



Абрамов В. Б.,
Проценко О. Р.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ІЗОЛЯЦІЙНИХ РІДИН РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Представлено дані досліджень впливу рослинної сировини на характеристики рідин, що можуть використовуватись в якості діелектрика у високовольтному електрообладнанні. Увага приділена особливостям досягнення необхідної термоокисної стабільності таких рідин, відмінностям процесу старіння в них паперової ізоляції, можливостям діагностування дефектів обладнання на підставі контролю газоутворення. Зазначено, що використання різної рослинної сировини призводить до появи відмінностей у виготовленні та застосуванні рідин вказаного призначення.

Ключові слова: ізоляційні рідини рослинного походження, старіння, зволоження, газоутворення, діелектрики високовольтного електрообладнання.

1. Вступ

У якості рідкого діелектрика для високовольтного електрообладнання вже достатньо тривалий час використовується виготовлене із нафти мінеральне масло — ізоляційна олива. Вона має достатню кількість позитивних властивостей, але являє собою певну пожежну та екологічну небезпеку для довкілля. Серед інших ізоляційних рідин вигідно, в цьому відношенні, відрізняються рідини, виготовлені з рослинної сировини — ізоляційні рідини рослинного походження (ІРРП). Вони легко піддаються біорозкладу, тобто не містять небезпеки для екології, мають достатньо високі температури спалаху і займання, а ще, на відміну від ізоляційної оливи, виготовлюються із сировини, ресурси якої достатньо легко відновлюються.

Проте, у порівнянні з тією ж ізоляційною оливою, ІРРП дещо поступаються їй за деякими показниками електричної міцності, тепловідведення та тривалості експлуатації. Тому, наряду з практичним використанням ІРРП для високовольтного електрообладнання, не втрачена актуальність продовження досліджень та коригування характеристик цих рідин задля отримання кращої відповідності їх споживчим вимогам.

2. Об'єкт досліджень та його технологічний аудит

Об'єкт досліджень — ізоляційні рідини рослинного походження (ІРРП).

Характеристики ІРРП, як і будь-якого іншого рідкого діелектрика, залежать від складу хімічних сполук, що містяться в них і визначаються, в основному, первинною сировиною для їх отримання. Склад цих сполук, технологічні прийоми виготовлення ІРРП і коригування їх властивостей вплинуть на кінцеві споживчі характеристики, від яких будуть залежати не тільки конструкція та надійність тривалої роботи високовольтного

електрообладнання, але і можливість достовірного діагностування стану цього обладнання [1]. Тому, наряду з використанням вже існуючих комерційних ІРРП, продовжуються розробки та дослідження інших рідин такого ж природного походження та призначення.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є отримання висновків стосовно особливостей експлуатації високовольтного електрообладнання з ІРРП.

Задля досягнення цього для ряду рідин різного рослинного походження буде зроблено порівняння та аналіз результатів досліджень деяких основних споживчих характеристик, а саме:

- термоокислювальної стабільності з коригуванням її шляхом введення антиокислювальних присадок;
- взаємодії з целюлозною ізоляцією під час старіння;
- вологовмісту, як фактору впливу на надійність експлуатації ізоляції;
- газоутворення, особливості якого використовуються для діагностування електрообладнання з різними діелектриками.

4. Аналіз літературних даних

Ізоляційні рідини використовуються в багатьох видах високовольтного електрообладнання і виконують, як правило, дві основні функції: діелектрика та охолоджувача. Це призводить до того, що особливості характеристики тієї чи іншої ізоляційної рідини враховують під час конструювання вказаного обладнання — впливають на його конструкцію і габарити [1].

ІРРП, які є альтернативою ізоляційній оливі у високовольтному електрообладнанні, мають певні переваги у відношенні до інших рідин аналогічного призначення. Їм властиві відносно мала вартість, за умов якісного

технологічного оброблення — достатня електроізоляційна здатність, відповідність вимогам екологічної безпеки, вказана вище відновлюваність ресурсів сировини. Але відмінності від ізоляційної оливи, зокрема, менша імпульсна електрична міцність, більша в'язкість, менша термоокисна стабільність і ряд інших [2–4], спонукають до пошуку технологічних прийомів коригування цих показників. ІРПП можуть мати різне рослинне походження [5–8], а отже і різний склад хімічних сполук, що вплинуть на характеристики ІРПП [8–10]. Порівняння результатів досліджень характеристик різних ІРПП і будуть предметом розгляду в цій статті.

5. Матеріали та методи досліджень

В статті надаються результати досліджень рідин, виготовлених із різної рослинної сировини, що за значенням розглядаються, як рідкі діелектрики. Під час досліджень виявлялись особливості змін ряду характеристик цих рідин у разі їх старіння та контакту з іншими матеріалами (речовинами). Застосовані методи та отримані результати дані нижче.

6. Результати досліджень

6.1. Порівняння результатів дослідження старіння рідин рослинного походження. Відомо, що основою ІРПП є ефіри жирних кислот, але їх кількісний і якісний склад залежить від первинної сировини, з котрої вони отримуються. Стосовно сировинного походження, ІРПП може бути кукурудзяною, рисовою, соняшниковою, бавовняною, рапсовою, пальмовою тощо, тобто умовно віднесено до однієї (чи декількох) із придатних для виготовлення цієї ІРПП рослин, у т. ч. генномодифікованих. Склад основних хімічних сполук у таких рідинах відрізняється, що впливає на відмінності характеристик цих ІРПП [2, 11]. Відмінності будуть спостерігатись для цих рідин у вихідному стані і більш показово — після впливу на них експлуатаційних факторів (температури, кисню, терміну використання тощо).

Для прикладу в табл. 1 наведені вихідні значення ряду показників для двох комерційних ІРПП, що мають торгову марку і вже визнані придатними для використання в високовольтних силових трансформаторах, та трьох рідин рослинного походження (РРП), що на підставі досліджень та необхідних коригувань технології виготовлення можуть бути віднесеними до ІРПП.

В табл. 1 застосовані наступні позначення окремих рідин:

- «BIOTEMP» — марка комерційної ІРПП; основною сировиною для виготовлення є соняшник та соя; виробник — фірма АВВ;
- «Biovolt А» — марка комерційної ІРПП; основною сировиною для виготовлення є кукурудза; виробник — фірма Mineraltec;
- «VO-1» — умовне позначення досліджуваної РРП з сої [8];
- «VO-2» — умовне позначення досліджуваної РРП з рису [8];
- «VO-3» — умовне позначення досліджуваної РРП з соняшника [8].

Комерційні ІРПП задля забезпечення їх тривалої роботи без суттєвих змін показників містять антиокислювальні присадки (інгібітори), що вибираються на стадії розробки цих рідин. Підставою вибору слугують дослідження, де рідини піддають тому або іншому старінню з метою визначення їх термоокисної стабільності.

Під час старіння утворюється певна кількість продуктів, склад і вміст яких буде залежати від складу хімічних сполук вихідної РРП. Серед таких продуктів є ті, що за своїми фізико-хімічними властивостями можуть бути віднесені, зокрема, до кислот, до провідних і полярних утворень, до продуктів ущільнення. Охарактеризувати їх вміст можливо за показниками, котрі мають назву «кислотне число», «тангенс кута діелектричних втрат», «кінематична в'язкість». Саме ці показники використані в [8] для наведеного нижче дослідження впливу різних інгібіторів на термоокисну стабільність РРП.

Як результат старіння, досліджувались зміни названих показників для РРП «Biovolt А», «VO-1», «VO-2» і «VO-3» без додавання та із додаванням якогось із інгібіторів. Серед інших, за аналогією із [12], були використані інгібітори з наступними умовними позначеннями: «AD-2» (бутильований гідрокси-анізол); «AD-3» (бутильований гідрокси-толуол); «AD-4» (третичний бутил-гідрокси-хінон). Концентрація введення інгібітора — 0,3 % за масою. До ІРПП «Biovolt А» вказані інгібітори не додавались, оскільки вона вже містила свою, вибрану для неї присадку.

Термоокислювальна стабільність визначалась за двома процедурами:

1. Визначення індукційного періоду у разі дії температури 130 °С та витраті повітря 10 л/год.
2. Пришвидшене старіння у разі дії протягом 102 год. температури 95 °С та витраті кисню 1 л/год.

Таблиця 1

Показники якості ізоляційних рідин рослинного походження

Показник	Допустиме значення	Значення показників для окремих РРП				
		BIOTEMP	Biovolt A	VO-1	VO-2	VO-3
Кислотне число, мг КОН/г РРП	0,06, max	0,03	0,05	0,08	0,04	0,06
Питома вага, г/см ³	0,96, max	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92
Тангенс кута діелектричних втрат за 90 °С, %	3,6, max	1,92	3,32	2,81	1,95	5,97
Температура спалаху, (°С)	275, min	330	312	318	318	312
Температура займання, °С	300, min	360	346	352	357	350
Пробивна напруга, (кВ)	30, min	45	55	42	37	37
Кінематична в'язкість за 40 °С, сСт	50, max	45	36,1	33,1	32,4	37,5
Кінематична в'язкість за 100 °С, сСт	15, max	10	8,45	7,8	7,7	8,4
Температура застигання, °С	-10, max	-15	-21	-12	-15	-6

За першою процедурою отримані результати аналізувались у порівнянні до ІРПП «Biovolt А», для якої індукційний період мав прийнятне значення і становив майже 15 год. Цей показник для «VO-1», «VO-2» і «VO-3» без додавання присадок не перевищував 3,5 год., а додавання до них присадок «AD-2» і «AD-3» практично не змінювало величину названого періоду — він не перевищував 4,0 год. Тільки присадка «AD-4» дозволила отримати позитивний результат: для «VO-3» індукційний період досягнув 15 год., для «VO-1» — 13,5 год. і для «VO-2» — 13 год. Тобто, у порівнянні з іншими, ця присадка виявилась найбільш ефективною.

За другою процедурою, де старіння і оцінка його результатів виконувалась згідно із стандартом IEEE Std C57.147 [13], було підтверджено, що ІРПП «Biovolt А», після 102 год. старіння, повністю відповідала встановленим вимогам до значень контрольованих показників, а саме:

а) кислотне число не перевищувало 0,3 мг КОН/г РПП;

цедурою не повинно призвести до збільшення показника понад 10 % від початкового значення РПП, тобто для «VO-1» значення в'язкості не повинно бути більшим за 36,4 сСт, для «VO-2» — 35,6 сСт і для «VO-3» — 41,2 сСт;

— без додавання присадок всі РПП через 102 год. старіння не задовольняли вказаному критерію відповідності: збільшення значень показника понад 10 % для «VO-1» і «VO-3» сталося через 21 год., а для «VO-2» — через 30 год.;

— додавання присадки «AD-4», збільшило відповідний час для «VO-1» і «VO-3» до 69 год., а для «VO-2» — до 54 год., але він був меншим за 102 год.

Додатковим підтвердженням того, що вихідний склад хімічних сполук впливає на зміну значень контрольованих показників і потребує різних інгібіторів, є узагальнююча інформація, представлена в табл. 2, де за показниками кожна із РПП розташована в порядку від «кращої» до «гіршої».

Таблиця 2

Зміна значень показників для досліджуваних РПП

Етап досліджень	Кислотне число	Тангенс кута діелектричних втрат	В'язкість	Індукційний період
Вихідна РПП	VO-2, VO-3, VO-1	VO-2, VO-1, VO-3	VO-2, VO-1, VO-3	—
Визначення індукційного періоду	—	—	—	VO-3, VO-1, VO-2
Пришвиджене старіння	VO-1, VO-3, VO-2	VO-1, VO-3, VO-2	VO-1, VO-3, VO-2	—

б) тангенс кута діелектричних втрат за температури 25 °С не перевищував 3 % (відповідно, за 90 °С — 30 %);
в) кінематична в'язкість за температури 40 °С не збільшилась понад 10 % від початкового значення.

Результати визначення цих показників, після аналогічного старіння РПП «VO-1», «VO-2» і «VO-3», показали наступне:

а) стосовно показника «кислотне число»:

— без додавання присадок тільки для «VO-1» значення кислотного числа не перевищило межу 0,3 мг КОН/г РПП протягом всього часу старіння, для «VO-2» і «VO-3» ця межа була перевищена;

— із додаванням вибраної присадки «AD-4», після 102 год. старіння, значення показника в мг КОН/г РПП перевищило допустиму межу і для «VO-1» становило приблизно 0,5, для «VO-3» — 0,6, для «VO-2» — 0,65, причому значення для всіх ІРПП були вищими, аніж без додавання до них присадки;

б) стосовно показника «тангенс кута діелектричних втрат», визначеного за температури 90 °С:

— без додавання присадок і після додавання присадки «AD-4» в результаті старіння для жодної із РПП «VO-1», «VO-2» і «VO-3» значення показника не перевищило допустимої межі і становило для «VO-1» майже 3 %, для «VO-3» — 4 % і для «VO-2» — 9 %;

— особливістю було те, що, на відміну від «VO-1» і «VO-3», для яких спостерігалось поступове зростання показника в часі, для «VO-2» у період часу старіння від 80 год. до 90 год. відбулось різке (приблизно у 4 рази) збільшення значення показника;

в) стосовно показника «кінематична в'язкість за температури 40 °С»:

— критерієм відповідності вимогам позитивного результату є те, що старіння за вказаною вище про-

6.2. Порівняння результатів дослідження впливу рідин рослинного походження на паперову ізоляцію. Під впливом експлуатаційних факторів — теплових, хімічних, електричних та ряду інших, в целюлозній ізоляції (папір, картон тощо) йде процес старіння, який погіршує її характеристики. Суттєво не впливаючи на електричні властивості, старіння різко проявляється в зміні механічних характеристик. У зв'язку з цим, виникає певний інтерес до аналізу результатів дослідження впливу зазначених вище факторів на старіння целюлозної ізоляції, яка знаходиться в середовищі ІРПП та їх порівняння з аналогічними, коли оточуючим середовищем є ізоляційна олива.

Результати досліджень, наведені в [8], дозволять отримати відповіді на деякі з питань, що визначають поведінку целюлозних матеріалів в різних ізоляційних рідинах. Для експериментів були використані наступні матеріали:

1. ІРПП марки «BIOTEMP» (п. 6.1 цієї статті).
2. Ізоляційна олива марки «Nytro 11 RU» фірми Nynas, Швеція.
3. Крафт-папір (електротехнічний) фірми ABB Sécheron, Швейцарія.

Зразки ізоляційних рідин були висушені при температурі 60 °С протягом 24 годин. Причому ізоляційна олива використовувалася з мідним пасиватором, в той час як ІРПП — в тому вигляді, як його представив виробник. Початкова вологість паперових зразків становила 0,5 %. Була використана необхідна кількість розміщених в герметичних об'ємах наборів зразків як ізоляційних рідин з крафт-папером, так і контрольних — без крафт-паперу. Гранична температура експерименту становила 190 °С. На кожній температурній ступені визначення показників зразки знаходилися 24 години.

При визначенні вологості ізоляційних рідин застосовувалася методика, що відповідала публікації ІЕС 60814 [14], для оцінки кількості фуранових з'єднань – ІЕС 61198 [15], при визначенні ступеня полімеризації крафт-паперу – ІЕС 60450 [16].

Дослідження [8], показали, що початковий вміст води в зразках ізоляційної помітно менше, ніж в зразках з ІРПП – 8 мг/кг проти 60 мг/кг. Зі збільшенням температури і тривалості старіння ізоляції у всіх зразках спостерігається зростання вмісту води. Збільшення кількості води в ІРПП спостерігається вже після 100 °С і в кінці експерименту (при 190 °С) становить приблизно 184 мг/кг. А от в ізоляційній оливі збільшення кількості води починає спостерігатися тільки з 135 °С, але в кінці експерименту (при 190 °С) вологість її склала близько 60 мг/кг, що приблизно в три рази менше в порівнянні з ІРПП.

Оскільки зразки при випробуваннях перебували в герметичних об'ємах, можна припустити, що надлишок вологи в ізоляційній оливі та ІРПП з'явився за рахунок вилучення її із крафт-паперу. Оскільки збільшення вологи в ІРПП склало близько 124 мг/кг, а для ізоляційної оливи – 50–60 мг/кг, то в [8] був зроблений висновок, що папір, який знаходиться в ІРПП в процесі експлуатації «підсушується» значно більше, ніж той, що знаходиться в ізоляційній оливі. Подібні результати також були отримані в [17, 18]. Поясненням цього явища може служити той факт, що гігроскопічність ефірів більше гігроскопічності ізоляційної оливи. В [11] прямо стверджується, що ІРПП «ВІОТЕМР» може поглинати воду у великих кількостях, сприяючи збільшенню терміну служби крафт-паперу. Дослідження, основане на вимірі межі міцності на розрив і вимірі ступеня полімеризації крафт-паперу, показало, що занурений в ІРПП «ВІОТЕМР» крафт-папір служить удвічі довше аналогічного крафт-паперу, що знаходиться в середовищі ізоляційної оливи.

Дослідження [8] також показало: зростання температури в процесі старіння ІРПП та ізоляційної оливи призводить до зменшення вмісту розчиненого кисню в обох ізоляційних рідинах. Відзначається також, що споживання кисню в процесі деградації крафт-паперу не дуже значимі. Це означає, що основною причиною деградації паперу вважається гідроліз, а окислення відіграє другорядну роль.

Швидкість старіння ізоляційного крафт-паперу оцінювали шляхом визначення зміни ступеня полімеризації (СП) з часом старіння. Значення СП можуть вказувати на рівень механічної міцності крафт-паперу. Новий (не використовуваний) крафт-папір має ступінь полімеризації, який становить близько 1200. У міру старіння крафт-паперу, полімерні ланцюги розриваються на більш короткі, знижуючи середній рівень СП. Безпечним може вважатись зменшення СП до 200 [9], коли папір стає ламким та крихким. Таким чином, цей метод дозволяє оцінити деградацію крафт-паперу з часом. У міру того як крафт-папір деградує, утворюються фуранові з'єднання в ізоляційних рідинах, присутність яких може опосередковано свідчити про протікання процесів старіння [19]. Цей факт знайшов підтвердження в [8], де також показано, що існує певна кореляція між концентрацією фуранових з'єднань і ступенем деградації крафт-паперу. Деградація з гідролітичним розкладанням целюлози супроводжується виділенням

води і формальдегіду [17] та утворенням гідроксильних груп ОН.

Виміряні значення СП показали, що початкова деградація крафт-паперу відбувається при температурі близько 90 °С в ІРПП «ВІОТЕМР» і близько 110 °С в ізоляційній оливі. При температурі нижче 130 °С деградація крафт-паперу в ІРПП трохи вища, ніж в ізоляційній оливі, хоча значення і не суттєво відрізняється. Однак, при температурі вище за 130 °С, навпаки, СП в ізоляційній оливі зменшується швидше, ніж в ІРПП [8], вказуючи на те, що термічне старіння крафт-паперу в ІРПП відбувається з меншою швидкістю, ніж в ізоляційній оливі.

Більш повільна деградація паперу при температурі вищій ніж 130 °С в ІРПП може бути пов'язано з тим, що розчинність води в ІРПП вища, ніж в ізоляційній оливі, і ця відмінність може мати визначальний вплив. Висока розчинність води в ІРПП (як і в інших ізолюючих рідинах на основі тригліцеридів) може запобігти накопиченню вологи в крафт-папері, таким чином уповільнюючи гідролітичне розкладання целюлози.

В [17] вказується, що і для тригліцеридів (головних компонентів ІРПП) основним шляхом до деградації є гідроліз, а не окислення. Він забезпечує наявність жирних кислот, необхідних для хімічної модифікації целюлози. Реактивні групи ОН, що утворюються в результаті деградації целюлози, вступають у взаємодію з жирними кислотами при протіканні реакції переетерифікації. В результаті зменшується інтенсивність деградації целюлози. Швидкість вказаної реакції і дія її впливу зростають із збільшенням температури. Що і було підтверджено авторами [17] шляхом інфрачервоної спектроскопії крафт-паперу, зануреного в ІРПП при температурі 170 °С. Це є додатковим (крім ефекту від зменшення вологовмісту) поясненням більш низької швидкості старіння крафт-паперу в ІРПП, ніж в ізоляційній оливі при температурах вищих ніж 130 °С.

Про можливість існування ефекту захисту целюлозою ізоляції продуктами перетворення складових ІРПП згадується і в [8], де вказується на відкладення на крафт-папері за дії високих температур желеподібної речовини, яка утворилась в результаті деградації ІРПП і слугує, на думку авторів, захистом крафт-паперу від подальшої деградації.

Описані результати досліджень по деградації крафт-паперу в ІРПП дають підстави для твердження про перспективність застосування ІРПП як діелектричних рідин в силових трансформаторах.

6.3. Порівняння результатів дослідження газоутворення у разі дії на рідин рослинного походження теплових і електричних факторів. Як зазначалось в [1], ізоляційні рідини використовуються також для потреб діагностування високовольтного електрообладнання. Зокрема, це стосується контролю наявності дефектів за допомогою обробки результатів визначення якісного та кількісного вмісту газів, розчинених в пробах таких рідин. Діагностування виконується на підставі методик, встановлених нормативними документами, і полягає у порівнянні отриманих результатів з типовими значеннями і, у разі перевищення таких значень, встановленні виду і характеру дефекту за допомогою певних співвідношень між газами [20]. Такі методики, зокрема ІЕС 60599 [21], вже достатньо тривалий час успішно використовуються для обладнання з ізоляційною оливою. Але, оскільки

встановлення діагнозу виконується шляхом порівняння фактичних результатів визначення газів із вказаними в методиках критеріями, доцільно буде з'ясувати прийнятність вже напрацьованих методик і для обладнання з ІРПП.

Для тих самих рідин, що вказані в п. 6.1 цієї статті, крім наведених вище досліджень, були виконані також роботи, які дозволяють зробити порівняння особливостей газоутворення під час деструкції рідин різного походження за наявності в обладнанні дефектів електричного і термічного характеру.

В [8] для дослідження газоутворення, крім рідин з позначенням «VO-1», «VO-2», «VO-3», «Biovolt A» (п. 6.1), була використана також ізоляційна олива з умовним позначенням «MIO». Дослідження виконувалось шляхом моделювання дії дефектів розрядного і термічного характеру та визначенням із заданою періодичністю наявності та вмісту розчинених в цих рідинах газів. Визначення виконувалось для водню (H₂), метану (CH₄), етану (C₂H₆), етилену (C₂H₄) та ацетилену (C₂H₂).

Моделювання дії розряду (дефекту розрядного характеру), що за рівнем енергії відповідав би дуговому розряду (розряду великої енергії), створювалось електричним пробоем під час прикладання напруги приблизно 40 кВ до зразків рідин в проміжку з відстанню 2,5 мм між плоскими електродами. Через кожні 15, 45, 75 і 105 пробітів із досліджуваного зразка відбиралась проба для визначення в ній якісного і кількісного вмісту утворених газів.

Моделювання дії перегріву створювалось нагріванням зразків рідин до температури 150 °C і витримкою за такої температури протягом 288 годин. Через однакові для всіх рідин моменти часу із досліджуваного зразка відбиралась проба та визначались в ній якісний і кількісний вміст утворених газів.

Оскільки визначення вмісту розчинених газів проводиться, як правило, з використанням коефіцієнтів їх розчинності (коефіцієнтів Оствальда), тому до проведення досліджень значення цих коефіцієнтів для кожної із рідин «VO-1», «VO-2», «VO-3» були виміряні [8]. Ці та інші дані представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Коефіцієнти розчинності Оствальда

Розчинений газ	Значення коефіцієнтів розчинності Оствальда				
	VO-1*	VO-2*	VO-3*	Biovolt A**	Ізоляційні оливи***
H ₂	0,050	0,047	0,046	0,054	0,05
O ₂	0,150	0,097	0,105	0,100	0,17
N ₂	0,070	0,059	0,074	0,071	0,09
CH ₄	0,300	0,230	0,270	0,305	0,43
CO	0,090	0,079	0,105	0,110	0,12
CO ₂	1,330	0,920	1,025	1,190	1,08
C ₂ H ₆	1,450	1,160	1,425	1,374	2,40
C ₂ H ₄	1,190	1,180	1,430	1,303	1,70
C ₂ H ₂	1,630	1,200	1,230	1,520	1,20

Примітка: * — визначено за температури 25 °C згідно з методикою ASTM D 2780 [22]; ** — дані за температури 25 °C, надані виготовлювачем та вказані в [8]; *** — дані за температури 20 °C, вказані в ІЕС 60599 [21]

Оскільки коефіцієнти Оствальда практично не залежать від температури, то всі дані табл. 3 можна порівнювати. Вони свідчать про відмінності їх значень не тільки між ізоляційними оливами та РПП, але і між рідинами рослинного походження, виготовленими із різної сировини. Нехтування вказаними відмінностями можуть призвести до суттєвих похибок під час визначення концентрацій одних і тих самих газів, але розчинених в різних рідинах. Наслідком стане недостовірне діагностування дефектів обладнання.

Результати досліджень газоутворення, надані в [8] у вигляді графічних залежностей, дозволяють з прийнятною точністю розрахувати вказані в ІЕС 60599 [21] співвідношення газів та порівняти тотожність впливових факторів досліду та отриманих висновків діагностування для різних рідин.

Результати розрахунків цих співвідношень для газів, що утворились в різні моменти моделювання дії дефектів розрядного і термічного характеру, представлені в табл. 4 і 5.

Таблиця 4

Результати розрахунків співвідношень газів згідно з ІЕС 60599 для початкової стадії досліджень

Співвідношення газів	Розряд, кількість — 15 шт.					Перегрів, тривалість — 49 год.				
	VO-1	VO-1	VO-1	Biovolt A	MIO	VO-1	VO-1	VO-1	Biovolt A	MIO
CH ₄ /H ₂	0,06	0,08	0,03	0,27	0,01	0,09	0,33	48,8	0,83	1,97
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	15,6	11,2	10,2	10,2	7,6	—	—	—	—	—
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	> 4,8	> 8,1	> 4,8	> 4,8	> 16	0,01	0,11	0,21	0,02	0,21

Таблиця 5

Результати розрахунків співвідношень газів згідно з ІЕС 60599 для кінцевої стадії досліджень

Співвідношення газів	Розряд, кількість — 105 шт.					Перегрів, тривалість — 288 год.				
	VO-1	VO-1	VO-1	Biovolt A	MIO	VO-1	VO-1	VO-1	Biovolt A	MIO
CH ₄ /H ₂	0,1	0,05	0,05	0,08	0,19	0,47	0,16	0,85	1,31	2,26
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	22,1	13,3	9,4	9,7	7,2	—	—	—	—	—
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	6,1	> 3,9	> 13	> 15	11,2	0,02	0,15	0,09	0,08	0,29

Порівняння наведених в табл. 4, 5 даних з вказаними в ІЕС 60599 [21] критеріями свідчить про наступне:

- на кінцевій стадії досліджень з моделюванням дії розряду тільки для зразків ізоляційної оливи «МІО» і РРП «VO-1» діагноз співпадає з характером модельованого дефекту — дуговий розряд (розряд високої енергії), а для інших застосованих рідин такого чіткого віднесення немає, проте, враховуючи значну концентрацію ацетилену, дуговий розряд (розряд високої енергії) можливо діагностувати;
- на початковій стадії моделювання дії розряду про те, що дефект відноситься до дугового розряду (розряд високої енергії) для всіх зразків, свідчить саме найбільша (у порівнянні з іншими газами) кількість ацетилену та більший вміст водню у відношенні до інших вуглеводневих газів;
- на кінцевій стадії досліджень з моделюванням перегріву тільки для зразків ізоляційної оливи «МІО» і РРП «Biovolt А» діагноз співпадає з характером модельованого дефекту — перегрів з температурою менше 300 °С, а для інших застосованих рідин висновки про перегрів зробити неможливо, особливо з урахуванням того, що в РРП «VO-1», «VO-2», «VO-3» зменшення концентрацій відбувається у наступному порядку $C_2H_6 > H_2 > CH_4 > C_2H_4$, тобто концентрація етану і водню перевищує концентрацію метану на відміну від розподілення газів в ізоляційних оливах;
- на початковій стадії досліджень моделювання перегріву, через вказані особливості, діагноз співпадає з характером модельованого дефекту — перегрів з температурою менше 300 °С — тільки для зразків «МІО».

Не тільки співвідношення, але і абсолютні значення концентрацій утворюваних газів для РРП мають суттєві відмінності від ізоляційних оливи за умов аналогічних впливів. Так, наприкінці моделювання перегріву концентрація метану в «МІО» становила близько 60 ppm, в той час, коли в «VO-1», «VO-3» та «Biovolt А» вона знаходилась в діапазоні 160–760 ppm. До того ж, на відміну від ізоляційних оливи, навіть комерційні РРП у разі перегрівів до 300 °С утворюють етан з концентраціями, більшими ніж метан. Так, після 288 год. моделювання перегріву в РРП «Biovolt А» [8] утворилось близько 10 ppm метану і 350 ppm етану. В [2] і для РРП «BIOTEMP» спостерігається ця особливість, та вказано, що для рідин рослинного походження властиве утворення в значно більших кількостях таких газів, як окис і двоокис вуглецю — газів, котрі мають вплив на вирішення питань діагностування дефектів.

Перелічене вказує на те, що існують проблеми беззастережного перенесення методик діагностування дефектів високовольтного електрообладнання з ізоляційними оливами на обладнання, яке залите ізоляційними рідинами рослинного походження, у т. ч. рідинами із різної рослинної сировини.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

У разі застосування РРП для високовольтного електрообладнання, крім покращення умов пожежної та екологічної безпеки, слід очікувати збільшення строку служби целюлозної ізоляції та зростання електричної міцності за однакового вологовмісту у порівнянні з ізоляційною оливою.

Гірша, у порівнянні з ізоляційною оливою, термоокислювальна стабільність РРП буде вимагати підбору індивідуальних (залежно від складу РРП) антиокислювальних присадок.

Залежність характеристик РРП від складу хімічних сполук вказує на те, що досягнення необхідних показників буде забезпечуватись удосконаленням технологій виготовлення таких рідин, у т. ч. шляхом створення сумішей певної пропорції із різної первинної сировини.

Існують ризики використання РРП в високовольтному електрообладнанні, призначеному для ізоляційної оливи, без зміни конструкції цього обладнання та застосування для діагностування такого обладнання методик, напрацьованих для ізоляційної оливи.

8. Висновки

1. Первинна сировина для виготовлення РРП впливає не тільки на початкові значення показників їх якості, але і на значення цих показників після старіння таких рідин. Досягнення вимог певної термоокислювальної стабільності забезпечується введенням антиокислювальних присадок, але, оскільки від первинної сировини залежать також і відмінності у змінах кінцевих (після старіння) значень показників, то різні РРП потребують підбору своїх інгібіторів. На відміну від використання і контролю якості ізоляційної оливи, така особливість буде, скоріш за все, вимагати індивідуальної методики контролю за концентрацією кожної присадки (комплексу присадок) в РРП.

2. Результати численних досліджень свідчать, що завдяки особливостям процесу і продуктів старіння РРП, в їх середовищі спостерігається менша деградація целюлозної ізоляції. Тобто строк служби твердої компоненти ізоляційних конструкцій високовольтного електрообладнання, залитих РРП, повинен збільшитись, порівняно із застосуванням для них ізоляційних оливи.

3. Вміст води, що може бути розчинена в РРП, в декілька десятків разів перевищує такий вміст для ізоляційної оливи [2, 8]. Оскільки, у загальному випадку, волога із зовні обладнання потрапляє спочатку до рідкого діелектрика, слід очікувати, що, за умов однакового темпу такого потрапляння, зволоження целюлозної ізоляції буде відбуватись значно повільніше у разі застосування РРП, аніж коли обладнання залите ізоляційною оливою. Крім того, за однакової кількості води в РРП і ізоляційній оливі, відносний вологовміст РРП буде значно меншим. Враховуючи, що електрична міцність рідких діелектриків обернено пропорційна саме відносній вологості, пробивна напруга для РРП буде вищою, ніж для ізоляційної оливи, за однакової абсолютної кількості води в обох рідинах.

4. Особливості газоутворення під час деструкції РРП та розчинності газів в таких рідинах, скоріш за все, не дозволять застосовувати вже напрацьовані для ізоляційних оливи методики діагностування наявності та розвитку дефектів у високовольтному обладнанні і будуть вимагати розробки своїх оригінальних методик.

Подяка

Автори висловлюють подяку доценту НТУУ «КПІ», к. т. н. Троценку Є. О. за участь у підготовці первинних матеріалів, що були використані в цій статті.

Література

1. Абрамов, В. Б. Обзор альтернатив замены использования изоляционной оливы в высоковольтном электрообладании [Текст] / В. Б. Абрамов, О. П. Проценко, С. О. Троценко // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2016. — № 1/1(27). — С. 42–49. doi:10.15587/2312-8372.2016.59617
2. Oommen, T. V. Vegetable oils for liquid-filled transformers [Text] / T. V. Oommen // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2002. — Vol. 18, № 1. — P. 6–11. doi:10.1109/57.981322
3. Fofana, I. 50 years in the development of insulating liquids [Text] / I. Fofana // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2013. — Vol. 29, № 5. — P. 13–25. doi:10.1109/mei.2013.6585853
4. Fofana, I. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. 1. Investigation of mixed liquids [Text] / I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2002. — Vol. 18, № 3. — P. 18–31. doi:10.1109/mei.2002.1014964
5. Wilhelm, H. M. Edible natural ester oils as potential insulating fluids [Text] / H. M. Wilhelm, M. B. C. Stocco, L. Tulio, W. Uhren, S. G. Batista // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2013. — Vol. 20, № 4. — P. 1395–1401. doi:10.1109/tdei.2013.6571461
6. Obande, J. O. Palm Oil As An Alternative Dielectric Transformer Coolant [Text] / J. O. Obande, J. U. Agber // International Journal of Research in Engineering and Science. — 2014. — Vol. 2, № 6. — P. 8–13.
7. Matharage, B. S. H. M. S. Performance of coconut oil as an alternative transformer liquid insulation [Text] / B. S. H. M. S. Matharage, M. A. R. M. Fernando, M. A. A. P. Bandara, G. A. Jayantha, C. S. Kalpage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2013. — Vol. 20, № 3. — P. 887–898. doi:10.1109/tdei.2013.6518958
8. Martins, M. Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers- experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil [Text] / M. Martins // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2010. — Vol. 26, № 6. — P. 7–13. doi:10.1109/mei.2010.5599974
9. Carcedo, J. Aging assessment of dielectric vegetable oils [Text] / J. Carcedo, I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. J. Renedo, C. Pesquera // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2015. — Vol. 31, № 6. — P. 13–21. doi:10.1109/mei.2015.7303258
10. Li, J. Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties [Text] / J. Li, Z. Zhang, P. Zou, S. Grzybowski, M. Zahn // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2012. — Vol. 28, № 5. — P. 43–50. doi:10.1109/mei.2012.6268441
11. Mendes, J. C. Advanced application of a natural ester vegetable oil in a HV power transformer [Text] / J. C. Mendes, A. S. G. Reis, E. C. Nogawa, C. Ferra, A. J. A. L. Martins, A. C. Passos // CIGRE. — 2008. — Paper A2-101. — Available at: \www/URL: https://library.e.abb.com/public/d9c7f1ba8834e4adc12577bb0037033c/Cigre%20Session%20Paper.pdf
12. Domingos, A. K. The influence of BHA, BHT and TBHQ on the oxidation stability of soybean oil ethyl esters (bio-diesel) [Text] / A. K. Domingos, E. B. Saad, W. W. D. Vechiatto, H. M. Wilhelm, L. P. Ramos // Journal of the Brazilian Chemical Society. — 2007. — Vol. 18, № 2. — P. 416–423. doi:10.1590/s0103-50532007000200026
13. IEEE Std C57.147-2008. IEEE Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers [Text]. — New York, USA, 2008. — P. 1–31. doi:10.1109/ieeestd.2008.4566080
14. BS EN 60814:1998. Insulating liquids. Oil-impregnated paper and pressboard. Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration [Electronic resource]. — Published 15.02.1998. — Available at: \www/URL: http://dx.doi.org/10.3403/01317331
15. BS EN 61198:1994. Mineral insulating oils. Methods for the determination of 2-furfural and related compounds [Electronic resource]. — Published 15.06.1994. — Available at: \www/URL: http://dx.doi.org/10.3403/00334970
16. BS EN 60450:2004. Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials [Electronic resource]. — Published 16.08.2004. — Available at: \www/URL: http://dx.doi.org/10.3403/03097667
17. Rapp, K. J. Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and kraft paper [Text] / K. J. Rapp, C. P. McShane, J. Luksich // IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2005. — P. 393–396.
18. Bertrand, Y. Comparison of the oxidation stabilities of vegetable based and mineral insulating oils [Electronic resource] / Y. Bertrand, D. Laurichesse // MatPost. — Lyon, France, 2007. — Available at: \www/URL: http://2011.matpost.org/matpost2007/docs/MATPOST07_0058_paper.pdf
19. Mulej, M. Up-to-date experience on furans for transformer diagnostics [Text] / M. Mulej, A. Varl, M. Končan-Gradnik. — High voltage engineering, 2004. — 6 p.
20. Шутенко, О. В. Анализ проблем, возникающих при интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов [Текст] / О. В. Шутенко, В. Б. Абрамов, Д. Н. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». Енергетика: надійність і енергоефективність. — 2013. — № 59(1032). — С. 164–180.
21. BS EN 60599:2016. Mineral oil-filled electrical equipment in service. Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis [Electronic resource]. — Published 31.01.2016. — Available at: \www/URL: http://dx.doi.org/10.3403/30285370
22. ASTM D2780-92(1997). Standard Test Method for Solubility of Fixed Gases in Liquids [Electronic resource]. — Available at: \www/URL: http://dx.doi.org/10.1520/d2780-92r97

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Представлены данные исследований влияния растительного сырья на характеристики жидкостей, которые могут использоваться в качестве диэлектрика в высоковольтном электрооборудовании. Внимание уделено особенностям достижения необходимой термоокислительной стабильности таких жидкостей, различиям процесса старения в них бумажной изоляции, возможностям диагностики дефектов оборудования на основании контроля газообразования. Отмечено, что использование различного растительного сырья приводит к появлению различий в изготовлении и применении жидкостей указанного назначения.

Ключевые слова: изоляционные жидкости растительного происхождения, старение, увлажнение, газообразование, диэлектрики высоковольтного электрооборудования.

Абрамов Володимир Борисович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки та електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Проценко Олександр Ростиславович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки та електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: apro54@ukr.net.

Абрамов Владимир Борисович, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Проценко Александр Ростиславович, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Abramov Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Protsenko Olexandr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: apro54@ukr.net