

УДК 621.315.615 : 621.319.4

*А.П. МАЛЮШЕВСЬКА, С.О. ТОПОРОВ***ВИВЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ПОЛІМЕТИЛСИЛОКСАНОВОЇ РІДИНИ ПРИ ЇЇ КОНТАКТУВАННІ З ПЛІВКОВИМИ
ЕЛЕМЕНТАМИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ
КОНДЕНСАТОРІВ ПІД ДІЄЮ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР**

Вивчено зміну електрофізичних властивостей поліметилсилоксанової (ПМС) рідини як такої, що може використовуватися для просочення плівкових діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів. Визначено низьку ступінь термостимульованої взаємодії поліметилсилоксанової рідини з поліпропіленовою та поліетилентерефталатними плівками. На прикладі рідини ПМС–20 показано високу термостабільність електрофізичних властивостей органосилоксанових рідин за винятком високої чутливості її короткочасної електричної міцності до виникнення електророзрядних явищ.

Ключові слова: просочений плівковий діелектрик, органосилоксанові рідини, короткочасна електрична міцність.

Вступ. Конденсаторні просочуючі рідини є надзвичайно важливим й у той же час досить проблемним компонентом діелектричної системи. До них пред'являються 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]. Ці вимоги суперечливі й не можуть бути повністю реалізовані, що призводить до обмежень при експлуатації електроізоляційних рідин.

Проведені в ІНПТ 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 неполярною 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. Але неминучим для внутрішньої ізоляції електроустаткування є старіння, яке 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].

Теплова форма старіння характерна для усіх компонентів просоченої діелектричної системи високовольтних електротехнічних пристроїв. Відомо, що експлуатація високовольтних імпульсних конденсаторів пов'язана з тепловиділенням, яке обумовлене наявністю втрат в робочому діелектрику, струмовідних частинах та додаткових втрат в корпусній ізоляції. Головними ознаками теплового старіння просочуючої рідини є її термоокисна деструкція та термостимульо-

вана взаємодія з іншими елементами просоченої діелектричної системи.

Особливу увагу привертає можливість використання в якості електроізоляційних матеріалів рідких кремнійорганічних полімерів, які є високомолекулярними сполуками, що містять атоми кремнію в мономерній ланці. Перед усім поліорганосилоксани характеризуються високою термостійкістю, обумовленою високою енергією зв'язку Si-O, а також відмінними діелектричними характеристиками. З кремнійорганічних рідин варто звернути увагу на поліметилсилоксанові (ПМС), які мають високу нагрітостійкість, хімічну інертність, низьку гігроскопічність, низьку температуру застигання, високі електричні характеристики в широкому інтервалі частот і температур [3]. Діелектричні властивості поліметилсилоксанових рідин роблять їх перспективними і для використання в силовому конденсаторобудуванні, особливо в умовах роботи конденсаторів при підвищених температурах оточуючого середовища. Такі умови виникають, наприклад, при експлуатації високовольтних імпульсних конденсаторів в складі заглиблених пристроїв для електророзрядної обробки призабійних зон нафтових та водозабірних свердловин, глибина яких може сягати декількох тисяч метрів, а температура всередині коливається від 60 до 100 °С. На сьогодні використання ПМС як просочуючої рідини для конденсаторів відомо, однак інформація про дослідження її властивостей стосовно до силових конденсаторів, що працюють при підвищеній температурі, практично відсутня.

Метою даної роботи було встановлення факторів, що впливають на працездатність поліметилсилоксанової рідини як рідкого електроізолюючого компонента просоченої діелектричної системи високовольтних імпульсних конденсаторів під впливом підвищеної температури.

Необхідно відзначити, що визнаним серйозним недоліком, що знижує надійність і працездатність плівкового просоченого діелектрика, а також конденсатора в цілому, є погіршення електрофізичних характеристик плівки й рідини внаслідок поступового розчинення полімеру в рідкому діелектрику. Ступінь такої взаємодії зазвичай визначається хімічним складом і будовою компонентів діелектричної системи секції

конденсатора [4]. Взаємодія може реалізуватися як набрякання плівки з наступним розчиненням переважно аморфної складової полімеру й переходом іонів металів, що знаходяться в ній, іоногенних домішок і технологічних забруднень в просочуючу рідину.

Методика експерименту. При дослідженні впливу полімерної плівки на діелектричні втрати просочуючої рідини (ПМС-20 ДСТУ 13032-77), 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 поліетилен-терефталатна плівка ПЭТ-КЭ ДСТУ 24234-80 товщиною 15 мкм, як такі, що активно застосовуються в сучасному конденсаторобудуванні. Зразки плівок являли собою стрічки шириною 80 мм, та довжиною, що відповідала вищенаведеному масовому співвідношенню рідина-плівка. Зразки плівок попередньо висушувалися при температурі 60 °С протягом двох годин у повітряному середовищі і поміщалися в скляні ємності. Потім плівки заливалися попередньо відфільтрованою, висушеною і дегазованою поліметилсилоксановою рідиною, після чого ємності встановлювалися в термостат. Крім того, температурному впливу піддавалися зразки ПМС рідини без плівки. Температура старіння зразків рідини (з плівками і без них) витримувалась постійною – 100 °С. Загальний час старіння становив 300 годин, кожні 50 годин проводилися виміри тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$), діелектричної проникності (ϵ), питомого об'ємного електричного опору (ρ_V) відповідно до ДСТУ 6581-75. Температура, при якій проводили виміри цих електрофізичних характеристик була постійною – 100 °С. Після нагрівання протягом 150 і 300 годин знімалися також залежності тангенса кута діелектричних втрат проб рідини від температури (у діапазоні від 25 до 100 °С), на основі яких планувалася побудова залежностей $\ln(\text{tg } \delta) = f(1/T)$, необхідних для оцінки енергії активації провідності згідно [5]. На цих етапах термостаріння ПМС рідини для отримання інформації щодо можливого впливу термоокисної деструкції на її експлуатаційні властивості проводилось також вимірювання короточасної електричної міцності відповідно до ДСТУ 6581-75.

Результати і обговорення. Термостаріння протягом 300 годин в присутності полімерних плівок не виявило помітного впливу на діелектричну проникність і питомий об'ємний електричний опір рідини ($\epsilon_{\text{сп}} = 2,78 \pm 0,04$, $\rho_{V\text{сп}} = (1,16 \pm 0,04) \cdot 10^{12}$ Ом·м), причому не було виявлено чітких закономірностей змін цих параметрів. Такі коливання електрофізичних характеристик не можуть бути прийняті як показові для оцінювання ступеня взаємодії рідкого і твердого діелектриків та інтенсивності термоокисної деструкції ПМС рідини.

З метою вивчення зміни енергії активації провідності, якості конкретної партії ПМС рідини та її схи-

льності до зміни діелектричних властивостей в результаті термоокисної деструкції проби вихідної і зістареної без плівок протягом 150 і 300 годин ПМС рідини були досліджені згідно ДСТУ 6581-75, що дозволило отримати температурні залежності $\text{tg } \delta$. Важливо, що тангенс кута діелектричних втрат змінювався дуже незначним чином в ході термостаріння самої поліметилсилоксанової рідини. Його середнє значення становило для вихідної ПМС рідини – 0,0008; після термостаріння протягом 150 годин – 0,00083; після термостаріння протягом 300 годин – 0,00085, тобто максимальний прийнятий в цих дослідженнях час старіння призводить до збільшення тангенса кута діелектричних втрат на величину близько 6%. Спроба отримати залежності $\ln(\text{tg } \delta) = f(1/T)$ для встановлення зміни енергії активації електричної провідності ПМС рідини в ході її термостаріння показали, що енергія активації ПМС рідини не залежить від часу термовпливу у межах експерименту (300 год).

Після термостаріння ПМС рідини разом з плівковими компонентами твердого конденсаторного діелектрика також були отримані температурні залежності тангенса кута діелектричних втрат. Але, як і у випадку термостаріння без плівок ПМС, рідина показала високу термостабільність: по мірі збільшення температури тангенс кута діелектричних втрат збільшується дуже незначно (не більше ніж на 8–9 %). Таким чином, діелектричні втрати і енергія активації провідності ПМС рідини практично не залежать від температурного впливу і від присутності в ній поліпропіленової або поліетилентерефталатної плівок. Можливо, для ПМС рідини, що контактувала в ході термостаріння з поліпропіленовою та поліетилентерефталатною плівками, невелике зростання тангенса кута діелектричних втрат обумовлено не стільки взаємодією безпосередньо плівок і рідини, скільки переходом в рідину забруднень, неминуче наявних на поверхні плівок.

Для кількісної оцінки ступеню зміни діелектричних втрат просочуючої електроізоляційної рідини в ході термостаріння в контакт з різними полімерними плівками вивчався коефіцієнт дестабілізації, який визначався відношенням тангенса кута діелектричних втрат рідини після старіння із плівкою до тангенса кута діелектричних втрат рідини після старіння без плівки. Тут ПМС рідина також показала дуже високу термостабільність, в тому числі і при термостарінні в присутності поліетилентерефталатної і поліпропіленової плівок протягом 300 годин. Коефіцієнт дестабілізації коливався для неї близько значення 1 без чітких закономірностей. Це підтверджує інертність досліджуваної ПМС рідини по відношенню до досліджуваних полімерних плівок і в той же час виключає можливість контролю цієї характеристики ПМС рідини в якості електроізоляційної при проведенні натурних випробувань.

Вивчення впливу термостаріння ПМС рідини на стабільність її короточасної електричної міцності ($E_{\text{нр}}$) показало наступне. Спочатку середнє значення короточасної електричної міцності рідин визначалося за даними 10 послідовних пробів заповненої електроізоляційною рідиною комірки, з інтервалами між ними

5 хвилин. Після кожного пробою рідина між електродами акуратно перемішувалася, для видалення продуктів розкладання з міжелектродного проміжку згідно ДСТУ 6581-75, п.4.2.4. Результати досліджень по визначенню короточасної електричної міцності рідких діелектриків наведені в таблиці 1. Але, отримані високі значення коефіцієнта варіації (35 і 27% після нагріву протягом 150 і 300 годин відповідно), обчислені для середнього значення $E_{пр}$ ПМС рідини, не дозволяють говорити про однорідність ряду вимірюваних значень і високу достовірність отриманих даних.

Аналіз залежності $E_{пр}$ ПМС рідини від числа пробовів (рис. 1) дозволив припустити, що в результаті пробою ПМС рідини в ній відбуваються зміни, які знижують достовірність подальших одержуваних даних по короточасній електричній міцності. Такі результати потребували перегляду методики визначення короточасної електричної міцності досліджуваної електроізоляційної рідини.

Таблиця 1 – Короточасна електрична міцність ПМС рідини в ході термостаріння

Стан рідини	Умови проведення вимірювань			
	Дані отримані шляхом вимірювання згідно ДСТУ 6581-75, п.4.2.4		Дані отримані шляхом вимірювання згідно ДСТУ 6581-75, п.4.2.5	
Рідина у вихідному стані	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	19,9±5,4	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	26,0±1,8
	$K_{вар}$, %	16	$K_{вар}$, %	6
Рідина після 150 год нагрівання	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	7,0±3,8	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	17,5±1
	$K_{вар}$, %	35	$K_{вар}$, %	4
Рідина після 300 год нагрівання	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	3,9±1,6	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	9,6±2,0
	$K_{вар}$, %	27	$K_{вар}$, %	17

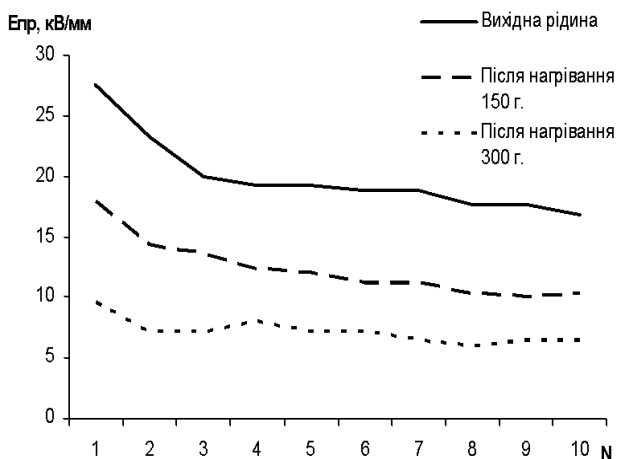


Рисунок 1 – Залежність короточасної електричної міцності від числа пробовів для ПМС рідини

Скориставшись ДСТУ 6581-75, п. 4.2.5, провели наступний експеримент. Кожен пробій ПМС рідини здійснювали в окремі порції рідини, взятій з однієї і

тієї ж проби, отримані результати наведені в табл. 1. Таким шляхом були отримані дані, достовірність яких значно вища (коефіцієнт варіації не перевищує 17%). Абсолютні значення середньої короточасної електричної міцності ПМС рідини, виміряної таким способом, виявилися вище (в 1,3 рази для вихідної рідини, в 2,5 рази – для рідини після термостаріння протягом 150 годин, в 2,46 рази – для рідини після 300 годин нагрівання), ніж рідини, підданої пробою без заміни порцій в комірці.

Одночасно з цим експериментом проводилось за тою же методикою дослідження зміни експлуатаційних властивостей нафтового масла (трансформаторне масло Т-1500) в результаті його термостаріння. Спроби побудувати залежності короточасної електричної міцності для проб трансформаторного масла не дали аналогічної закономірності зміни короточасної електричної міцності від числа пробовів.

Отримані дані представляють безсумнівний практичний інтерес. Стабільність електрофізичних властивостей ПМС рідини, підданої термовпливу, а також її інертність по відношенню до поліпропіленової і поліетиленетерефталатної плівок не викликає сумнівів: тривале термостаріння, в тому числі в присутності таких плівок, не показало істотного впливу ані на тангенс кута діелектричних втрат, ні на енергію активації провідності, ні на діелектричну проникність, ні на питомий об'ємний опір. З іншого боку, в даний час електричний пробій органосилоксанових рідин вивчений недостатньо і в літературних джерелах не знайдено даних про продукти їх розкладання, що з'являються в процесі росту лідера, існування каналу розряду, генезису парогазової порожнини. В роботах [6, 7] зазначається, що при пробі рідких поліорганосилоксанів утворюється значно більше продуктів розкладання, які знижують пробивну напругу при повторних пробоях, ніж при пробі вуглеводневих рідин. Ці продукти являють собою в основному сполуки кремнію з вуглецем, а згідно з результатами досліджень автора [8] ще і велику кількість газоподібних продуктів: H_2 , CO , C_2H_2 , C_2H_4 . На тлі останнього твердження недостатніми представляються дані про газостійкість ПМС рідини, тобто здатність виділяти або поглинати газ під впливом зовнішніх факторів, особливо електричного поля. Відомо, що як критерій, що зумовлює схильність діелектричної рідини до розкладання під дією високоградієнтних електричних полів, прийнятий саме показник газостійкості. Можливо, ПМС рідина під впливом електричних розрядів і супутніх їм явищ поводить як газовиділяюча, а, як відомо, робота висковольтних імпульсних конденсаторів зазвичай пов'язана з виникненням як мінімум початкових часткових розрядів. Загальне зниження короточасної електричної міцності ПМС рідини в результаті термостаріння може бути пояснено тим, що якщо на початку досліджень зразки рідини були підготовлені (дегазовані) шляхом термовакuumного сушіння протягом 48 годин, то в ході експерименту в процесі термостимульованого старіння вимірювання $E_{пр}$ рідина контактувала з повітрям, що могло призвести до появи в ній газових включень, які створюють сприятливі умови для про-

бою рідини за «електричним» механізмом. За умов правомірності гіпотези про низьку газостійкість органосилоксанових рідин можна зробити припущення про різко негативний вплив факту появи газоподібних включень в ПМС рідині на її короточасну електричну міцність. Це є можливим поясненням відмови від використання ПМС рідини в якості просочуючого діелектрика ізоляції високовольтних імпульсних конденсаторів провідними виробниками та їх титанічні зусилля зі створення нових газостійких зразків просочуючих рідин. Безсумнівно, це питання представляє великий науковий інтерес і потребує подальших досліджень.

Висновки. Таким чином, для імпульсних високовольтних конденсаторів, де електроізоляційні рідини працюють при дуже великій напруженості електричного поля, в випадку використання ПМС рідини як просочуючого діелектрика, необхідно обмежувати напруженість електричного поля в конкретній просоченій діелектричній системі шляхом визначення напруги виникнення початкових часткових розрядів, а також враховувати ступінь поглинання створених частковими розрядами газів і опірність рідини до їх виділення.

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 пленочным диэлектриком от режимов эксплуатации / И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, И.Г. Михайлов, Л.И. Онищенко,

Т.А. Фецуц // Электротехника. – 2006. – №6. – С. 36–41. 3. Borsi H. Dielectric behaviour of silicone and ester fluids for use in distribution transformers / H. Borsi // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1991. – Vol. 26, № 4. – P. 755–762. 4. Andreev A.M. Degradation of the impregnated polypropylene insulation of power capacitors under operating conditions / A.M. Andreev, N.M. Zhuravleva, M. Yevtich // Electrical Technology Russia. – 2002. – № 3. – P. 96–106. 5. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков / И. Адамчевский. – Л.: Энергия, 1972. – 295 с. 6. Андрианов К.А. Синтетические жидкие диэлектрики / К.А. Андрианов, В.В. Скипитеров. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 2002. – 176 с. 7. Бальгин И.Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков / И.Е. Бальгин. – М.-Л.: Энергия, 2004. – 228 с. 8. Малошевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии / П.П. Малошевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kuchinskii, G.S. Silovye elektricheskie kondensatory. G.S. Kuchinskii, N.I. Nazarov. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 320. Print. 2. Grebennikov I.Yu. Issledovanie zavisimosti resursa vysokovol'tnyh impul'snyh kondensatorov s plenochnym dielektrikom ot rejimov ekspluatatsii. I.Yu. Grebennikov, V.I. Gun'ko, A.Ya. Dmitrishin, I.G. Mihailov, L.I. Onischenko, T.A. Feschuk. Elektrotehnika. 2006. No 6. 36–41 Print. 3. Borsi H. Dielectric behaviour of silicone and ester fluids for use in distribution transformers. IEEE Trans. Electr. Insul. 1991. Vol. 26, 4. 755–762. Print. 4. Andreev A.M. Degradation of the impregnated polypropylene insulation of power capacitors under operating conditions. A.M. Andreev, N.M. Zhuravleva, M. Yevtich. Electrical Technology Russia. 2002. No 3. 96–106. Print. 5. Adamchevskii I. Elektricheskaya provodimost' jidkih dielektrikov. I. Adamchevskii. Leningrad: Energiya, 1972. 295 Print. 6. Andrianov K.A. Sinteticheskie jidkie dielektriki. K.A. Andrianov, V.V. Skipiterov. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1962. 176. Print. 7. Balygin I.E. Elektricheskaya prochnost' jidkih dielektrikov. I.E. Balygin. Moscow-Leningrad: Energiya, 1964. 228. Print. 8. Malyushevskii P.P. Osnovy razryadno-impul'snoi tehnologii. P.P. Malyushevskii. Kyiv: Naukova dumka, 1983. 272. Print.

Поступила (received) 25.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Малюшевська Антоніна Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник ІПТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Malyushevska Antonina Pavlivna – Candidate of of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, senior staff scientist of IPPT NAS of Ukraine, Nikolaev; tel.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Топоров Сергій Олегович – провідний інженер, ІПТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Toporov Sergiy Olegovich – senior engineer, IPPT NAS of Ukraine, Nikolaev; tel.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.