну стану рідкого середовища з появою в ній дрібнодисперсних часток (макромолекул і фрагментів полімеру). Величина відносного світлопропускання досліджуваних рідких діелектриків визначалася за допомогою колориметра фотоелектричного концентраційного КФК-2. Суть виміру полягає в порівнянні світлопропус-

кання еталонної (вихідної) проби рідини й досліджуваного зразка, попередньо підданого зовнішньому впливу. Вимірювання відносного світлопропускання трансформаторного масла Т-1500 проводилось також кожні 50 год протягом 300 годин термостаріння модельних зразків. Попередньо експериментально було встановлено температуру вимірювання, яка виключала утворення супернатанта, та довжину хвилі випромінювання, чутливу до появи розчиненого полімеру в трансформаторному маслі Т-1500.

Результати і обговорення. Термостаріння протягом 300 год не виявило помітного впливу на діелектричну проникність і питомий об'ємний електричний опір трансформаторного масла – $\epsilon_{\text{сп}} = 2,22 \pm 0,05$, $\rho_{\text{всп}} = (1,19 \pm 0,02) \cdot 10^{10}$ Ом·м, причому не було виявлено чітких закономірностей змін цих параметрів. Такі коливання електрофізичних характеристик не можуть бути прийняті за критеріальні для оцінювання ступеня взаємодії рідкого й твердого діелектриків та рівня термостабільності електроізоляційної рідини.

Експериментальні дані, які отримано при термостарінні трансформаторного масла Т-1500 у складі модельних зразків плівкових просочених діелектричних систем, наведено на рис. 1, де прийнято такі умовні позначення: модельний зразок твердої ізоляції, що складається із шорсткої поліпропіленової плівки – ПП, з поліетилентерефталатної – ПЕТ, модельний зразок, що складається з гладкої поліпропіленової плівки – ПП*. Видно (рис.1, а), що якщо для рідини без плівок вплив термоокисної деструкції на діелектричні властивості є монотонно зростаючим, то для зразків рідини, що зазнали старіння в контакт з полімерними плівками, зміна коефіцієнта дестабілізації носить більш складний характер (рис. 1, б). В той час, як взаємодія із гладкою поліпропіленовою плівкою помітно позначається на стабільності рідини тільки після 100 год нагріву, речовини, що переходять у рідину з поверхні та із об'єму шорсткої поліпропіленової плівки, починають суттєво впливати на її термостабільність відразу після початку нагрівання. Наявність поліетилентерефталатної плівки в рідині починає помітно позначатися після 150 год нагріву.

Зростання коефіцієнта дестабілізації в процесі термостаріння модельних зразків системи рідина – полімерна плівка свідчить про десорбцію з полімерного матеріалу іонів металів та іоногенних домішок, що має місце при розчиненні аморфних мікрооб'ємів полімеру. Процес тим інтенсивніше (D тим більше), чим вище вміст аморфної складової й нижче ступінь чистоти плівки. Задовільна термостабільність по параметру D зазначається для модельних зразків на основі гладкої поліпропіленової плівки у порівнянні із шорсткою. У випадку використання гладкої плівки D дорівнює 1 аж до 100 год термостаріння в середовищі трансформаторного масла, тобто за даним параметром взаємодія плівки й рідини не фіксується. Зазначений факт може трактуватися неоднозначно, оскільки D не змінюється й у випадку взаємодії з плівками підвищеної чистоти. Однак, після 100 год нагріву D для такої плівки різко зростає, в той час як для шорсткої поліпропіленової й поліетилентерефталатної плівок зростання коефіцієнта дестабілізації носить більш монотонний характер, причому впродовж 150–250 год нагріву для цих плівок відзначалася стабілізація коефіцієнта D на рівні 1,3 і 1,2 відповідно. Після 250 год термостимульованої взаємодії трансформаторного масла й плівок коефіцієнт дестабілізації для всіх зразків, що містять поліпропілен, знову різко зростає. Можливо, на цьому етапі починається процес переходу макромолекул поліпропілену в рідину.

З метою вивчення впливу термодії на експлуатаційні властивості рідкого діелектрика й стабільність його електрофізичних характеристик проводилося визначення короткочасної електричної міцності трансформаторного масла Т-1500 в ході його термостаріння (без полімерних плівок). Зниження короткочасної електричної міцності ($E_{\text{пр}}$) трансформаторного масла може бути пояснено появою в ньому продуктів термоокисної деструкції, але підтвердження цієї гіпотези є науковим завданням для подальших досліджень.

Таким чином, дослідження тільки кінетики електрофізичних характеристик трансформаторного масла не дало достатньо достовірної інформації про його термостабільність і ступінь взаємодії з полімерними матеріалами діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів. Тобто вивчення додаткового критеріального параметра – відносного світлопропускання стало необхідним.

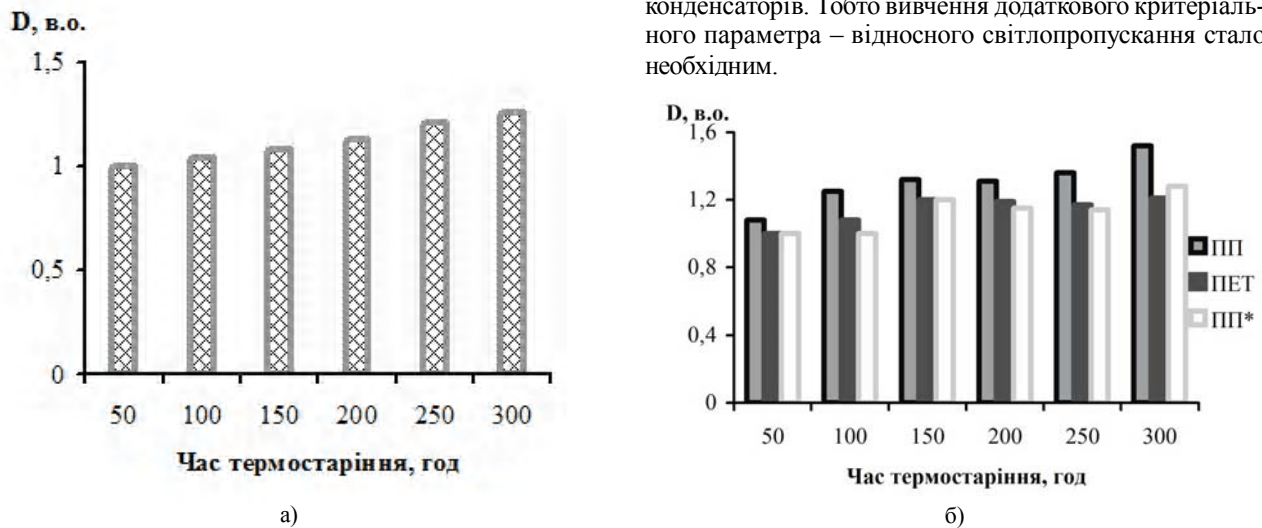


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта дестабілізації трансформаторного масла Т-1500 від часу старіння: а – без плівок; б – старіння в контакт з полімерними плівками.

Кінетика процесу розчинення полімерних плівок в трансформаторному маслі Т-1500 може бути описана залежністю K_{ec} трансформаторного масла Т-1500, що контактує з елементами плівкової твердої ізоляції, від часу дії підвищеної температури (рис. 2). На рис.2 прийнято наступні умовні позначення – модельні зразки твердої ізоляції, що склалися тільки з шорсткої поліпропіленової плівки – ПП; тільки з поліетилентерефталатної – ПЕТ; такі, що містили 43 мас. % поліетилентерефталатної та 57 мас. % поліпропіленової плівки – ПП+ПЕТ; тільки з гладкої поліпропіленової плівки – ПП*. Діаграма зміни K_{ec} трансформаторного масла Т-1500 наочно ілюструє поступове зниження світлопропускання рідини в порівнянні з трансформаторним маслом в початковому стані ($K_{ec}=100\%$).

Наведені дані свідчать про розчинення аморфної фази полімерів у рідкому діелектрику, тобто про перехід обмеженого набухання полімерної плівки в необмежену стадію і появу в електроізоляційній рідині макромолекул полімеру. Причому простежується тенденція до значно більш інтенсивної взаємодії компонентів просоченої ізоляції у разі використання поліпропіленової плівки в порівнянні з поліетилентерефталатною. Очевидно, що K_{ec} трансформаторного масла при термостарінні в контакт з обома плівками (поліетилентерефталатною й поліпропіленовою) знижується більш плавно, ніж у випадку використання тільки поліпропіленового компонента просоченої ізоляції. Інтерес викликають дані щодо зміни K_{ec} трансформаторного масла Т-1500, що зазнало термоста-

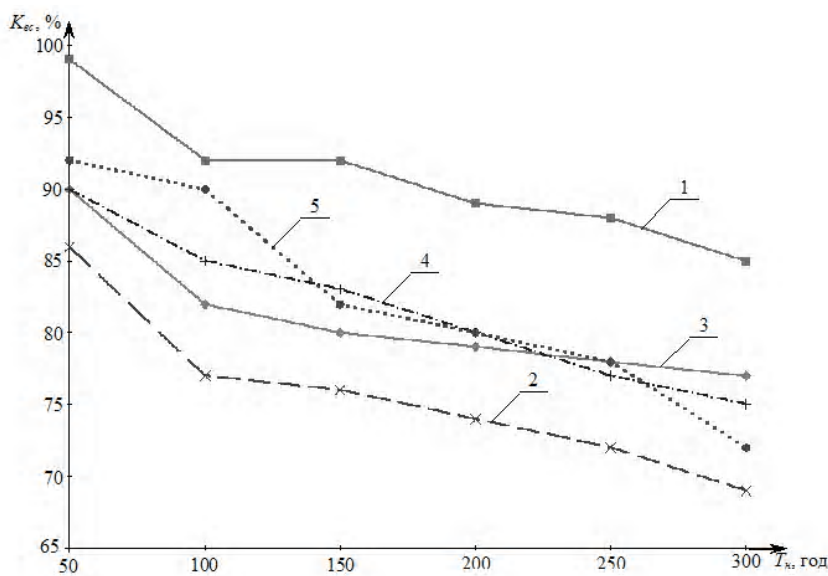
ріння в присутності гладкої поліпропіленової плівки в порівнянні з аналогічною шорсткою. Як показано на діаграмі, зниження коефіцієнта світлопропускання рідини, що контактує з гладкою плівкою, аж до 100 год термостаріння дуже незначне, його можна порівняти із зміною K_{ec} рідини, що зазнала термостаріння без плівок. Згодом (аж до 300 год термостаріння) K_{ec} для модельних зразків з гладкою поліпропіленовою плівкою зберігається стабільно вищим, ніж K_{ec} трансформаторного масла Т-1500, що зазнало впливу високої температури у присутності шорсткої поліпропіленової плівки. Отже, морфологія поверхні поліпропіленової плівки дуже впливає на процес розчинення плівки в електроізоляційній рідині. Наявність на поверхні мікрокапілярної системи (шорстка плівка) робить цей процес більш яскраво вираженим.

ВИСНОВКИ

Таким чином, обраний комплекс критеріальних параметрів – тангенса кута діелектричних втрат (коефіцієнта дестабілізації) та коефіцієнта відносного світлопропускання, дозволив достовірно оцінювати ступінь термостабільності трансформаторного масла Т-1500 як рідкого компонента поліпропіленово-поліетилентерефталатної просоченої діелектричної системи. Виявлено перевагу (за термостабільністю властивостей діелектрика «поліпропіленова плівка – трансформаторне масло марки Т-1500») гладкої плівки перед шорсткою та висока термостабільність діелектрика «поліетилентерефталатна плівка – трансформаторне масло Т-1500».

Таблиця 1 – Середні значення короткочасної електричної міцності трансформаторного масла Т-1500 в процесі термостаріння

Рідина	Вихідний стан		Після 150 год нагрівання		Після 300 год нагрівання	
	$E_{np\ ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	$K_{вар}$ %	$E_{np\ ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	$K_{вар}$ %	$E_{np\ ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	$K_{вар}$ %
Трансформаторне масло Т-1500	29,9±4,2	13	19,5±1,2	5	15,4±2,8	18



1 – без плівок; 2 – ПП; 3 – ПЕТ; 4 – ПЕТ+ПП; 5 – ПП*

Рисунок 2 – Залежність K_{ec} трансформаторного масла Т-1500, що контактує з елементами плівкової твердої ізоляції, від часу T_n дії підвищеної температури

Зниження коефіцієнта відносного світлопропускання ілюструє термостимульоване взаємне розчинення полімеру в рідині, наслідком якого і є погіршення електрофізичних характеристик компонентів просоченого плівкового діелектрика. Аналіз кінетики відносного світлопропускання просочуючих рідких середовищ може бути інформативним і практично корисним при порівняльних дослідженнях різних плівкових просочених діелектриків, а також для проведення експрес-діагностики стану плівкової просоченої ізоляції в ході ресурсних випробувань високовольтних імпульсних конденсаторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучинский Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.
2. Гребенников И. Ю. Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с плёночным диэлектриком от режимов эксплуатации / И. Ю. Гребенников, В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, И. Г. Михайлов, Л. И. Онищенко, Т. А. Фещук // Электротехника. – 2006. – №6. – С. 36–41.
3. Кучинский Г. С. Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными жидкостями [Текст] / Г. С. Кучинский, Л. Н. Галахова // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 33–39.
4. Zhuravleva N. M. Effect of modified surface structure of impregnated polypropylene film on capacitor properties during thermal ageing / N. M. Zhuravleva, A. M. Andreev, M. Evtic // Electrical Engineering. – 1998. – Vol. 81, № 4. – P. 271–274.
5. Журавлева Н. М. Стабилизация диэлектрических потерь конденсаторных пропитывающих синтетических жидкостей в процессе термостарения [Текст] / Н. М. Журавлева, А. М. Андреев, Л. Н. Галахова // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1991. – № 5. – С. 64–67.
6. Высокогорец С. П. Метод оценки эффективности восстановления ресурса трансформаторных масел в процессе работы силовых трансформаторов [Текст] / С. П. Высокогорец, А. П. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 59–65.
7. Львов М. Ю. Применение оптической мутности масла для оценки состояния высоковольтных герметичных вводов трансформаторов / М. Ю. Львов // Электрические станции. – 1999. – № 6. – С. 60–63.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2015

Після доробки 22.04.2015

Малюшевская А. П.¹, Дмитришин А. Я.², Топоров С. О.³

¹Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, и.о. заведующей отделом ИИПТ НАН Украины, E-mail: dphc@iippt.com.ua

²Младший научный сотрудник ИИПТ НАН Украины

³Ведущий инженер ИИПТ НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА T-1500 В ПЛЕНОЧНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Выбраны критериальные параметры, позволяющие достоверно оценивать термостабильность эксплуатационных свойств диэлектрических жидкостей. Проанализировано изменение эксплуатационных свойств трансформаторного масла T-1500 в ходе его взаимодействия с полипропиленовой и полиэтилентерефталатной пленками под влиянием повышенной температуры. Выявлено влияние морфологических особенностей поверхности полипропиленовой пленки на термостабильность пленочного пропитанного диэлектрика, а также низкую степень взаимодействия полиэтилентерефталатной пленки с трансформаторным маслом T-1500.

Ключевые слова: пленочный пропитанный диэлектрик, электроизоляционная жидкость, старение диэлектрика, термостабильность.

Malyushevskaya A. P.¹, Dmitrishin A. Ya.², Toporov S. O.³

¹Ph.D., associate professor, senior staff scientist of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

²Research assistant of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

³Senior engineer of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

RESEARCH OF INFLUENCE OF HEIGHTENED TEMPERATURES ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER OIL T-1500 IN FILM INSULATION SYSTEMS

The criteria parameters allowing to estimate authentically the thermostability of dielectric liquids' operational properties are chosen. Change of transformer oil's operational properties during its interaction with polypropylene and polyethylenetereftalate films under the influence of the heightened temperature is analysed. The influence of morphological features of polypropylene film's surface on the thermostability of the impregnated dielectric film is revealed. Low degree of the interaction between the polyethylenetereftalate film and transformer oil T-1500 is defined.

The reduction of the comparative light transmission coefficient illustrates the thermostimulated mutual dissolution in the system «polymer in the liquid». The consequent of this process is the degradation of the impregnated dielectric film components' electrical characteristics. Analysis of kinetics of impregnating liquid's light transmission can be informative and useful in comparative studies of various impregnated dielectric films, as well as for express diagnostics of impregnated film insulation during high-voltage pulse capacitors life tests.

Keywords: film impregnated dielectric, insulating liquid, dielectric aging, thermostability.