

# ЗБУРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ЗПЕ ІЗОЛЯЦІЇ НАДВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ГУСТИНИ БЛИЗЬКО РОЗТАШОВАНИХ ВОДНИХ МІКРОДЕФЕКТІВ

Щерба М.А., д.т.н., доц., Перетятко Ю.В., к.т.н., доц.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки,*

Лоєнко Ю.Г., студентка, Скріпко С.Д., студент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** З підвищенням рівнів напруги, на яких експлуатується сучасне електроенергетичне обладнання і, як наслідок, необхідністю забезпечення високої надійності і довготривалого ресурсу ізоляційних матеріалів (зокрема зшитого поліетилену (ЗПЕ)), виникають завдання дослідження електрофізичних процесів в твердих діелектричних середовищах з різними мікродефектами [1, 2]. Особлива увага приділяється появі (в процесі виготовлення і експлуатації ізоляційних матеріалів) водних мікровключень, які можуть мати різні конфігурації (розміри, форму, орієнтацію щодо зовнішнього поля, взаємне розташування). Сукупна електромеханічна дія води в сильному ЕП призводить до незворотної деградації діелектрика, зниження його електричної і механічної міцності, зменшення ресурсу [2, 3].

Оскільки забезпечити повну відсутність дефектів в ЗПЕ ізоляції неможливо, то сучасні дослідження спрямовані на виявлення найбільш небезпечних конфігурацій включень і розробку рекомендацій по їхній мінімізації [4, 5]. Крім того, ефекти, якими можна нехтувати на низькій і середній напрузі в ізоляції, на високих і надвисоких напругах можуть багаторазово посилюватися, змінюючи характер перебігу електрофізичних процесів [6, 7].

У роботах [8, 9] показано, що накопичення води в ЗПЕ ізоляції у вигляді безлічі близько розташованих мікровключень малого розміру (так званої "хмари") може бути небезпечніше, ніж концентрація води в одному включенні великого розміру, оскільки збільшується кількість мікрообластей з виникаючими деградаційними процесами. Базуючись на результатах, опублікованих в останніх наукових роботах, можна зробити висновок про необхідність уточнення впливу кількості водних мікровключень, орієнтованих переважно уздовж ЕП, і відстані між ними на процеси, що виникають у діелектрику при дробленні включень.

Тому **метою роботи** є встановлення залежності збурення електричного поля в ЗПЕ ізоляції надвисоковольтних кабелів від кількості близько розташованих водних мікродефектів і взаємних відстаней між ними.

**Матеріали та результати досліджень.** В якості прикладу розраховувався розподіл ЕП в ЗПЕ ізоляції надвисоковольтного кабелю на напругу 330 кВ. Напруженість ЕП  $E$  в ізоляції на відстані  $\Delta$  від поверхні напівпровідного шару біля жили кабелю визначається відповідно до рівняння  $E = U[(R_1 + \Delta) \ln(R_2/R_1)]^{-1}$  [2] і при  $\Delta < 5$  мм її значення  $E = 10\text{--}13$  кВ/мм. Для розрахунку збурень поля в мікрообласті діелектрика, відповідно до підходу

багатомасштабного моделювання [10], з рішення розподілу скалярного потенціалу  $\varphi$  на макрорівні задаються граничні умови розрахункової області на мікрорівні вирішення задачі.

Для проведення математичного моделювання в ізоляції виділялась мікрообласть діелектрика циліндричної форми висотою 500 мкм і діаметром 300 мкм, середня напруженість поля в якій дорівнювала  $E_{\text{ср}} = 10$  кВ/мм і змінювалась синусоїдально з частотою 50 Гц (див. рис. 1).

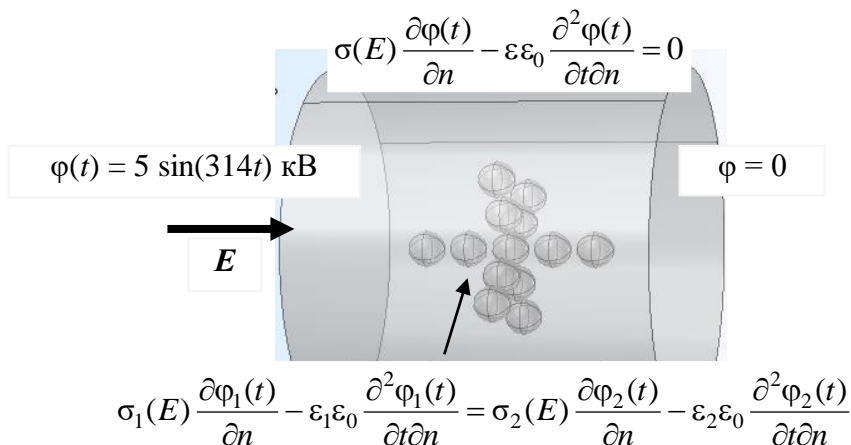


Рисунок 1 – Розрахункова мікрообласть ЗПЕ ізоляції надвисоковольтного кабелю з водними мікровключеннями, і з показаними граничними умовами

В об'ємі ізоляції досліджувалася наявність групи близько розташованих водних мікровключень ("хмари") з різною кількістю дефектів (від 1 до 25 шт). Як приклад, на рис. 1 показана група з 13 включень. Включення мали сферичну форму (як одну з найбільш характерних для ЗПЕ ізоляції) [1, 2]. Їх радіус задавався в залежності від кількості, таким чином, щоб сумарний об'єм рідини залишався незмінним і відповідав одиночному сферичному мікровключенню радіусом 50 мкм (як гранично допустимому значенню згідно існуючих вимог до ЗПЕ ізоляції) [2].

Середовища вважалися однорідними, ізотропним і лінійними при  $E_{\text{ср}} < 20$  кВ/мм. При  $E_{\text{ср}} \geq 20$  кВ/мм враховувалася залежність питомої електропровідності ЗПЕ ізоляції  $\sigma(E)$  від напруженості ЕП  $E$ , згідно з експериментальними і теоретичними даними, наведеними в [6, 7]. За розробленою в них моделлю залежність  $\sigma(E)$  представлялася наступним аналітичним виразом:

$$\sigma(E) = \sigma_{\text{const}} \left( \frac{2kT}{aeE(t)} \right) \text{sh} \left( \frac{aeE(t)}{2kT} \right), \quad (1)$$

де  $\sigma_{\text{const}} = 10^{-14}$  См/м – постійна провідність ЗПЕ в слабкому ЕП,  $e$  – заряд носія,  $T$  – абсолютна температура,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана,  $a$  – відстань між потенційними енергетичними бар'єрами, яка для поліетилену становить близько 2 нм.

Задача формулювалась в квазістатичному наближенні згідно системи рівнянь Максвелла. Розрахункове рівняння для скалярного електричного

потенціалу  $\varphi(t)$  ( $\mathbf{E}(t) = -\text{grad } \varphi(t)$ ) записувалося у вигляді:

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

де  $\sigma(E)$ ,  $\varepsilon$  – електрична провідність і діелектрична проникність середовищ.

Рівняння (2) доповнювалося умовами на границях розрахункової області, представленої на рис. 1: на верхній і нижній границях – завданням умови Діріхле (значень потенціалів  $\varphi(t)$ ), а на бічних границях – умови Неймана (рівністю нулю похідних потенціалів  $\varphi(t)$  по нормалі  $\mathbf{n}$  до поверхні). На границі розділу "вода–ЗПЕ ізоляція" задавалися умови рівності між собою нормальних компонент густини повного струму  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_{\text{повн.1}}(t) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_{\text{повн.2}}$  у вигляді:

$$\sigma_1(E) \frac{\partial \varphi_1(t)}{\partial n} - \varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi_1(t)}{\partial t \partial n} = \sigma_2(E) \frac{\partial \varphi_2(t)}{\partial n} - \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi_2(t)}{\partial t \partial n}, \quad (3)$$

оскільки вектор густини повного струму  $\mathbf{J}_{\text{повн}}(t)$  розраховувався як сума векторів струму провідності  $\mathbf{J}_{\text{пр}}(t)$  і струму зміщення  $\mathbf{J}_{\text{зм}}(t)$  за рівнянням:

$$\mathbf{J}_{\text{повн}}(t) = \mathbf{J}_{\text{пр}}(t) + \mathbf{J}_{\text{зм}}(t) = \sigma(E) \mathbf{E}(t) + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t}. \quad (4)$$

Для оцінки зміни ймовірності виникнення стохастичних процесів, як і в роботах [2, 3, 5], розраховувалася величина напруженого об'єму  $V_n$  діелектрика (об'єму з підвищеною напруженістю поля), і для тривимірної розрахункової області вона визначалася відповідно до рівняння:

$$V_{st} = \int_V f(E) dV, \quad (5)$$

де  $V$  – об'єм розрахункової області,  $f(E)$  – функція, яка при напруженості ЕП вище допустимого значення ( $E \geq E_{\text{доп}}$ ) приймає значення  $f(E) = 1$ , а при  $E < E_{\text{доп}}$  – приймає значення  $f(E) = 0$ .

Оскільки задача є нелінійною, то рівняння (2) розв'язувалося в часовій області методом скінчених елементів в пакеті Comsol Multiphysics [11]. Розрахунковий інтервал часу  $\Delta t$  дискретизувався – розбивався на  $i$  інтервалів (на 50 в кожному періоді коливань) з пошуком рішень в  $i+1$  вузлових точках (для  $i+1$  моментів часу). Розрахунок задачі починався з нульових початкових умов, і аналізувалися діючі значення несинусоїдних часових функцій в усталеному режимі коливань.

*Результати чисельного експерименту.* Досліджувалися залежності максимальної напруженості поля  $E_{\text{max}}$  і величини напруженого об'єму  $V_n$  у ЗПЕ ізоляції від кількості мікрвключень при їх дробленні.

На рис. 2 показані результати чисельного експерименту з розрахунку величини напруженості ЕП  $E$  в розрахунковому об'ємі, яка показана тонуванням згідно шкали праворуч. Результати наведені для трьох, семи, дев'яти і тринадцяти близько розташованих включень на взаємних відстанях між полюсами  $l$  в п'ять разів менших їх  $d$  діаметрів (тобто  $l = d/5$ ). Максимальна напруженість поля спостерігається біля полюсів центрального включення ланцюжка при їх непарній кількості або біля близько розташованих полюсів двох центральних включень при їх парній кількості.

Залежності величин  $E_{\max}$  і  $V_H$  від кількості мікрочлукень наведені на рис. 3 в безрозмірних одиницях у вигляді коефіцієнта посилення поля  $k_E = E/E_{\text{сер}}$  і коефіцієнта напруженого об'єму  $k_{VH} = V_H/V_B$ , тобто як величини віднесені відповідно до середньої напруженості електричного поля  $E_{\text{сер}}$  і сумарного об'єму води у дефектах  $V_B$ .

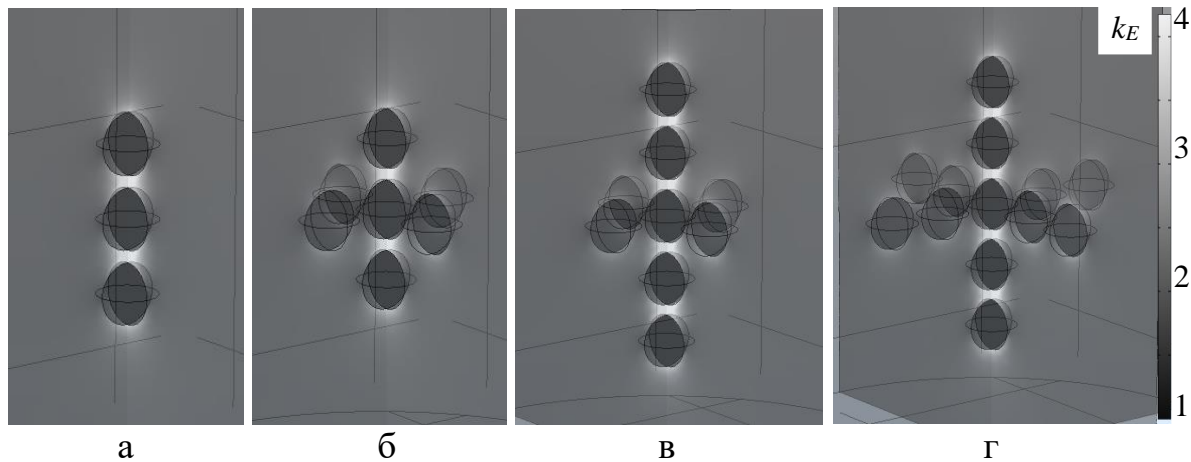


Рисунок 2 – Напруженість електричного поля в розрахунковому об'ємі при кількості включень рівній: а – трьом, б – семи, в – дев'яти, г – тринадцяти.

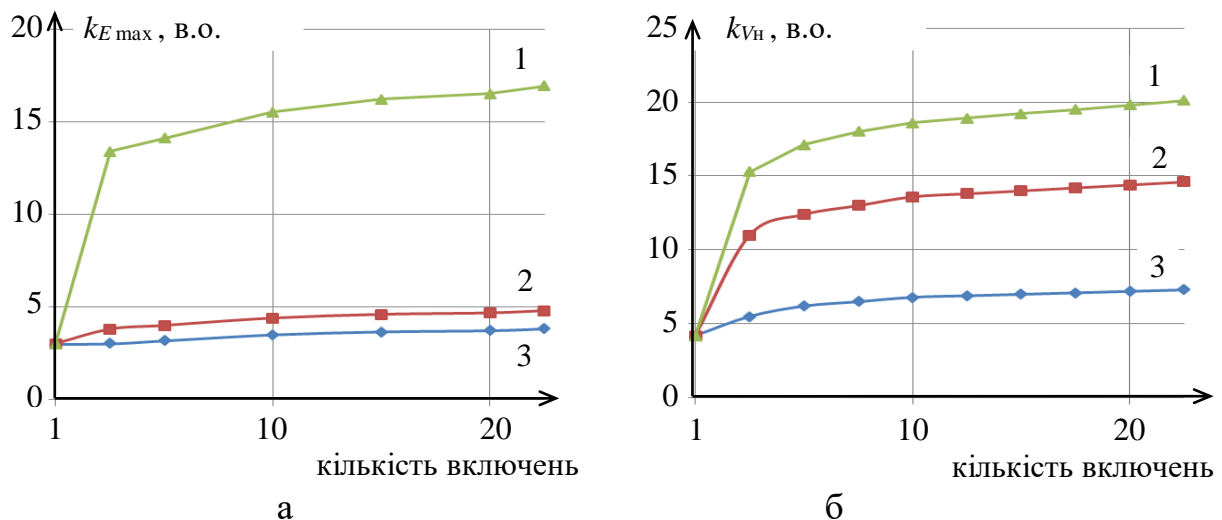


Рисунок 3 – Залежності коефіцієнтів: а – підсилення поля і б – напруженого об'єму від кількості водних мікрочлукень в ЗПЕ ізоляції.

Криві 1, 2 і 3 відповідають різним взаємним відстаням між включеннями, які також описувалися у відносних одиницях у вигляді  $k_l = l/d = 0,2; 0,1$  і  $0,04$ , тобто відстані  $l$  в 5, 10 і 25 разів меншій від діаметру включень  $d$ .

Так при дробленні включень величини  $V_H$  збільшуються відповідно в 2 рази і більше при відстанях між включеннями більше 0,1 їх діаметра, і – в 3 рази і більше при відстані менше 0,1 діаметра. Описані вище посилення ЕП можна пояснити тим, що при дробленні мікрочлукень в "хмарі" її протяжність уздовж поля збільшується. Якщо припустити, що між мікрочлукеннями зберігаються однакові відстані, то розміри "хмари" уздовж силових ліній поля збільшуються в 5 разів і більше при його конфігурації близькій до сферичної, і в

10 разів і більше при розташуванні включень переважно вздовж електричного поля.

**Висновки.** Досліджено збурення електричного поля в ЗПЕ ізоляції надвисоковольтних кабелів при підвищенні густини близько розташованих водних мікрodefektів. Встановлені залежності такого збурення від кількості близько розташованих водних мікрodefektів і взаємних відстаней між ними.

Аналіз показав, що дроблення мікрвключень (збільшення їх кількості та зменшення розмірів при незмінному сумарному об'ємі рідини в ізоляції) може викликати збільшення сумарного напруженого об'єму ізоляції в 2 рази і більше при відстанях між включеннями більше 5 мкм, і до збільшення в 3 рази і більше при відстанях менше 5 мкм. При цьому величина напруженості електричного поля в діелектричних проміжках між включеннями зростає в 15 разів і більше.

Біля полюсів кожного з включень в ізоляції створюються області підвищеної напруженості поля, в які з часом втягуються мікронні і субмікронні краплі води. У сукупності з пульсуючими тисками на матеріал діелектрика, створюються умови для виникнення і проростання водяних триїнгів з поверхні включень в напрямку об'єднання елементів сукупності в єдину провідну структуру, тобто до незворотної деградації ізоляційного матеріалу.

#### Перелік посилань

1. Densley J. Ageing Mechanisms and Diagnostics for Power Cables. An Overview. IEEE Trans. on Electrical Insulation, January/February. 2001. Vol. 17. P. 14–22.
2. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
3. Shcherba M.A. Modeling of Water Tree Growth Between Micro-Inclusions in XLPE Cable Isolation and its Effect on Electric Field Distribution. IEEE Electrical and Computer Engineering, UKRCON-2017. Pp. 417 – 420.
4. Kurihara T., Okamoto T., Hozumi N., Miyajima K., Uchida K. Evaluation of relationship between residual charge signal and AC breakdown strength of water-tree degraded XLPE cables removed from service using. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24(1). Pp. 656–665.
5. Щерба М.А., Золотарев В.В., Антоненко Т.Ю. Электрофизические процессы в высоковольтных кабелях с полимерной изоляцией. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2017. – 305 с.
6. Boggs S.A. Semi-empirical high-field conduction model for polyethylene and implications thereof. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2.1. P. 97–106.
7. Tokoro T., Nagao M. and Kosaki M. High Field Dielectric Properties and ac Dissipation Current Waveforms of Polyethylene Film. IEEE Trans. on Electrical Insulation. 1992. Vol. 27. No. 3. P. 482–487.
8. Kurihara T., Okamoto T., Hozumi N., Miyajima K., Uchida K. Evaluation of relationship between residual charge signal and AC breakdown strength of water-tree degraded XLPE cables removed from service using. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24(1). P. 656–665.
9. Wang W., Tao W., Ma Z., Liu J. The mechanism of water tree growth in XLPE cables based on the finite element method. IEEE Intern. Conf on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Chengdu (China). 2016. P. 1–4.
10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. К.: Артпринт, 2011. 256 с.
11. Comsol Multiphysics, Comsol Inc., Burlington, MA. URL: <https://www.comsol.com> (Accessed at 15.12. 2017).