

ДИСИПАЦІЯ ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОМОЛЕКУЛЯРНИМИ РЕЧОВИНАМИ ПІД ЧАС ЗОНДУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ БАГАТОЖИЛЬНИХ КАБЕЛІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Г.В. Безпрозванних*, докт. техн. наук
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.
E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpі.edu.ua

Запропоновано модель кусково-однорідного між-фазного простору багатожильних кабелів з урахуванням впливу тріщин, орієнтованих уздовж силових ліній електричного поля. Тріщини заповнено низькомолекулярними речовинами. Розглянуто випадок зондувального електричного поля за умови значної тангенціальної компоненти. Визначено еквівалентні значення тангенсу кута діелектричних втрат за різних параметрів низькомолекулярних речовин у тріщинах поліетиленової ізоляції провідника перерізом 2,5 мм². Еквівалентний тангенс кута діелектричних втрат зростає у (3-20) разів під час змінення дисипації електричної енергії низькомолекулярними речовинами від 10% до 100% у тріщині, що становить 1% від товщини неушкодженої ділянки поліетиленової ізоляції. Отримано розподіл електричного поля для загального випадку накопичення низькомолекулярних продуктів у капілярах, утворених щілиноподібними зазорами між ізольованими жилами. Сильне електричне поле в меншій частині зазору між ізольованими жилами, яке виникає за потенціалу жили 1 кВ, сприяє поглиненню капіляром продуктів розкладання як твердої поліетиленової ізоляції, так і водяної пари з атмосфери у разі неекранованих конструкцій багатожильних кабелів. Несиметрична конфігурація зондувального електричного поля зі значною тангенціальною складовою дає змогу виявити низькомолекулярні продукти розкладання твердої полімерної ізоляції, наявність яких є ознакою її старіння. Відмінності, що експериментально спостерігаються у величині $\text{tg}\delta$ за різних схем обстеження багатожильних кабелів, пов'язані більшою мірою з нерівномірним розподілом по перерізу кабелю речовин, що розсіюють електричну енергію, а не зі зміною структури зондувального електричного поля. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: багатожильні кабелі атомних електричних станцій, низькомолекулярні речовини, зондувальне електричне поле, тангенс кута діелектричних втрат.

Вступ.

Безпечна та ефективна експлуатація атомних електричних станцій (АЕС) України є однією з найважливіших проблем, що стоїть перед сучасною прикладною наукою.

На даний час одним з пріоритетних напрямків модернізації діючих АЕС є продовження строку їхньої експлуатації [1, 2]. Зазвичай, розрахунковий термін експлуатації ядерних реакторів становить 30-40 років. Дані Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) показують, що станом на квітень 2022 року у світі 133 атомні енергоблоки експлуатувалися більше 40 років, тоді як 164 блоки перевищили 30 років експлуатації. Рівень технологічного розвитку окремих країн проявляється в різних підходах до вирішення питань терміну експлуатації атомної енергетики. Так, Франція є одним із піонерів, яка поставила питання про продовження терміну експлуатації атомних енергоблоків до 80-и років. Наразі у Франції працює 56 атомних реакторів та 14 – остаточно виведенні з експлуатації.

Задля обґрунтування можливості продовження строку експлуатації енергоблоків АЕС необхідно виконати значний обсяг науково-технічних робіт з різних аспектів технології для забезпечення експлуатації енергоблоків. Безпека АЕС повністю залежить від безперебійної роботи вимірювального та контрольного обладнання. З метою продовження терміну експлуатації АЕС понад 40 років та будівництвом нових блоків АЕС із строком експлуатації 60 років необхідно проводити дослідження у сфері управління старінням та кваліфікації обладнання, у тому числі й кабелів АЕС [3–8]. У цьому контексті електричні кабелі АЕС є критично важливими компонентами через їхню дуже значну кількість в межах всього об'єкту з надскладною задачею їхньої заміни. На одному блоці АЕС зазвичай знаходиться близько 1500 км силових, контрольних, контрольно-вимірювальних та інших кабелів у більш ніж 25000 ланцюгах, багато з яких вичерпали встановлений ресурс, інші наближаються до завершення планових термінів експлуатації [9].

© Безпрозванних Г.В., 2024

* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>

Наслідки старіння кабелів, особливо деградація електроізоляційних матеріалів, поступово відчуваються в усьому світі з початку експлуатації АЕС. Деградація матеріалів продовжуватиметься у міру старіння АЕС. Продовження ліцензій на експлуатацію атомних енергоблоків пов'язано з працездатністю кабелів у тому числі. Непередбачена та неконтрольована структурна деградація кабелів, що експлуатуються на АЕС, може призвести до значної втрати резервів безпеки. Це потребує продовження робіт щодо оцінки технічного стану кабелів АЕС [9].

Постановка проблеми. Конструктивною особливістю багатожильних кабелів (контрольних і силових) є неоднорідність діелектрику в ізоляційних проміжках між жилами, жилами та екранами [9–11]. У контрольних кабелях між ізолюваними жилами є повітряні щілиноподібні зазори (мікрокапіляри), що володіють гігроскопічними властивостями (тобто здатністю поглинати водяні пари з атмосфери у разі неекранованих конструкцій кабелів та низькомолекулярної речовини розкладання самої полімерної ізоляції). У силових кабелях з паперово-масляною ізоляцією крім мікронеоднородностей, обумовлених різницею властивостей клітковини і просочення, є макронеоднорідності властивостей фазної та поясної ізоляції, міжфазного заповнення.

Так, у багатожильних контрольних кабелях ряд ізолюваних жил стикаються одна з одною, утворюючи діелектричні клини (див. рис. 3, а). У вільному просторі між жилами повинно знаходитися повітря. В той же час експерименти свідчать, що діелектричні втрати у край нерівномірно розподіляються по перерізу багатожильних кабелів, які тривалий час працювали, зокрема, в гермопроходках на АЕС [10]. Якщо розсіювання енергії змінного електричного поля пов'язувати з низькомолекулярними домішками (наприклад, продуктами розкладу полімерів в результаті термічного або радіаційного старіння, парами води, адсорбованими окисненою поверхнею електричної ізоляції жил, особливо мікрокапілярів, що утворюються в зоні їхнього контакту), то ці домішки розподіляються переважно по периферії кабелю (ближче до металевої або полімерної оболонки), а не в центрі кабелю. Відмінність за величиною тангенса кута діелектричних втрат становить від 2 до 10 разів залежно від того, на внутрішніх або зовнішніх повивах концентрується електричне поле, що зондує.

Причина полягає в утворенні низькомолекулярних речовин (НМР) розкладання ізоляції, що мають ще гідрофільні властивості – здатність поглинати атмосферну вологу. У разі прикладання змінного зондувального електричного поля за умови нормального до меж поділу середовищ напряму силових ліній у зоні контакту ймовірність виявлення домішок мала. Послідовно з відносно тонким шаром домішки включена тверда ізоляція жил з високими діелектричними властивостями. Падіння напруги на шарі домішки мале, і навколо жили практично створюється радіальне електричне поле, що є неефективним для виявлення домішок. Відповідно, схеми обстеження "кожна жила – проти всіх інших" призводять до виникнення навколо обстежуваної жили практично радіального поля, що є малопродатним та неефективним для виявлення НМР.

Метою даної роботи є визначення впливу поверхневих шарів з низькомолекулярними речовинами з підвищеними втратами на загальний тангенс кута діелектричних втрат за умови тангенціального зондувального електричного поля під час обстеження кабелів задля підвищення ефективності виявлення ознак старіння ізоляції багатожильних кабелів АЕС.

Випадок зондувального електричного поля за умови значної тангенціальної складової під час обстеження кабелів. Цей випадок у чистому вигляді спостерігається для тріщин в ізоляції, заповнених низькомолекулярними речовинами (рис. 1). На рис. 1

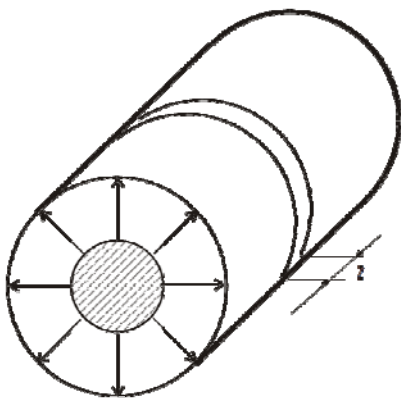


Рис. 1

представлено модель тріщини (z) в ізоляції, орієнтованої вздовж силових ліній поля (випадок тангенціального поля).

Ємності нормальної ("неушкодженої") частини ізоляції (C) та тріщини (C_z) у цьому випадку включаються паралельно. Виражаючи ці величини через геометричні розміри, знаходиться результуючий тангенс кута діелектричних втрат

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 \cdot l}{\ln(R_2 / R_1)}, \quad C_z = \frac{2\pi\epsilon_z\epsilon_0 \cdot z}{\ln(R_2 / R_1)},$$

де l – довжина нормальної частини ізоляції; z – довжина тріщини; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; ϵ , ϵ_z – діелектричні проникності ізоляції та НМР у тріщині; R_1 , R_2 – радіуси жили та ізоляції.

Позначемо $tg\delta$ та $tg\delta_z$ – тангенси кутів діелектричних втрат неушкодженої частини ізоляції та тріщини, заповненої НМР. Тоді для паралельного включення виділених фрагментів

$$tg\delta_e = \frac{C}{C+C_z} tg\delta + \frac{C_z}{C+C_z} tg\delta_z.$$

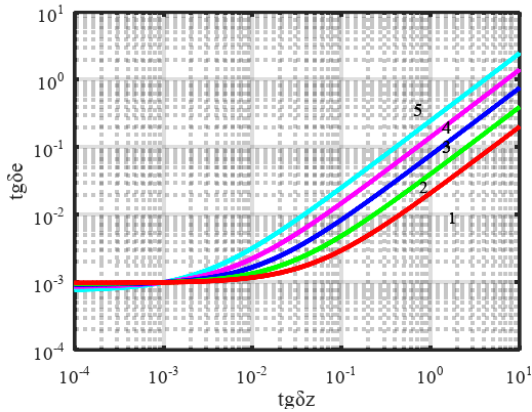


Рис. 2

На рис. 2 наведено еквівалентні значення тангенсу кута діелектричних втрат за різних параметрів НМР у тріщинах поліетиленової ізоляції провідника перерізом $2,5 \text{ мм}^2$. Криві відповідають тріщині довжиною z : 1 – 0,1 мм; 2 – 0,2 мм; 3 – 0,4 мм; 4 – 0,8 мм; 5 – 1,6 мм. Довжина ділянки із суцільною ізоляцією – 10 мм.

За $tg\delta_z=10\%$ результуючий тангенс кута діелектричних втрат зростає в 3 рази за товщини тріщини всього 0,1 мм: це становить 1% від товщини неушкодженої ділянки ізоляції. За $tg\delta_z=100\%$ результуючий тангенс кута діелектричних втрат зростає у 20 разів.

У разі ширині тріщин менше 0,1 мкм, вони мають гігроскопічні властивості, тобто поглинатимуть пари води та НМР з атмосфери.

Підвищена напруженість поля в тріщинах сприятиме їхньому виявленню, наприклад, шляхом вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат. Виникнення часткових розрядів у мікротріщинах – малоімовірне. По-перше, через те, що напруженість поля на поверхні нормальних ділянок ізоляції виявляється вищою, а по-друге, через утруднення розвитку лавинного розряду в мікротріщинах. Щоправда, останнє твердження не завжди справедливе: у випадку руху електронів у сильному електричному полі поверхневих зарядів мікротріщини швидше набувають енергію, достатню для здійснення ударної іонізації повітря та ініціювання часткових розрядів. У будь-якому випадку, відмінність властивостей ізоляції буде свідченням старіння кабелів, природу якого можна буде визначити методами діагностики за $tg\delta$.

Низькомолекулярні продукти у капілярі між ізольованими жилами. На поверхні ізоляції кожної внутрішньої жили (рис. 3, а) багатожилкового кабелю утворюються ділянки підвищеної напруженості електричного поля в області зазорів (рис. 3, а, б). Напруженість електричного поля максимальна в мінімальному зазорі Δx між поверхнями, ізоляції жил, що майже стикаються (рис. 3, а, точки а і е) і мінімальна в максимальному зазорі (точки б, с і d). Низькомолекулярні полярні речовини розкладання ізоляції можуть втягуватися в область сильного електричного поля та накопичуватися в зоні зазору.

Форма поверхні відкладень приймається як меніск радіуса RL (рис. 3, б). Нехай α – кут, під яким із центру жили видно край меніска, і ϵ параметром НМР. Тоді через цей параметр знайдуться координати центру циліндричної поверхні меніска (XCL, YCL) та його радіус RL

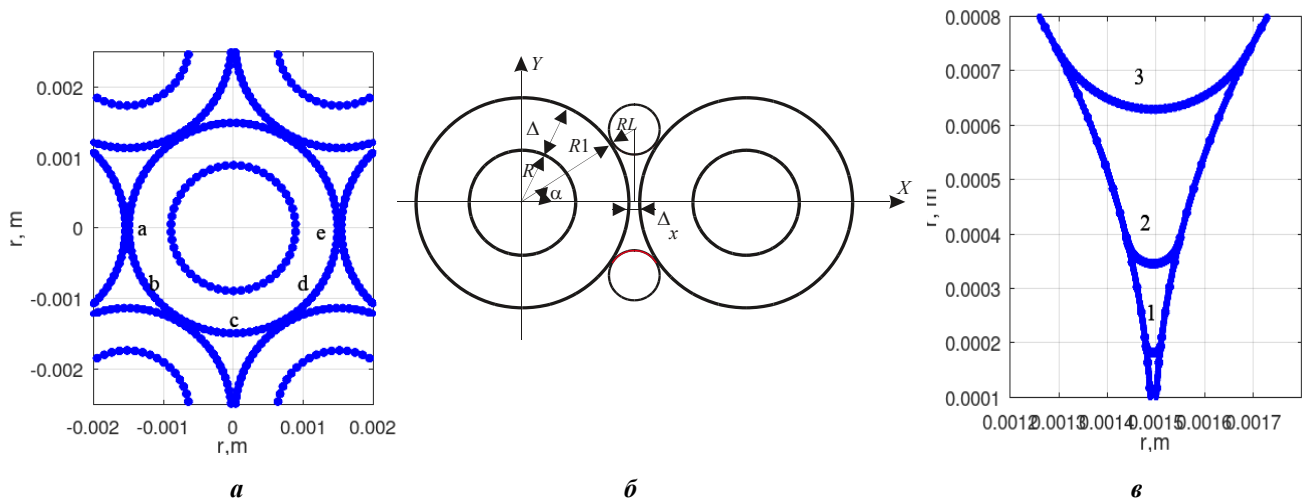


Рис. 3

$$X_{CL} = R_1 + \Delta_x / 2, \quad Y_{CL} = X_{CL} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$RL = \frac{X_{CL}}{\cos \alpha} - R_1.$$

На рис. 3, б показано область капіляра між ізолюваними жилами та його розміри, а також позначено: R – радіус жили; Δ – товщина ізоляції; R_1 – радіус жили з ізоляцією; Δx – товщина зазору між жилами; RL – радіус меніска НМР у зазорі.

Розглянуто три ступені заповнення капіляра НМР (рис. 3, в), що відповідають значенням параметра α : крива 1 – $\alpha = \pi/24$; крива 2 – $\alpha = \pi/12$ та крива 3 – $\alpha = \pi/6$.

На рис. 4 представлено розгортки напруженості електричного поля по жилах ($E1$, $E2$), їхньої ізоляції ($Ei1$, $Ei2$) та поверхні НМР (LMP) за різного ступеню заповнення капіляра:

крива 1 – $\alpha = \pi/24$; крива 2 – $\alpha = \pi/12$; крива 3 – $\alpha = \pi/6$. Чисельний розрахунок електричного поля виконано методом вторинних джерел [10]. Сильне електричне поле в меншій частині зазору, яке виникає за потенціалів жил близько одного кіловольта, не викликає проявів часткового розряду [10], але сприяє поглиненню капіляром продукту розкладання твердої поліетиленової ізоляції.

Напруженість електричного поля в області меніска зменшується у міру заповнення капіляра і збільшення радіуса меніска. Отже, втягування низькомолекулярних полярних продуктів в область сильного поля капіляра йде інтенсивно на самому початку старіння кабелів, а потім – сповільнюється. Такий характер залежності від часу накопичення НМР має і явище поглинання НМР криволінійною поверхнею меніска: спочатку кривизна поверхні меніска значна (позиція 1 на рис. 3, в), а потім зменшується (позиції 2, 3 на рис. 3, в).

Під дією виниклої різниці тисків Δp під меніском рідина починає підніматися у капілярі до тих пір, поки гідростатичний тиск стовпа рідини, що піднявся, не буде дорівнювати тиску Лапласа (можна дати посилання, наприклад, на *Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии. М.: Академия, 2006, 240 с.* <https://obuchalka.org/2015051884838/osnovi-kolloidnoi-himii-summ-b-d-2007.html>)

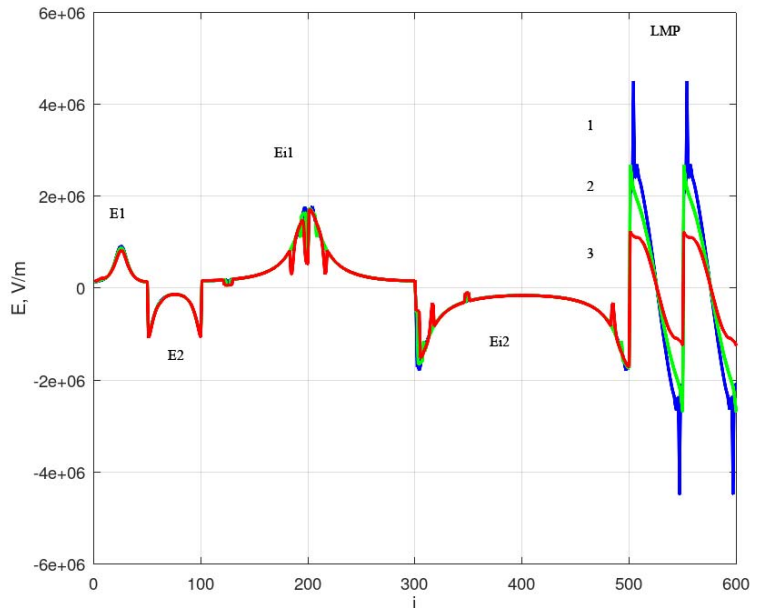


Рис. 4

$$p_{\text{л}} = \frac{2\sigma_p}{R_L},$$

де σ_p – коефіцієнт поверхневого натягу НМР, Н/м². Тут $R_L = RL$ – радіус меніска НМР (рис. 3, б).

Висота підняття стовпа рідини у капілярі також зростає із збільшенням коефіцієнта поверхневого натягу рідини. В той же час у процесі старіння твердої неполярної полімерної ізоляції відбувається підвищення її гідрофільних властивостей, що обумовлює зменшення кривизни поверхні меніска.

Після заповнення зазору Δx між ізолюваними жилами та утворення меніска, конденсація НМР, тобто перехід в рідину, прискорюється: позначається поглинаюча дія криволінійної поверхні меніска через збільшення сил міжмолекулярної взаємодії НМР у пароподібному та рідкому стані. Надалі, у міру зростання радіуса кривизни меніска RL тиск капілярного всмоктування Δp зменшується, і процес конденсації НМР уповільнюється.

Процес накопичення НМР у капілярі між ізолюваними жилами характеризується кількома стадіями. Спочатку він протікає повільно до заповнення зазору та утворення поверхні меніска. Потім накопичення НМР прискорюється через сильне електричне поле в крайових зонах меніска і тиску капілярного всмоктування. На завершальній стадії швидкість конденсації НМР знову зменшується, через що їхня концентрація у пароподібному стані збільшується. Прискорити конденсацію НМР у капілярах можна за допомогою сильного зовнішнього поля. Для цього вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ слід вести за наявності постійної складової напруги. Якщо введення постійної складової напруги призводить до зростання $\operatorname{tg} \delta$ ізоляційних проміжків, це означає процес конденсації в них НМР. Сучасні

вимірювальні прилади (наприклад, вимірювач імпедансу Е7-14) дають змогу проводити вимірювання $tg\delta$ за постійної складової напруги до 200 В. При цьому рівень змінної складової напруги становить 0,04 (низький рівень) або 2 (високий рівень).

Розподіл діелектричних втрат за перерізом багатожильних кабелів знаходиться шляхом

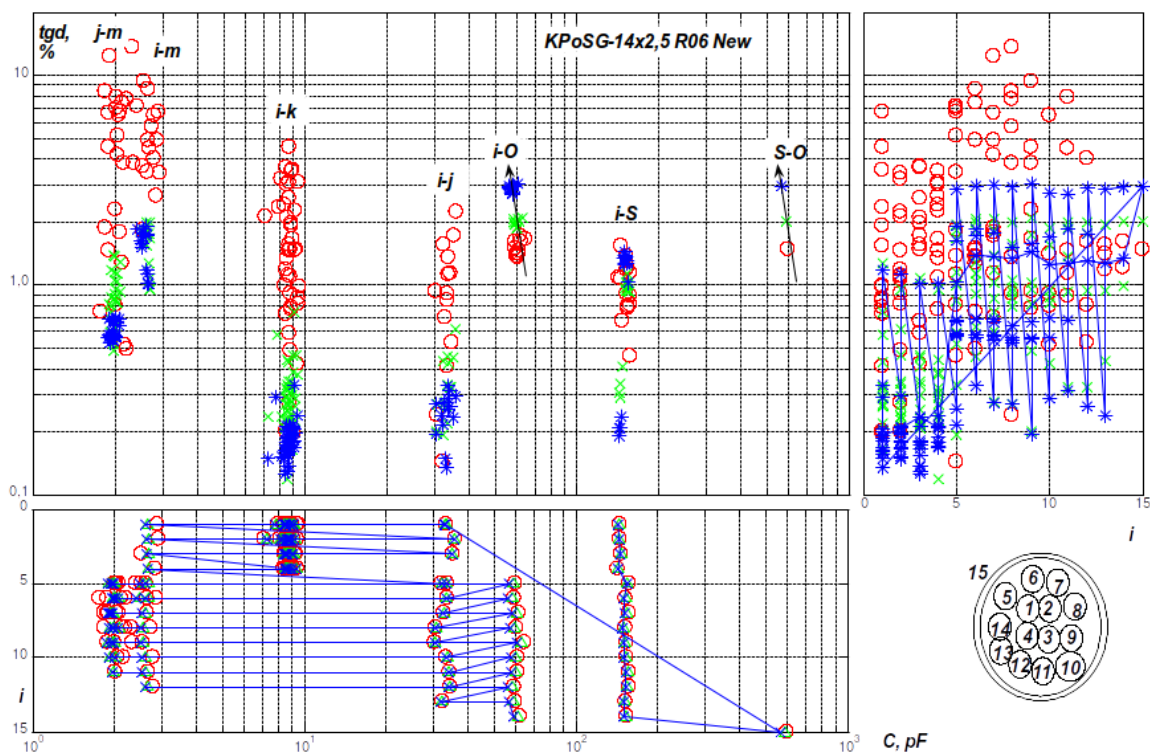


Рис. 5

вимірювань параметрів – ємності та тангенсу кута діелектричних втрат – усіх ізоляційних проміжків (типу «жила-жила», «жила-екран», «жила-оболонка» та ін.).

Експериментальне виявлення накопичення НМР у багатожильних кабелів АЕС. На рис. 5 показано C - $tg\delta$ - i діаграму зразка контрольного двохповивного 14-жильного кабелю КПОСГ-14х2,5 гермозони АЕС, що містить внутрішню захисну оболонку із полівінілхлоридного пластику та зовнішню – із свинцю. Схему зразка наведено у четвертому квадранті діаграми. Цифрами позначено: 1–4 – жили першого повива; 5–14 – жили другого повива; 15 – свинцева оболонка кабелю. Характерні області діаграми: $S-O$ – всі жили разом проти оболонки; $i-S$ – кожна жила окремо проти всіх інших та оболонки; $i-O$ – кожна жила проти оболонки; $i-j$ – сусідні жили першого та другого повивів; $i-k$ – жили першого повива через одну від сусідньої; $i-m$ – жили першого повива щодо оболонки; $j-m$ – жили другого повива через одну-дві від сусідньої.

Вимірювання проведено для 3-х значень частоти зондувального електричного поля (рис. 5): 100 Гц (кружки червоного кольору), 1 кГц (хрестики зеленого кольору) та 10 кГц (зірочки синього кольору).

Складна конфігурація зондувального електричного поля містить значну тангенціальну складову напруженості поля на межах поділу середовищ, яка викликає підвищені втрати в шарах поверхневих забруднень. Завдяки несиметричній конфігурації поля вдається помітити низькомолекулярні продукти розкладання твердої полімерної ізоляції – ознаки її старіння.

Порівняння тангенсів кутів діелектричних втрат різних проміжків дає можливість виявити, у тому числі, і наявність низькомолекулярних речовин, що розсіюють енергію змінного електричного поля, та розподілення їх у внутрішньому просторі кабелю. Зазвичай НМР мають менший опір, тому виявляють себе у підвищених значеннях $tg\delta$ на низьких частотах (у даному випадку на частоті 100 Гц) (рис. 5, області $j-m$, $i-m$, $i-j$). Полярні групи, властиві, наприклад, ПВХ ізоляції, або ті, які з'являються в процесі окислення поліетилену, виявляються в підвищених значеннях $tg\delta$ на високих частотах (у даному випадку на частоті 10 кГц) (рис. 5, область $i-S$).

Висновки. Розсіювання енергії змінного електричного поля на ділянці конструкції кабелю пропорційно накопиченій енергії та тангенсу кута діелектричних втрат цієї ділянки. За відсутності в

повітряних зазорах низькомолекулярних речовин розсіювання енергії цими ділянками кабелю не відбувається. Роль повітряних проміжків між ізолюваними жилами у конструкції кабелів зводиться до зменшення втрат електричної енергії, через що тангенс кута діелектричних втрат системи ізолюваних жил повинен бути меншим, ніж власне самої твердої полімерної ізоляції жил. Під час спостереження зворотної картини в повітряних проміжках присутні речовини (можливо у вигляді поверхневих забруднень), що розсіюють електричну енергію змінного поля. В результаті тангенс кута діелектричних втрат системи ізолюваних жил виявляється вищим, ніж власне твердої ізоляції жил.

Кабелі, у яких виявлено велику неоднорідність розподілу діелектричних втрат по перерізу, повинні розглядатися як сумнівної якості через високу ймовірність знаходження в них також тріщин в ізоляції, через які НМР, у тому числі продукти окиснення мідних провідників, свинцевої оболонки потрапляють у міжфазний простір і призводять до підвищених значень $tg\delta$ кабелів гермозони АЕС.

1. International Atomic Energy Agency. Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). Safety Reports Series. No 82 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2020. 120 p.

2. Шугайло О.П., Плачков Г.І., Гребенюк Ю.П., Шевченко І.А., Дибач О.М., Зелений О.В., Москалішин Р.І. Основні результати аналізу стану управління старінням атомних електростанцій в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. № 3(79). С. 3-9. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2018.3\(79\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2018.3(79).01).

3. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-3.6. Vienna: IAEA, 2012. 111 p.

4. Cable Ageing in Nuclear Power Plants Report on the first and second terms (2012-2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. Vienna: IAEA, 2018. 60 p.

5. Technical basis for commendable practices on ageing management. SCC and Cable Ageing Project (SCAP). Final Report. NEA/CSNI/R(2010)15, 2011. 132 p.

6. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. Final Results of a Coordinated Research Project. Vienna: IAEA, 2017. 192 p.

7. Типовая программа по управлению старением элементов и конструкций энергоблока АЭС. ПМ-Д.0.03.222-14.

8. Šimić Z., Peinador M. V., Banov R. Correlation between events with different safety significance in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. Vol. 54. Issue 7. Pp. 2510-2518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.034>.

9. Безпрозванных Г.В., Москвитин Є.С. Стратегія управління старінням кабелів атомних електричних станцій. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2022. № 11-12. С. 177-178. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.02>.

10. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 3. С. 30-36.

11. Беспрозванных А.В., Рудаков С.В., Москвитин Е.С. Предотвращение чрезвычайных ситуаций путем контроля состояния изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей и тангенсу угла диэлектрических потерь. Харьков: НУГЗУ, 2013. 165 с.

ENERGY DISSIPATION BY LOW MOLECULAR SUBSTANCES DURING ELECTRIC FIELD PROBING OF MULTI-CORE CABLES OF NUCLEAR POWER PLANTS

G.V. Bezprozvannykh

National Technical University “Kharkov Polytechnic institute”,

Str. Kirpichova, 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpі.edu.ua.

A model of the piece-homogeneous interphase space of stranded cables is proposed, taking into account the influence of cracks oriented along the lines of force of the electric field. The cracks are filled with low molecular weight substances. The case of a probing electric field with a significant tangential component is considered. The equivalent values of the tangent of the dielectric loss angle at various parameters of low molecular weight substances in the cracks of the polyethylene insulation of the conductor with a cross section of 2.5 mm² were determined. The equivalent tangent of the angle of dielectric loss increases by (3-20) times when the dissipation of electrical energy by low molecular weight substances changes from 10% to 100% in a crack, which is 1% of the thickness of an intact section of polyethylene insulation. The distribution of the electric field for the general case of accumulation of low-molecular products in capillaries formed by slit-like gaps between isolated veins is obtained. A strong electric field in the smaller part of the gap between the insulated cores, which occurs at a core potential of 1 kV, contributes to the capillary absorption of decomposition products of both solid polyethylene insulation and water vapor from the atmosphere in the case of

unshielded structures of multi-core cables. The asymmetric configuration of the probing electric field with a significant tangential component makes it possible to detect low-molecular decomposition products of solid polymer insulation, which are a sign of its aging. Differences experimentally observed in the value of $\text{tg}\delta$ with different schemes of examination of multi-core cables are related, to a greater extent, to the uneven distribution of substances dissipating electrical energy across the cross-section of the cable, and not to a change in the structure of the probing electric field.

References 11, figure 5.

Key words: multi-core cables of nuclear power plants, low molecular weight substances, probing electric field, dielectric loss.

1. International Atomic Energy Agency. Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). *Safety Reports Series*. No. 82 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2020. 120 p.
2. Shugailo O.P., Plachkov G.I., Grebenyuk Yu.P., Shevchenko I.A., Dybach O.M., Zeleny O.V., Moskalysyn R.I. The Main Results of Ageing Management State Analysis of Ukrainian NPPs. *Iaderna ta radiatsiina bezpeka.* 2018. No 3(79). Pp. 3-9. DOI: [https://doi.org/10.32918/mrs.2018.3\(79\).01](https://doi.org/10.32918/mrs.2018.3(79).01). (Ukr)
3. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-3.6. Vienna: IAEA, 2012. 111 p.
4. Cable Ageing in Nuclear Power Plants Report on the first and second terms (2012-2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. Vienna: IAEA, 2018. 60 p.
5. Technical basis for commendable practices on ageing management. SCC and Cable Ageing Project (SCAP). Final Report. NEA/CSNI/R(2010)15, 2011. 132 p.
6. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. Final Results of a Coordinated Research Project. Vienna: IAEA, 2017. 192 p.
7. Standard Program for Ageing Management of NPP Components and Structures. Tipovaya programma po upravleniyu stareniyem elementov i konstruktsiy energobloka AES. PM-Д.0.03.222-14. (Rus)
8. Šimić Z., Peinador M.V., Banov R. Correlation between events with different safety significance in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. Vol. 54. Issue 7. Pp. 2510-2518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.034>.
9. Bezprozvannykh G.V., Moskvitin E.S. Strategy for managing the aging of nuclear power plant cables. *Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudit*. 2022. No 11-12. Pp. 177-178. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.02>. (Ukr)
10. Bezprozvannykh G.V. Dielectric scanning of the transverse structure of stranded cables by the method of cumulative measurements. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2008. No 3. Pp. 30-36. (Rus)
11. Bezprozvannykh G.V., Rudakov S.V., Moskvitin E.S. Prevention of emergency situations by monitoring the state of insulation of multi-core cables according to the parameters of partial capacitances and tangent of the angle of dielectric losses. Kharkiv: NUGZY, 2013. 165 p. (Rus)

Надійшла 04.04.2024
Остаточний варіант 22.04.2024