

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ І СТРУМ В ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Щерба А.А., д.т.н., професор, Щерба М.А., д.т.н., професор, Лапенков В.В., студент, Кіш Р.С., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. В ізоляції силових кабелів зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) на високі напруги (понад 110 кВ) у сильному електричному полі (ЕП) можуть виникати нові електрофізичні явища, які не проявляються при середніх напругах. Одним із них є збільшення питомої електропровідності діелектрика в локальних ділянках з найбільшою напруженістю ЕП. Це в свою чергу призводить до збільшення густини струму витoku в ізоляції, збільшення втрат, її локального перегріву та руйнування [1, 2]. Тому сучасні дослідження спрямовані саме на виявлення більш глибоких взаємопов'язаних механізмів та врахування властивостей матеріалів, якими нехтували раніше [3, 4].

Крім того, при виготовленні та експлуатації силових кабелів зі ЗПЕ ізоляцією, особливо на високих напругах, значна увага приділяється контролю за появою включень рідини, яка є провідником у порівнянні з поліетиленом. Такі включення мають мікронні та субмікронні розміри і характеризуються різною формою, орієнтацією та взаємним розташуванням [5, 6].

Підвищення рівня робочих напруг, ресурсу і надійності силових кабелів можна досягти лише завдяки підвищенню чистоти діелектрика. Оскільки забезпечити повну відсутність сторонніх мікровключень в ізоляції при її виготовленні та експлуатації неможливо, необхідно встановити найбільш небезпечні конфігурації дефектів, визначити умови їх появи та розробити практичні рекомендації щодо запобігання появі таких конфігурацій у майбутньому.

Тому **метою статті** було визначення підсилень електричного поля та підвищення густини струму в локальних об'ємах ЗПЕ ізоляції високовольтних кабелів біля водних мікровключень з врахуванням проявів її нелінійних властивостей.

Фізико-математична модель. Зовнішнє ЕП вважалось синусоїдальним, промисловою частотою $f = 50$ Гц. ЗПЕ ізоляція ізотропна, однорідна (за виключенням окремих дефектів), лінійна при напруженості ЕП $E \leq 20$ кВ/мм і нелінійна при $E > 20$ кВ/мм, тобто її питома електропровідність $\sigma(E)$ є функцією напруженості поля E і температури T [7]:

$$\sigma(E) = \frac{\exp[2,79 - 6698/T + 1,24 \cdot 10^{-7} E]}{E} \quad (1)$$

Рівняння для розрахунку розподілу скалярного електричного потенціалу потенціалу $\varphi(t)$, як і в [10], мало вигляд:

$$\operatorname{div} \left[\sigma(E) \operatorname{grad} \varphi(t) + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0 \quad (2)$$

де ε – відносна діелектрична проникність, ε_0 – діелектрична стала.

Густина повного струму $J(t)$ розраховувалась як сума струму зміщення $J_{\text{disp}}(t)$ в діелектрику та струму провідності $J_{\text{cond}}(t)$ всередині мікровключення:

$$J(t) = J_{\text{disp}}(t) + J_{\text{cond}}(t) = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial(\text{grad } \varphi(t))}{\partial t} + \sigma(E) \text{grad}\varphi(t) \quad (3)$$

Рівняння (2), (3) розв'язувались методом скінчених елементів в програмному середовищі Comsol Multiphysics.

Матеріали та результати досліджень. Розраховане за рівнянням (2) зростання питомої електропровідності ЗПЕ ізоляції $\sigma(E)$ при збільшенні напруженості ЕП E при трьох температурах діелектрику $T = 27, 80$ і 100°C показано на рис. 1.

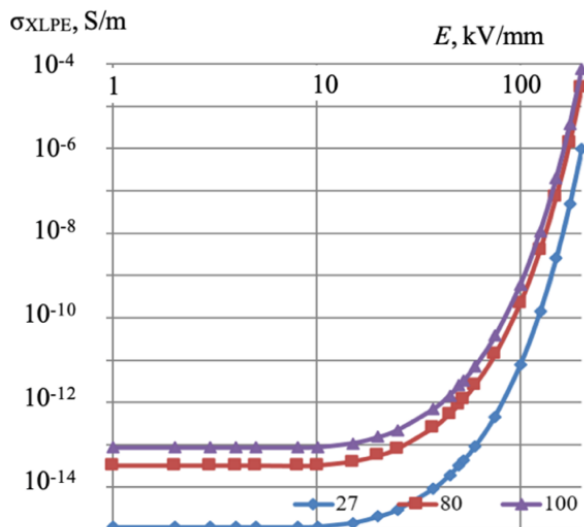


Рисунок 1 – Залежність електропровідності $\sigma(E)$ від напруженості поля E і температури T

(півосі $2,5 \times 2,5 \times 25$ мкм), сфера ($r = 25$ мкм) з водним триїнгом циліндричної форми (довжиною 50 мкм і радіусом 1 мкм) на поверхні.

На рис. 2 показані графіки зміни максимальних значень напруженості електричного поля E_{max} (рис. 2 а) і густини повного струму J_{max} (рис. 2 б) в діелектрику біля полюсів зазначених включень при зміні питомої електропровідності поліетилену $\sigma(E)$ від 10^{-14} См/м до 10^{-4} См/м. Аналізуючи графіки можна зробити висновок, що збільшення електропровідності зшитого поліетилену призводить одночасно до зменшення E_{max} (від 10% до 5 разів в залежності від типу дефекту) та зростання густини повного струму J_{max} на $2-3$ порядки. Можна відмітити, що мінімальне значення провідності $\sigma(E)$, при якому починає змінюватися напруженість E_{max} в діелектрику, залежить від конфігурації мікровключення. Поблизу сфери E_{max} починає зменшуватися при $\sigma(E) = 5 \cdot 10^{-5}$ См/м, біля двох сфер – при $\sigma(E) = 1 \cdot 10^{-5}$ См/м, біля еліпсоїд – при $\sigma(E) = 5 \cdot 10^{-6}$ См/м, а біля сфери з триїнгом – при $\sigma(E) = 1 \cdot 10^{-7}$ См/м.

Якщо за звичайних умов питома електропровідність зшитого поліетилену $\sigma(E) = 10^{-13}-10^{-15}$ См/м, то при підсиленні ЕП до 200 кВ/мм (що цілком можливо в локальних областях біля провідних мікродфектів) вона зростає до $10^{-4}-10^{-6}$ См/м, тобто на 9 порядків. Теоретичні розрахунки добре узгоджуються з експериментальними вимірюваннями, наприклад, групою Т. Токоро [8].

Розглянуто ситуації наявності в діелектрику водних мікровключень різної конфігурації, найбільш характерних для ЗПЕ ізоляції [9, 10]: сфера (радіусом $r = 25$ мкм), дві сфери ($r = 25$ мкм на відстані 5 мкм), еліпсоїд

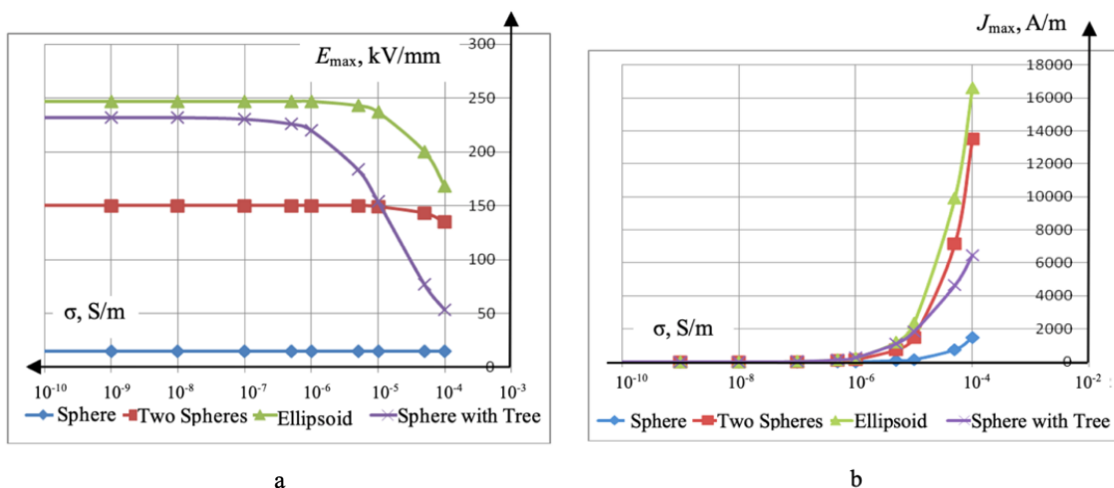


Рисунок 2 – Залежність максимальних значень напруженості поля E_{\max} і густини повного струму J_{\max} в ЗПЕ ізоляції при зміні її питомої електропровідності $\sigma(E)$ від 10^{-14} СМ/М до 10^{-4} СМ/М.

Обговорюючи доцільність врахування нелінійних властивостей ЗПЕ ізоляції в математичній моделі варто вказати, що поява водних включень зазначених форм може підвищити напруженість ЕП від $E_{\text{ср}} = 5$ кВ/мм (середнього значення для високовольтних кабелів біля напівпровідникового шару) до 140-240 кВ/мм в локальних областях, тобто значень, що в 7–11 разів перевищують порогову напруженість $E_{\text{пор}} = 20$ кВ/мм, при якій проявляється залежність $\sigma(E)$. Це говорить про необхідність врахування нелінійності електропровідності ЗПЕ ізоляції високовольтних кабелів при появі мікрodefektів.

Порівняльний аналіз результатів розрахунків для ЗПЕ ізоляції в лінійному наближенні $\sigma = 10^{-14}$ СМ/М та з урахуванням нелінійної залежності $\sigma(E)$ для зазначених вище дефектів наведені в табл. 1. Значення $\sigma(E)$ визначені в результаті моделювання і залежать від збурень ЕП біля полюсів різних включень.

Таблиця 1 – Порівняння розрахунків максимальних напруженості поля та густини струму в ЗПЕ ізоляції за лінійного та нелінійного наближення питомої електропровідності

Сфера	$\sigma(E) = 10^{-14}$ СМ/М	$E_{\max} = 15$ кВ/мм
		$J_{\max} = 0,96$ А/м
Дві сфери	$\sigma = 10^{-14}$ СМ/М	$E_{\max} = 150$ кВ/мм
		$J_{\max} = 0,96$ А/м
	$\sigma(E) = 2,6 \cdot 10^{-9}$ СМ/М	$E_{\max} = 150$ кВ/мм
		$J_{\max} = 1,02$ А/м
Еліпсоїд	$\sigma = 10^{-14}$ СМ/М	$E_{\max} = 247$ кВ/мм
		$J_{\max} = 1,58$ А/м
	$\sigma(E) = 2,1 \cdot 10^{-5}$ СМ/М	$E_{\max} = 226$ кВ/мм
		$J_{\max} = 4750$ А/м
Сфера з триінгом	$\sigma = 10^{-14}$ СМ/М	$E_{\max} = 232$ кВ/мм
		$J_{\max} = 1,48$ А/м
	$\sigma(E) = 2,3 \cdot 10^{-6}$ СМ/М	$E_{\max} = 207$ кВ/мм
		$J_{\max} = 572$ А/м

Як видно з даних табл. 1, врахування залежності $\sigma(E)$ дає змогу уточнити значення E_{\max} в ЗПЕ ізоляції біля зазначених дефектів на 10%, а також врахувати підвищення густини повного струму J_{\max} на 2-3 порядки, що є важливим.

Висновки. Для високовольтних кабелів необхідно враховувати збільшення питомої електропровідності зшитої поліетиленової ізоляції в локальних областях найбільшої напруженості електричного поля. Такі характерні конфігурації водних мікрodefektів, як сфера, дві сфери, еліпсоїд і сфера з триїнгом на поверхні підсилюють електричне поле в діелектрику у 30–45 разів, при цьому питома електропровідність σ ізоляції збільшується від типового значення 10^{-14} См/м до величин 10^{-9} - 10^{-4} См/м залежно від конфігурації дефекту. Врахування залежності $\sigma(E)$ дозволяє уточнити максимальну напруженість електричного поля E_{\max} в ізоляції біля зазначених дефектів на 10%, а також врахувати підвищення максимальної густини повного струму J_{\max} на 2-3 порядки, що є важливим при аналізі процесів деградації діелектрику. Підвищення густини струму в локальних областях призводить до нерівномірного розсіювання електричної енергії, і, як наслідок, перегріву і нерівномірної деградації полімерної ізоляції.

Перелік посилань

1. W. Li, W. Zheng, L. Ren, H. Li, X. Zhao and C. Wang A comparative study on the insulation ageing of XLPE cable via accelerated electrical test and accelerated water tree test. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2022. Vol. 17(1), pp. 475-484.
2. M. Choudhary, M. Shafiq, I. Kiitam, A. Hussain, I. Palu and P. Taklaja A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables. *Energies*. 2022. Vol. 15(9), 3408.
3. G. C. Montanari, D. Fabiani, P. Morshuis and L. Dissado Why residual life estimation and maintenance strategies for electrical insulation systems have to rely upon condition monitoring. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. Vol. 23(3), pp. 1375-1385.
4. S. V. Suraci, D. Fabiani, L. Mazzocchetti and L. Giorgini Degradation assessment of polyethylene-based material through electrical and chemical-physical analyses. *Energies*. 2020. Vol. 13(3), 650.
5. Y. Qingyue, L. Xiufeng, Z. Peng, Y. Peijie and C. Youfu Properties of Water Tree Growing in XLPE and composites. *IEEE Intern. Conf. on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*. 2019, pp. 409- 412.
6. M. Shcherba Modeling of water tree growth between micro-inclusions in XLPE cable isolation and its effect on electric field distribution. *IEEE First Ukr. Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017, pp. 417-420.
7. S. Boggs, D. H. Damon, J. Hjerrild, J. T. Holboll and M. Henriksen Effect of insulation properties on the field grading of solid dielectric DC cable. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2001. Vol 16(4). pp. 456- 461.
8. T. Tokoro, H. Iwase and M. Nagao Diagnosis of degradation condition of materials using hydrophobic and dielectric analysis. *Proc. of 2014 Intern. Symp. on Electrical Insulating Materials, Niigata, Japan, 2014*, pp. 453-456.
9. M. Shcherba Multi-physical processes during electric field disturbance in solid dielectric near water micro-inclusions connected by conductive channels. *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2016, pp. 1-5.
10. M. Shcherba, A. Shcherba and Y. Peretyatko. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS 2020. Kyiv, Ukraine, 12-14 May 2020*. pp. 353–356.