

Абрамов В. Б.,
Проценко О. Р.,
Троценко Е. О.

ОГЛЯД АЛЬТЕРНАТИВ ЗАМІНИ ВИКОРИСТАННЯ ІЗОЛЯЦІЙНОЇ ОЛИВИ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННІ

Виконано огляд ряду публікацій з питань властивостей та застосування ізоляційних рідин. Увага приділена здобуткам досліджень, направлених на вирішення проблеми заміни ізоляційної оливи іншими ізоляційними рідинами, а також позитивним та негативним наслідкам застосування таких рідин. Зазначено, що напрямком найближчої перспективи є продовження робіт з досліджень та використання ізоляційних рідин рослинного походження та нанорідин.

Ключові слова: ізоляційні рідини, вуглеводні, ефіри, діелектрики високовольтного електрообладнання.

1. Вступ

Серед ізоляційних рідин, що використовуються в високовольтному електрообладнанні, найбільше поширення має та, яка є продуктом переробки нафти. З огляду на ряд обставин, в технічній літературі, під час викладення відомостей про цю рідину, можна зустріти різні її назви: «мінеральне масло»; «олива»; «трансформаторне масло» і деякі інші. Але в тексті статті автори будуть використовувати ту її назву, що відповідає вказаній в ДСТУ 3437-96 «Терміни та визначення», а саме — «ізоляційна олива».

Ізоляційні рідини використовуються в багатьох видах високовольтного електрообладнання. Це трансформатори, комутаційні апарати, конденсатори, кабелі, інше обладнання [1, 2]. В них ізоляційні рідини виконують, як правило, дві основні функції: діелектрика та охолоджувача. Серед додаткових функцій слід також відмітити покращення умов гасіння дуги в комутаційних апаратах, захист внутрішньої ізоляції електрообладнання від негативного впливу зовнішнього оточуючого середовища (наприклад, зволоження), навіть таку, як надання можливості отримувати інформацію для потреб діагностування обладнання на підставі випробувань зразків рідини з цього обладнання.

Саме завдяки своїм характеристикам ізоляційна олива виявилась тою речовиною, що вже понад ста років найбільш широко застосовується. Вона має достатньо високі ізоляційні властивості, що дозволяють отримувати необхідні габарити обладнання; малу в'язкість, необхідну для ефективного відведення тепла; температуру застигання, яка прийнятна для умов використання електрообладнання взимку. Не менш важливою є відносно низька вартість виготовлення названої рідини з потрібними характеристиками, які, до того ж, зберігаються практично незмінними протягом тривалого часу експлуатації [3, 4].

Удосконалення загально прийнятих технологій виготовлення ізоляційних олів (очищення отриманих з нафти масляних дистилатів, у т. ч. з регулюванням складу основних вуглеводневих сполук) призводило до

зростання якості таких олів, але не усувало існування основних недоліків їх застосування — недоліків, що були пов'язані з походженням цих рідин та проявлялись у разі виникнення аварій електрообладнання. Мова іде про аварії, причиною яких є короткі замикання всередині обладнання. Вони супроводжуються протіканням великих струмів, а отже виникненням температур, достатніх для руйнування вуглеводневих компонентів оливи з утворенням величезної кількості газоподібних продуктів її розкладу. Наслідки цього відомі: корпуси обладнання пошкоджуються, олива витікає і горить.

Тобто перший недолік, властивий багатьом нафтопродуктам, — пожежонебезпечність ізоляційної оливи. Другий — забруднення ґрунту, до того ж таке, яке погано піддається біологічному розкладу [5]. І нарешті, нафта не відноситься до відновлювальної сировини (до речі, не усяка нафта придатна для виготовлення саме ізоляційної оливи), а її запаси потроху вичерпуються. З огляду на це пошук інших, альтернативних рідин з необхідними властивостями є актуальним завданням.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відомо, що властивості ізоляційної рідини (як діелектрика і охолоджувача) і конструктивні особливості обладнання, де ця рідина застосовується, взаємопов'язані. Низка чинників (вид обладнання, клас напруги, умови експлуатації, економічні погляди та інше) впливає на прийняття кінцевих рішень про використання тієї чи іншої ізоляційної рідини в якійсь одиниці або групі одиниць обладнання. Жодна із існуючих рідин такого призначення не є універсальною стосовно виконання всіх вимог для випадків, що супроводжують як сам процес їх застосування, так і можливі наслідки від нього.

Через причини, про які йшла мова вище, на заміну ізоляційної оливи в останні приблизно 50 років розроблялись, досліджувались та знаходили своє місце у використанні ізоляційні рідини штучного, рослинного та науково-інноваційного походження [5–9]. Результати і досягнення напрацювань, а також шляхи пошуку та

вдосконалення цих рідин є і зараз предметом обговорення в національних та міжнародних фахових організаціях. До них, зокрема, відносяться робочі групи СІГРЕ [9–11].

В запропонованому огляді виконана певна систематизація таких напрацювань де, крім загальних відомостей про перелічені вище ізоляційні рідини, будуть надані також окремі переваги та недоліки використання цих рідин, пов'язані з їх фізико-хімічними властивостями. Як правило, недоліки, притаманні різним рідинам, — не однакові. Частина їх не підлягає усуненню з ряду причин (принципових, технологічних, економічних). Інша — може бути предметом пошуку шляхів досягнення їх повної ліквідації або меншого прояву і висвітлюється в цій статті, як перспективний, на погляд авторів, напрямок подальших досліджень та аналізу їх результатів.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Походження ізоляційних рідин, їх фізико-хімічна природа визначають особливості властивостей цих рідин, а також поведінки названих рідин під час експлуатації в обладнанні. В представленому огляді саме такі особливості, притаманні різним рідинам і будуть *об'єктом висвітлення та дослідження* їх впливу на можливість використання за призначенням. З метою порівняння особливостей, буде виконана певна систематизація відомостей шляхом групування (за можливості) рідин, що містять речовини подібної хімічної будови. Це дозволить проаналізувати позитивні і негативні наслідки застосування тих або інших ізоляційних рідин в електро-

обладнанні, вказати перспективи їх використання для зменшення кількості обладнання з ізоляційною оливою, а також пріоритетні напрямки досліджень альтернативних рідин, які, на думку авторів, в найближчій перспективі будуть сприяти вирішенню проблеми, вказаної на початку статті.

4. Ізоляційні рідини, їх застосування та властивості

Внутрішня ізоляція високовольтного електрообладнання виконується, як правило, композиційною та містить декілька діелектриків. Здебільшого це поєднання твердих діелектриків з рідкими або газоподібними діелектриками. За атмосферного тиску рідкі діелектрики (ізоляційні рідини) мають переваги у порівнянні з газоподібними: більша електрична міцність; більша діелектрична проникність, а отже більша однорідність всієї ізоляції; більша теплопровідність. Тому ізоляційні рідини ще тривалий час будуть використовуватись за призначенням, і можна вважати не втраченою актуальність коригування властивостей існуючих або пошуку нових рідин з метою більш повного виконання вимог до їх експлуатації.

Загальну уяву про використання ізоляційних рідин в електрообладнанні надає табл. 1 [12].

З огляду на достатню чисельність рідин, представлених в табл. 1, спробуємо стисло охарактеризувати притаманні їм особливості (групуючи, за можливості, рідини, що містять речовини подібної хімічної будови).

Таблиця 1

Використання ізоляційних рідин в електрообладнанні

Ізоляційна рідина	Силкові трансформатори та реактори	Розподільчі трансформатори	Тягові трансформатори	Вимірвальні трансформатори	Спеціальні трансформатори	Вводи	Перемикачі відгалужень	Кінцеві кабельні муфти	Автоматичні вимикачі	Конденсатори	Кабелі	Навантажувальні резистори
Ізоляційна олива	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	
Поліхлоровані біфеніли (ПХВ)		–				–	–			–		
Інші галогенізовані вуглеводні		0										
Кремнійорганічна ізоляційна рідина		+	+				+					
Високомолекулярні вуглеводні		+					+					
Тетраефір петнаеритрита		+	+				+					+
Алкілбензоли				+		+				+	+	
Ароматичні вуглеводні (М/ДБТ, ФКЕ, МІПБ і інш.)				+						+		
Ізоляційні рідини рослинного походження		+								+		
Фталати (ДОФ, ДІФ)										+		
Полібутени											+	
Скраплені гази або криогенні рідини		+				+						
Нанорідини		+										
Змішані рідини		+								+	+	

Примітка: + — знаходяться в експлуатації; 0 — загалом, не рекомендовані для використання в експлуатації, але десь ще знаходяться у використанні; – — заборонені, а тому не повинні будь-де використовуватись; М/ДБТ — моно/добензилтолуол; ФКЕ — феніл-ксиліл-етан; МІПБ — моно ізопропіловий біфеніл; ДОФ — діоктилфталат; ДІФ — ді-ізононіл фталат

Ізоляційна олива отримується в результаті очищення дистилатів — одного із продуктів переробки нафти, що кипить за температур від 300 °С до 400 °С. Вона містить, в основному, вуглеводневі компоненти. Склад молекул цих компонентів достатньо великий, але кожна із молекул можливо віднести до однієї із трьох груп: парафінові вуглеводні, нафтеніві вуглеводні або ароматичні вуглеводні. Відсоткове співвідношення цих груп в оливі, а також особливості будови молекул в кожній із названих груп впливають практично на всі властивості отриманої рідини. В результаті цього змінюються такі суттєві показники експлуатаційної якості ізоляційної оливи, як електрична міцність, в'язкість, температура застигання, теплопровідність, термоокисна стабільність, вміст канцерогенних сполук [13–15]. Звідси стає зрозумілим, що для отримання ізоляційної оливи з потрібними показниками якості необхідно, аби чи первинна сировина (нафта) містила вуглеводневі компоненти в необхідних пропорціях, чи технологія очищення дистилатів дозволяла цей вміст у потрібних пропорціях змінювати. Причому, чим більшими будуть відхилення від потрібних пропорцій в нафті, тим складнішою та більшою за вартістю буде технологія отримання якісної ізоляційної оливи. Тобто не всі нафти придатні для отримання названого продукту з відносною дешевизною виробництва. Такий висновок отримано, навіть, попри те, що в цій статті автори не торкаються питань обмежень вмісту інших — не вуглеводневих компонентів в ізоляційній оливі для її безпроблемного використання.

Серед технологій очищення дистилатів, які на цей час застосовуються, слід зазначити кислотно-лужне очищення, селективне очищення, гідро-крекінгове очищення, їх комбінації та модифікації [3, 4, 13, 16]. Вказані технології дозволяють отримувати високоякісні ізоляційні оливи, які можуть використовуватись в обладнанні 750 кВ і вище. Важливим тут є високе значення показника «імпульсна електрична міцність» — показника, що визначає розміри ізоляційних проміжків в силових трансформаторах, а отже, в певній мірі, і габарити самих трансформаторів [17].

Суттєвим для пріоритету використання ізоляційної оливи в силових трансформаторах є її висока термоокисна стабільність, що забезпечується, в першу чергу, природою і складом молекул цієї рідини, а також наявністю серед них так званих природних інгібіторів окислення (сполук, що перешкоджають деструкції основних вуглеводневих компонентів). Для збільшення цієї стабільності в ізоляційній оливі вводять присадки-інгібітори (штучні домішки певного хімічного складу, які виконують роль інгібіторів). Присадок такого призначення є дуже багато, але всі вони, в тій чи іншій мірі, змінюють властивості оливи, саме як ізоляційної рідини. Єдиною, практично нейтральною до змін діелектричних характеристик оливи, виявилась присадка іонол (дибутилпаракризол) [13]. Саме ця присадка використовується для збільшення терміну використання оливи в обладнанні, де присутні можливі підвищення рівня температур та вмісту кисню (в першу чергу — в силових трансформаторах). Існують також присадки іншого призначення.

З табл. 1 видно, що ізоляційна олива може використовуватись практично в усіх видах електрообладнання. Інша справа, що для деяких видів таке використання є проблематичним або неефективним. Так в вимикачах проблеми виникають через те, що олива в цьому обладнан-

ні має таку температуру, як температура довкілля. Тобто для того, аби олива не застигала взимку, треба вмикати спеціальні нагрівачі, що створює додаткові складнощі. Але частково це вирішено шляхом виготовлення ізоляційної оливи спеціально для вимикачів. Вона, завдяки регулюванню складу вуглеводнів, має низьку температуру застигання, проте вже не придатна для використання в інших видах високовольтного електрообладнання. Через малу в'язкість ізоляційну оливу проблематично використовувати за призначенням в високовольтних кабелях. Пов'язано це із складністю рівномірного розподілення оливи протягом всієї довжини ізоляції кабелю та можливістю витікання її у разі пошкодження зовнішньої оболонки кабелю. Тому треба, як мінімум, ділити цю довжину на окремі ділянки, кожна з яких буде мати свій компенсаційний резервуар з оливою. Ізоляційну оливу можливо використовувати в конденсаторах, але там доцільно застосовувати ізоляційні рідини, які мають більшу діелектричну проникність і забезпечать, за однакових габаритів, отримання більшої ємності [5].

Отже значна частина проблем, існуючих з огляду на недоліки використання ізоляційної оливи, вирішуються в той або інший спосіб. Навіть існування ризиків виникнення пожеж, можливо суттєво знизити за рахунок введення в оливу присадок-антипіренів. Проте поступове вичерпання родовищ нафти, придатної для виготовлення ізоляційної оливи, а також існування інших напрямків використання продуктів переробки нафти повинні, скоріш за все у невіддаленому майбутньому, призвести до заміни її іншими ізоляційними рідинами.

Галогенізовані вуглеводні використовувались для створення синтетичних (штучних) не горючих ізоляційних рідин, молекули яких, крім вуглецю та водню, містили атоми *хлору* або *фтору* [18]. До них, наприклад, відносились хлоровані рідини, що включали поліхлоровані бифеніли (у вітчизняній практиці подібні рідини були відомі під назвами «совол» та «совтол»), але виготовлення їх було заборонене через високу токсичність [5]. Розроблялись інші ізоляційні рідини, що містили хлор [19–21], проте саме він був причиною стримування їх використання [6, 8]. Широкому використанню ізоляційних рідин, які містять хімічні з'єднання з фтором, заважає ще їх висока вартість [8].

Кремнійорганичні ізоляційні рідини, з точки зору пожежобезпечності, можуть розглядатись, як прийнятна заміна хлорованим ізоляційним рідинам. А от у порівнянні з ізоляційною оливою, вони мають меншу електричну міцність і більшу в'язкість, що буде призводити до зростання масогабаритних параметрів обладнання та погіршення характеристик тепловідведення від внутрішніх частин цього обладнання, до того ж кремнійорганичні ізоляційні рідини практично не піддаються розкладу мікроорганізмами [6, 8, 22].

Високомолекулярні вуглеводні мають в своєму складі хімічні сполуки, подібні до тих, що містяться в ізоляційній оливі. Проте, саме завдяки своєму складу (парафінові та ізопарафінові вуглеводні, інші аліфатичні вуглеводні з довгими, у т. ч. розгалуженими, ланцюгами), рідини з такими вуглеводнями характеризуються більш високою температурою кипіння та молекулярною масою. Отже вони мають, у порівнянні з ізоляційною оливою, більшу температуру займання (вищу пожежобезпечність). Наслідком особливостей структури молекул цих вуглеводнів є також те, що рідини з ними мають підвищену

в'язкість, аж до термопластичного стану (полібутени). В результаті чого, сфера застосування їх в електрообладнанні обмежена [18, 23, 24].

Ароматичні вуглеводні також відносяться до вуглеводневих сполук, що являються однією із складових ізоляційної оливи. Особливістю цих сполук є те, що вони відносяться до аліциклічних вуглеводнів з наявністю ненасичених зв'язків. Із зростанням вмісту таких вуглеводнів збільшується розчинююча здатність ізоляційної оливи, тобто більша кількість, наприклад, води або газів може бути в стані істинного розчину в такій оливі. Частина ароматичних вуглеводнів відноситься до антиоксидантів [13]. Це однозначно покращує експлуатаційні властивості ізоляційних оливи, які містять вказані вуглеводні, а ізоляційні рідини, що являють собою різноманітні ароматичні вуглеводні, мають певне застосування в електрообладнанні, де їх переваги мають вагомое значення [6, 8]. Ароматичні вуглеводні, що застосовуються самостійно як ізоляційні рідини, це алкілбензоли та поліаріалкани (М/ДБТ, ФКЕ, МПБ і ін.). Серед особливостей цих рідин слід відмітити (крім підвищеної розчинюючої здатності) низьку в'язкість, достатньо високу термоокисну стабільність, але вони мають більші, ніж у ізоляційної оливи, діелектричні втрати та гіршу здатність до біорозкладу. Ароматичні вуглеводні застосовуються також для утворення сумішей з іншими ізоляційними рідинами з метою покращення їх властивостей.

Ізоляційні рідини на основі ефірів являють собою достатньо широкий клас органічних з'єднань. Значна частина таких рідин має показники, що вигідно відрізняють їх від ізоляційної оливи, а саме: вищу температуру займання, більшу відносну діелектричну проникність, більшу розчинюючу здатність, кращу здатність до біорозкладу (наприклад, прості ефіри, тетраефіри, петнаеритритолі) [20, 22, 24, 25]. Проте вони мають вищу в'язкість, а деякі із них (наприклад, фталати, фосфористі ефіри) є шкідливими для екології [5]. Певні недоліки та відносно велика вартість названих рідин стримує їх широке використання за призначенням, тому вони застосовуються самостійно для того електрообладнання, де переваги їх характеристик є відчутними або у якості добавок для створення сумішей з іншими ізоляційними рідинами [26].

До окремої групи названих рідин належать ізоляційні рідини рослинного походження, основу яких складають ефіри жирних (карбонових) кислот. Вони мають ряд суттєвих позитивних відмінностей, і тому в цьому огляді приділимо їм трохи більше уваги, у порівнянні з рештою ізоляційних рідин, вказаних в табл. 1.

Ізоляційні рідини рослинного походження — легко доступні натуральні продукти, які повністю піддаються біологічному розкладанню [27–30] і можуть бути основою створення рідких ізоляційних середовищ для потреб електроенергетики. Інтерес до ізоляційних рідин рослинного походження (ІРРП), як альтернативи ізоляційним оливам, виник на початку 1990-х років насамперед тому, що, по-перше, ІРРП є екологічно безпечними через швидке розкладання під дією оточуючих біосферних умов, а по-друге — на відміну від ізоляційних оливи, ресурси сировини для них безмежні. В іноземній технічній літературі для назви таких охолоджувальних та ізолюючих рідин (або композицій) широко використовується словосполучення «natural esters» (природні ефіри) [30].

Одним з перших був виданий патент на нову ізоляційну композицію з ІРРП в США у 1998 р. [31], а в 1999 р. — на трансформатор із вказаною композицією [32]. Це стало поштовхом до активізації робіт у цьому напрямку в усьому світі. З'явилися десятки патентів і повідомлень про дослідження та застосування таких композицій в силових розподільних трансформаторах.

Активно працюють у цьому напрямку такі компанії як «Siemens», «Merlin Gerin», «Schneider Electric», «AREVA» та ряд інших. На основі розроблених рідин були випущені силові трансформатори компаніями: «Cooper Power Systems» (США) — композиція «Envirotemp FR 3» на основі рапсового насіння (патент 1999 р.); «ABB Power T&D Company Inc.» (США) — композиція «BIOTEMP» на основі насіння соняшника та сої (патент 1999 р.); «M&I MATERIALS» (Великобританія) — композиція «Midel®eN» на основі рапсового насіння.

Є повідомлення про розробку, виготовлення та поставку фірмою «AREVA» розподільних трансформаторів на 132 кВ, 90 МВ-А з об'ємом електроізоляційної рідини приблизно 30 т [33]. Компанія «Cooper Power Systems» розробила шунтуючий реактор на 245 кВ, 22 МВ-А, з рідкою ізоляцією типу «Envirotemp FR 3» та ін.

Перший патент в Російській Федерації був виданий в 2009 р. на електроізоляційну композицію під назвою «EcoTransOil®», характеристики якої виявилися, за заявами авторів, не гіршими від їх зарубіжних аналогів [34].

Перспективність робіт з даної тематики підтверджує і той факт, що загальна кількість виданих в 1994–2014 рр. патентів наближається до тисячі. За даними зарубіжних джерел на теперішній час у світі знаходиться в експлуатації кілька десятків тисяч «зелених» трансформаторів з ізоляційною рідиною, складеною на основі ІРРП [33].

Серед основних переваг ізоляційних рідин такого типу можна виділити:

- екологічну чистоту, обумовлену високою здатністю до розкладання в атмосферних умовах і, як наслідок, зниження проблем і вартості утилізації;
- високу температуру займання (350–370 °С) та спалаху (300–320 °С), що різко знижують ймовірність пожежі і вибуху, та підвищують можливість збільшення навантажувальної здатності;
- майже однакові з ізоляційними оливами діелектричні характеристики;
- поліпшений розподіл поля в конструкціях з паперово-масляною ізоляцією через більш високу діелектричну проникність;
- більш високу гігроскопічність, ніж у традиційної ізоляційної оливи, що може сприяти покращенню властивостей діелектричної композиції «целюлозна ізоляція — ІРРП»;
- сумісність з целюлозною ізоляцією;
- невичерпні запаси сировини, можливість використання генно-модифікованих рослин;
- можливість вторинного використання відпрацьованої ІРРП, наприклад, в якості палива для дизельних двигунів, сировини для лаків і фарб і т. п.;
- відсутність шкідливого впливу на здоров'я персоналу.

Нижче наведені деякі параметри, що характеризують ІРРП.

Після первинної переробки природної сировини (насіння рапсу, соняшника тощо), отримані рідини мають

темний колір і містять як тверду (залишки лушпиння, волокна, що повинні потім видалятися), так і рідку фракції. Остання являє собою складну суміш насичених та ненасичених тригліцеридних ефірів жирних кислот. Застигання насичених тригліцеридів стається вже за кімнатної температури, а ненасичених — відбувається в широкому діапазоні температур: від майже 0 °С до мінус 15 °С і навіть до мінус 30 °С. Зниження температури застигання на 10 °С, з незначною зміною питомої електричної провідності, може бути досягнута також додаванням присадок, наприклад, похідною поліметилметакрилату в концентраціях нижче 1 %. У деяких випадках присадки містять антибактеріальну речовину або мідний дезактиватор [5, 27–30]. Однак температуру застигання ІРРП не вдається знизити нижче мінус 30 °С, навіть після додавання присадок.

Проте в [5] описаний експеримент по охолодженню трансформатора наповненого ІРРП до температури мінус 50 °С в термокамері лабораторії. Після включення охолодженого трансформатора на номінальну напругу пробоїв в ізоляції зафіксовано не було. Пояснюється це тим фактом, що, оскільки ця рідина являє собою суміш складних ефірів, які застигають за різних температур, то немає раптового різкого переходу в твердий стан або (при збільшенні температури) в рідкий. Це, судячи з усього, запобігає формуванню тріщин і повітряних порожнин, які могли б викликати часткові розряди. Крім цього, під час роботи трансформаторів, їх ізоляційна рідина буде знаходитись в рідкому стані за будь-яких умов, навіть коли зовнішня температура буде дуже низькою.

При створенні ІРРП для силових трансформаторів можна вказати на необхідність вирішення двох основних задач. По-перше — забезпечити тривалий термін їх експлуатації (30–40 років), що вимагає високої стабільності характеристик. Однак, в ІРРП завжди присутні компоненти, які розкладаються за відносно короткий проміжок часу. Крім цього присутність в трансформаторах міді (як провідника) посилює тенденцію окислення. Тому необхідно в таких рідинах передбачити використання сильних інгібіторів окислення. По-друге — забезпечити високу чистоту композицій на основі ІРРП, тобто виключити наявність твердих домішок, хоча б на рівні аналогічних вимог для ізоляційної оливи. Враховуючи це цікавим може бути аналіз досвіду вирішення таких проблем «піонерами» створення та використання ІРРП, а саме, фірмами АВВ (ІРРП «ВІОТЕМР») або фірмою «Cooper Power Systems» (ІРРП «Envirotemp FR 3»).

Після відділення твердих складових, ІРРП обробляють (відбілюють) спеціальними розчинниками, щоб видалити небажані компоненти. Відбілювання зазвичай робиться глинистими фільтр-пресами, які додатково очищують рідину. Дезодорація паром видаляє леткі компоненти. Після виконання зазначених процедур питомі електропровідності рідин знаходяться в межах 5–50 пСм/м. Для використання в трансформаторах бажано мати питому електропровідність 1 пСм/м або нижчу. Щоб досягти цього показника, виробники ІРРП використовують спеціальні глини з поліпшеною здатністю до адсорбції.

Заключний етап — дегазування та сушка ІРРП. Через свою гігроскопічність, ІРРП при кімнатній температурі можуть абсорбувати воду в кількості 1200 ppm (частин на мільйон) чи навіть більше. Бажано знизити цей показник до 100 ppm.

Для стабілізації в отриману композицію ІРРП додають необхідні антиоксиданти. Застосування звичайних інгібіторів, однак, не дає задовільних результатів, тому для вирішення цієї задачі використовуються оригінальні суміші, склад яких виробниками ІРРП не наводиться.

На підставі проведених дослідницько-технологічних робіт, вказаним вище фірмам вдалося отримати ІРРП, які задовольняють вимогам чинних норм, та які можуть використовуватись у високовольтних силових трансформаторах.

У табл. 2 представлено деякі фізичні, хімічні та електричні властивості ІРРП, спеціально розроблених для використання у якості ізоляційної рідини високовольтних трансформаторів. З метою порівняння, в табл. 2 також наведені аналогічні характеристики ізоляційної оливи та кремнійорганічної ізоляційної рідини, що використовуються в трансформаторах [5, 13, 28, 33].

У процесі експлуатації ізоляційної рідини в трансформаторах піддаються тепловим та електричним впливам. Наслідком таких впливів є, зокрема, виділення газів. Кількість і тип газів служить достовірною інформацією про наявність в обладнанні дефектів та їх розвиток.

Лабораторією Doble Engineering проведені випробування ІРРП «ВІОТЕМР» та «Envirotemp FR 3» протягом 22 днів при 250 °С [36]. Перш за все, можна сказати, що склад газів, які виділилися, для обох рідин практично однаковий (крім водню в ІРРП типу «Envirotemp FR 3», концентрація якого була приблизно 9 %).

У порівнянні з ізоляційними оливами, основна відмінність газового складу полягає в присутності значно більшої кількості газів СО і СО₂. Поясненням цього може служити той факт, що на відміну від вуглеводневих рідин, ефірні рідини містять карбонільну групу — СОО, яка в результаті теплових та електричних впливів руйнується з виділенням СО та СО₂.

Крім цього, водень не повинен зазвичай з'являтися під час термічного розкладання, але певні компоненти або присадки в ІРРП можуть призвести до появи водню, що і було помічено в композиції «Envirotemp FR 3».

Результати дослідження ІРРП і ізоляційної оливи щодо розкладання їх під дією часткових розрядів представлено у роботі [37]. Аналіз даних вказує, що в ІРРП присутні водень, метан, СО і СО₂. Поява СО і СО₂ має ту ж природу, що і в попередньому випадку — а саме через розрив карбонільної групи СОО. Генерація метану і водню подібна до тої, що отримана з ізоляційної оливи, і спричинена вилученням водневих атомів з молекулярної основи цих рідин в електричному полі.

Порівняння газоутворення у разі впливу дугового розряду на ІРРП типу «ВІОТЕМР» і звичайну ізоляційну оливу [37] показало, що в цьому випадку виділяються, головним чином, водень і ацетилен у приблизно рівних кількостях в обох рідинах. Крім цього у вказаній ІРРП також з'являється достатня кількість СО та СО₂. Причина аналогічна — присутність в рідині карбонільної групи СОО.

Ресурсні випробування нових ізоляційних рідин, проводяться, зокрема, за стандартом ANSI/IEEE C 57.100-1986. Вони являють собою функціональні ресурсні випробування на реальному трансформаторі під повним навантаженням і напругою, але за підвищеної температури, щоб викликати прискорене старіння його ізоляції. Це дає змогу багаторічне старіння замінити випробуваннями, обмеженими розумними часовими рамками в кілька тижнів.

Таблиця 2

Властивості трансформаторних ізоляційних рідин

Властивості	Ізоляційні рідини рослинного походження	Ізоляційна олива	Кремнійорганічна ізоляційна рідина
Фізичні			
Питома вага при 25 °С, г/см ³	0,91–0,92	0,87–0,895	0,96
Кінематична в'язкість, <i>cSt</i> (сантистокс)			
0 °С	170–250	30–80	95
40 °С	33–45	8–15	38
100 °С	8–10	1–3	16
Температура застигання, °С	–15...–31	–45...–60	–50
Температура спалаху, °С	310–325	135–170	300 min
Температура займання, °С	354–360	275 min	340
Вологовміст, ррт для сухої рідини	50–100	10–25 ^b	50
Водорозчинність при 25 °С	1200	60	200
Теплофізичні коефіцієнти			
Теплоємність, кал/г·°С	0,50–0,57	0,488	0,363
Теплопровідність, Вт/м·К	0,17 ^a	0,13	0,15
Коефіцієнт розширення, °С ⁻¹	0,0007	0,00073	0,00104
Хімічні — тип	ефіри	вуглеводні	кремнійорганіка
Стійкість до окислення – тест ASTM D 2440	пройшла	пройшла	пройшла
Електричні			
Діелектрична проникність при 25 °С	3,1	2,2	2,71
Об'ємний питомий опір при 25 °С, Ом·см	10 ¹⁴	10 ¹⁴ –10 ¹⁵	10 ¹⁴
Пробивна напруга, кВ			
Тест ASTM D 1816, проміжок між електродами 2 мм	74 ^a	60	–
Імпульсна пробивна напруга, кВ (голка – негативний потенціал)	116 ^a	145	136
Біорозчинність			
Тест СЕС-Л-33 (21 день) [35]	97–99	30	Дуже низька

Примітка: *a* — для ІРРП типу ВІОТЕМР; *b* — змінюється залежно від класів напруги трансформатора

Виконані згідно з вказаним стандартом прискорені випробування за температури 200 °С [5] показали, що ІРРП перевершили нормальний період ресурсного випробування без відмов трансформаторів в окремих коротких циклах. Окріме тривале старіння показало, що ці рідини продовжують термін служби паперової ізоляції значно більше ніж ізоляційні оливи, які використовуються в трансформаторах.

Криогенні рідини використовуються як охолоджувальні та ізоляційні рідини в обладнанні з надпровідними матеріалами. Після відкриття в 1986 році високотемпературних надпровідних (ВТНП) матеріалів, що мають вищу температуру переходу в надпровідний стан, ніж низькотемпературні надпровідні (НТНП) матеріали, основні пошукові роботи зі створення трансформаторів нового покоління ведуться саме в напрямку використання ВТНП-матеріалів і рідин. Ці роботи зосереджені в двох основних напрямках: силові та тягові ВТНП-трансформатори. На даний час, переважним чином в Сполучених Штатах, Європі, Японії, Китаї та Кореї вже існує декілька діючих експериментальних зразків. Обмотки цих ВТНП-трансформаторів виготовлені з матеріалів на основі з'єднань $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}$ (Bi-2212) або $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (Bi-2223) [38]. З самого початку робіт завдяки своїм відмінним діелектричним якостям рідкий азот вважається основною ізоляційною та охолоджувальною рідиною для ВТНП-трансформаторів [39]. Крім того, ця криогенна рідина має одну з найвищих температур кипіння серед інших (77 К або мінус 196 °С

у рідкого азоту проти 4 К або мінус 269 °С у рідкого гелію). Надпровідники, що охолоджуються криогенними рідинами будуть і надалі залишатись предметом перспективних досліджень, оскільки дозволяють суттєво збільшити щільність струму та не мають джоулевих втрат.

Змішані ізоляційні рідини були запропоновані для отримання рідин зі стійкими заданими діелектричними та теплофізичними властивостями з метою використання їх в електрообладнанні, до якого пред'являються підвищені вимоги стосовно вказаних властивостей. Це стосується обладнання спеціального призначення, у т. ч. виготовленого для постачання згідно з окремими вимогами замовника.

Можна вказати наступні приклади змішаних ізоляційних рідин [12]:

- ізоляційну оливу, змішану з синтетичним ефіром, використовують в розподільчих трансформаторах для збільшення температури запалювання та здатності до біологічного розкладання;
- ізоляційна олива, змішана з тетрахлоретиленом є незаймистою рідиною, яка так само використовується в розподільчих трансформаторах;
- ізоляційну оливу, змішану з алкілбензолом використовують в конденсаторах, де для зменшення газоутворення папір просочується ізоляційною рідиною.

Можливо навести і інші приклади, де присутні різні змішувальні складові, а керування фізико-хімічними властивостями змішаних рідин здійснюється зміною співвідношення компонент, які входять в суміш [12, 40].

Нанорідина — це рідина, яка містить присадки у вигляді дрібнодисперсних часток з характерним розміром 0,1–100 нм (наночасток) та певним хімічним складом. Ці присадки можна розділити на три групи: провідні наночастки (Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , ZnO , SiC), напівпровідні наночастки (TiO_2 , CuO , Cu_2O) та діелектричні наночастки (Al_2O_3 , SiO_2 , BN) [41]. Вказані наночастки додають до ізоляційних олив або ІРРП, в результаті чого, отримані під час випробувань значення пробивних напруг для таких рідин зростають. Механізм, через який додавання наночасток збільшує діелектричну міцність ізоляційних рідин, до цього часу повністю не вивчений [41] і є предметом подальших досліджень. Перевагою нанорідин є саме збільшена пробивна напруга, яка дозволить створити більш компактне електрообладнання, що містить рідкі діелектрики.

5. Висновки

1. Ізоляційна олива і до тепер залишається найпоширенішою рідиною, що застосовується у якості діелектрика в електрообладнанні. Покращення характеристик для неї досягається змінами технології її виготовлення, введенням присадок, змішуванням з іншими рідинами. Проте, через наявність ряду особливостей характеристик і вад, ця ізоляційна рідина, з одного боку, не є найкращою для деяких видів електрообладнання, а з іншого (і це достатньо суттєво) — становить певну небезпеку для навколишнього середовища та потребує витрат сировини (нафти), обсяги якої обмежені й використовувати яку більш ефективно для інших потреб. Як наслідок: протягом достатнього часу триває пошук альтернативних олив і ізоляційних рідин.

2. Значна частина з таких альтернативних рідин або завдає певної шкоди здоров'ю людей та оточуючому середовищу (наприклад, хлоровані рідини, фосфористі ефіри і ряд інших), або потребує, крім іншого, збільшення масогабаритних характеристик електрообладнання (наприклад, високомолекулярні вуглеводні, кремнійорганічні рідини та деякі інші), а ще і має більшу вартість. Тому деякі із них заборонені для використання, деякі — обмежено використовуються індивідуально, а, здебільшого, застосовуються як компоненти для змішування з іншими ізоляційними рідинами, наприклад, з тією ж самою ізоляційною оливою

3. Певною мірою революційним, можна вважати використання ізоляційних рідин рослинного походження. Сировинні ресурси для цих рідин є відновлюваними та не мають застережень до обмеження (особливо для країн відповідної кліматичної зони), а самі рідини повністю піддаються біорозкладу, тобто являються екологічно безпечними. Діелектричні характеристики таких рідин за значеннями показників майже однакові з аналогічними характеристиками ізоляційної оливи, що обумовлює поширення застосування їх в електрообладнанні. Отже ІРРП є і можуть бути надалі предметом перспективного напрямку досліджень як з точки зору накопичення досвіду експлуатації, так і в частині пошуку технологій підвищення їх термоокисної стабільності та електричної міцності, коригування інших фізико-хімічних показників.

4. Достатньо перспективним є продовження досліджень у напрямку застосування нанотехнологій, коли додаванням присадок у вигляді наночасток певного хімічного складу досягається покращення окремих показників

ізоляційних рідин, особливо, одного із найважливіших — їх пробивної напруги.

5. Докорінно іншим, від вказаного раніше, являються дослідження у напрямку створення електрообладнання з криогенними ізоляційними рідинами. Проте на сучасному технічному рівні це, скоріш за все, буде вимагати витратного виготовлення та експлуатації відповідного обладнання (електротехнічного і допоміжного). Напевне це будуть одиниці устаткування окремого електроенергетичного призначення.

Література

1. Лизунов, С. Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. — М.: Энергоиздат, 2004. — 616 с.
2. Fofana, I. Specific investigations to quantify heavy damage causes on loading resistor module [Text] / I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach, M. Farzaneh // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2006. — Vol. 13, № 3. — P. 593–600. doi:10.1109/tdei.2006.1657973
3. Rouse, T. O. Mineral oil in transformers [Text] / T. O. Rouse // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 1998. — Vol. 14, № 3. — P. 6–16. doi:10.1109/57.675572
4. Sierota, A. Electrical insulating oils. Part 1. Characterization and pre-treatment of new transformer oils [Text] / A. Sierota, J. Rungis // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 1995. — Vol. 11, № 1. — P. 8–20. doi:10.1109/57.342040
5. 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
6. Thomas, P. Biodegradable dielectric liquids for transformer applications [Text] / P. Thomas // Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2005). — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2005. — Vol. 1. — P. 135–136. doi:10.1109/iseim.2005.193350
7. Beroual, A. Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics [Text] / A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A. J. Schwabe, H. Yamashita, K. Yamazawa, M. Danikas, W.D. Chadband, Y. Torshin // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 1998. — Vol. 14, № 2. — P. 6–17. doi:10.1109/icdl.2011.6015473
8. Asano, R. Reducing environmental impact and improving safety and performance of power transformers with natural ester dielectric insulating fluids [Text] / R. Asano, S. A. Page // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2014. — Vol. 50, № 1. — P. 134–141. doi:10.1109/tia.2013.2269532
9. Experiences in Service with New Insulating Liquids [Electronic resource]: CIGRE Report 436 / Working Group A2.35. — CIGRE, 2010. — Available at: \www/URL: http://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/New_Experiences_in_Service_with_New_Insulating_Liquids.pdf
10. Oxidation Stability of Insulating Fluids [Electronic resource]: CIGRE Report 526 / Working Group D1.30 // CIGRE International Council on Large Electric Systems. — 2013. — Available at: \www/URL: http://d1.cigre.org/Publications/Technical-Brochures
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. 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
13. Липштейн, П. А. Трансформаторное масло [Текст] / П. А. Липштейн, М. И. Шахнович. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 296 с.
14. Sokolov, V. Transformer Fluid: A Powerful Tool for the Life Management of an Ageing Transformer Population [Text] / V. Sokolov, A. Bassetto, T. V. Oommen, T. Hauptert, D. Hanson // Proceedings of TechCon 2001. — North America, 2001. — P. 1–6.
15. Nisbet, C. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [Text] / C. Nisbet, P. LaGoy // Regulatory Toxicology and Pharmacology. — 1992. — Vol. 16, № 3. — P. 290–300. doi:10.1016/0273-2300(92)90009-x
16. Casserly, E. Corrosive Sulfur-Free Naphthenic Transformer Oil Through Modern-Day Severe Hydroprocessing A Refiner's Experience [Text] / E. Casserly, J. Rasco, K. Patrick, N. Herlenius // International Colloquium Transformer Research and Asset Management Dubrovnik, Croatia, May 16–18, 2012. — Ergon North & South America, 2012. — P. 1–8.

17. Nelson, J. K. An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures [Text] / J. K. Nelson // IEEE Transactions on Electrical Insulation. — 1989. — Vol. 24, № 5. — P. 835–847. doi:10.1109/14.42161
18. McShane, C. New safety dielectric coolants for distribution and power transformers [Text] / C. McShane // IEEE Industry Application Magazine. — 2000. — Vol. 6, № 3. — P. 24–32. doi:10.1109/2943.838037
19. Hoch, D. A. Breakdown behavior of a non-flammable synthetic liquid under conditions of a particle and contaminations [Text] / D. A. Hoch, J. P. Reynders // Proceedings of the 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, Louisiana, 28 August – 1 September 1989. — Mississippi State University, 1989. — Paper 13.07.
20. Fofana, I. Retrofilling conditions of high voltage transformers [Text] / I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2001. — Vol. 17, № 2. — P. 17–30. doi:10.1109/57.917528
21. Hoch, D. A. The effect of increasing concentration of perchlorethylene on the electrical performance of mineral oil/perchlorethylene mixtures [Text] / D. A. Hoch, J. P. Reynders // Proceedings of the 7th International Symposium on High Voltage Engineering. — Dresden, Germany, 1991. — Paper 21.05.
22. Senkevitch, E. D. New synthetic liquids for transformers [Text] / E. D. Senkevitch, V. G. Arakelian, T. V. Glasunova, V. A. Lipshtein, T. I. Morozova, N. M. Panova // CIGRE Symposium. — 1987. — Paper 500-04.
23. Simmons, M. A. Insulating liquids used in fluid filled cables [Text] / M. A. Simmons // IEE Colloquium on An Engineering Review of Liquid Insulation. — 1997. — P. 7/1–7/2. doi:10.1049/ic:19970017
24. Claiborne, C. C. Transformer fluids [Text] / C. C. Claiborne, H. A. Pearce // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 1989. — Vol. 5, № 4. — P. 16–19. doi:10.1109/57.35599
25. Borsi, H. Dielectric behaviour of silicone and ester fluids for use in distribution transformers [Text] / H. Borsi // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 1991. — Vol. 26, № 4. — P. 755–762. doi:10.1109/14.83699
26. Perrier, C. Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters [Text] / C. Perrier, A. Beroual, J.-L. Bessede // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2006. — Vol. 13, № 3. — P. 556–564. doi:10.1109/tdei.2006.1657968
27. Oommen, T. V. Introduction of a new fully biodegradable dielectric fluid [Text] / T. V. Oommen, C. C. Claiborne, E. J. Walsh // IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference. — 1998. — P. 3/1–3/4. doi:10.1109/texcon.1998.679223
28. Oommen, T. V. A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification [Text] / T. V. Oommen, C. C. Claiborne, E. J. Walsh, J. P. Baker // Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — 2000. — Vol. 1. — P. 308–312. doi:10.1109/ceidp.2000.885288
29. Stockton, D. P. Seed-oil-based coolants for transformers [Text] / D. P. Stockton, J. R. Bland, T. McClanahan, J. Wilson, D. L. Harris, P. McShane // IEEE Industry Applications Magazine. — 2009. — Vol. 15, № 1. — P. 68–74. doi:10.1109/mias.2008.930887
30. Lewand, L. Laboratory testing of natural ester dielectric liquids [Text] / L. Lewand // Neta World. — 2004. — P. 1–4.
31. Dielectric fluid for use in power distribution equipment [Electronic resource]: Patent US 5766517 A / Goedde G. L., Gauger G. A., Lapp J., Yerges A. P.; assignee: Cooper Industries, Inc. — № 08/576,229; filed 21.12.1995; published 16.06.1998. — Available at: \www/URL: <https://www.google.si/patents/US5766517>
32. Electrical transformers containing electrical insulation fluids comprising high oleic acid oil compositions [Electronic resource]: Patent US 5949017 A / Oommen T. V., Clibome C. C.; assignee: Abb Power T&D Company Inc. — № 08/778,608; filed 06.01.1997; published 07.09.1999. — Available at: \www/URL: <https://www.google.com.ar/patents/US5949017>
33. Мендес, Х. К. Более рациональное использование растительного масла АВВ ВЮТЕМР в высоковольтных силовых трансформаторах [Текст] / Х. К. Мендес, А. С. Г. Рейс, Е. К. Ногава, К. Ферра, А. Х. А. Л. Мартинс, А. К. Пасос // АБВ Ревию. — 2007. — № 3. — С. 53–57.
34. Электроизоляционная жидкая композиция на основе растительного масла [Электронный ресурс]: Патент РФ № 2405223 / Менахин Л. П., Торшин Ю. В., Шарковский В. А.; патентообладатель: Федеральное государственное предприятие «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина». — опубл. 27.11.2010. — Режим доступа: \www/URL: <http://bankpatentov.ru/node/508733>
35. Boss, P. New insulating fluids for transformers based on biodegradable high oleic vegetable oil and ester fluid [Text] / P. Boss, T. V. Oommen // IEE Colloquium on Insulating Liquids. — 1999. — P. 7/1–7/10. doi:10.1049/ic:19990669
36. Lewand, L. Laboratory evaluation of several synthetic and agricultural-based dielectric liquids [Text] / L. Lewand // Doble International Client Conference, 5E. — MA USA, Boston, 2001.
37. Oommen, T. V. Biodegradable electrical insulation fluids [Text] / T. V. Oommen, C. C. Claiborne, J. T. Mullen // Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 1997. — P. 465–468. doi:10.1109/eic.1997.651191
38. Chen, X. Development and technology of HTS transformers [Text] / X. Chen, J. Jin // Research Communication. — 2007. — Vol. 1, № 1. — P. 1–7.
39. Gerhold, J. Cryogenic liquids — a prospective insulation basis for future power equipment [Text] / J. Gerhold // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2002. — Vol. 9, № 1. — P. 68–75. doi:10.1109/94.983888
40. Fofana, I. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. Part 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
41. Lv, Y. Z. Recent progress in nanofluids based on transformer oil: preparation and electrical insulation properties [Text] / Y. Z. Lv, Y. Zhou, C. R. Li, Q. Wang, B. Qi // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2014. — Vol. 30, № 5. — P. 23–32. doi:10.1109/mei.2014.6882597

ОБЗОР АЛЬТЕРНАТИВ ЗАМЕНЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО МАСЛА В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Выполнен обзор ряда публикаций, посвященных вопросам свойств и применения изоляционных жидкостей. Внимание уделено достижениям, направленным на решение проблемы замены изоляционного минерального масла другими изоляционными жидкостями, также положительным и отрицательным последствиям применения таких жидкостей. Отмечено, что направлением ближайшей перспективы является продолжение работ по исследованиям и применению изоляционных жидкостей растительного происхождения и наножидкостей.

Ключевые слова: изоляционные жидкости, углеводороды, эфиры, 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.

Троценко Євгеній Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки та електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: trotsenko@email.ua.

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.

Троценко Евгений Александрович, 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.

Trotsenko Yevgeniy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: trotsenko@email.ua