

# МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ У ЗПЕ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ В ОБЛАСТІ ВОДНИХ ТРИЇНГІВ ПРИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ НАПРУГАХ І СТРУМАХ

Щерба М.А., д.т.н., доцент, Перетятко Ю.В., к.т.н., доцент, Федорченко І.І., студент, Лапенков В.В., студент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки*

**Вступ.** У сучасних електричних мережах використання відновлюваних джерел енергії та потужних нелінійних навантажень може призводити до погіршення якості електричної енергії, зокрема спотворювати синусоїдальний характер напруг і струмів. У той же час експериментальні дослідження зшитої поліетиленової (ЗПЕ) ізоляції силових кабелів показали, що збільшення частоти прикладеної синусоїдальної напруги призводить до більш швидкої її деградації через пришвидшення росту водних триїнгів (тонких розгалужених структур) в об'ємі діелектрика [1, 2].

На збільшення довжини та зміну форми водних триїнгів одночасно впливають електрохімічні, електротермічні, електромеханічні процеси [3], серед яких слід принаймні виділити: виникнення часткових розрядів [4], утворення електропровідних наночастинок вуглецю внаслідок згоряння локальних нанообластей [5], впливи внаслідок нагрівання та випаровування води, діелектрофорез молекул води [6]; електрострикція, електроосмос, електростатичні та електродинамічні сили на межі діелектричного та провідного середовищ [5–7]. При дослідженні мультифізичних процесів деградації ЗПЕ ізоляції важливо оцінити ступінь впливу кожного з окремих ефектів на загальний механізм руйнування її мікроструктури, оскільки на сьогодні не існує єдиної математичної моделі появи та розвитку водних триїнгів.

Підсумовуючи описані результати експериментальних досліджень, можна сказати, що для оцінки впливу на електрофізичні процеси деградації ЗПЕ ізоляції несинусоїдності напруги і струму необхідно враховувати принаймні такі процеси, як: збільшення інтенсивності та частоти електромеханічного впливу рідких електропровідних мікрровключень на структуру ізоляції, зростання втрат енергії в мікродефектах за рахунок наявності додаткових вищих гармонійних складових, збільшення релаксаційних втрат і температури локальних мікрооб'ємів ізоляції, збільшення кількості носіїв заряду, що виникають в одиницю часу поблизу мікрровключень, і збільшення інтенсивності інжекції електронів у них. Узагальненим електрофізичним механізмом підвищення інтенсивності деградації ізоляційного матеріалу в змінному електричному полі (ЕП) є збільшення довжини та зміна форми та водних мікрровключень і мікротриїнгів.

**Метою роботи** було удосконалення математичної моделі ЗПЕ ізоляції силових кабелів з урахуванням виникнення в них несинусоїдальних напруг і струмів та визначення особливостей процесів збільшення напруженості

електричного поля, величини напруженого об'єму і максимальних електро-механічних тисків, які призводять до зміни форми і довжини водних мікро-дефектів ізоляції.

**Фізико-математична модель.** Вдосконалювалась модель, розроблена в роботах [8–10]. ЕП приймалось несинусоїдальним та досліджувався його розподіл в ЗПЕ ізоляції надвисоковольтних кабелів з водними мікродефектами складної форми. Дефекти моделювались у вигляді еліпсоїдів з триїнгами на поверхні, довжина та кількість яких змінюється з часом, причому триїнги в свою чергу складались з еліпсоїдів, з'єднаних між собою провідними каналами. Розміри мікродефектів були меншими за допустимі стандартами. Враховувались

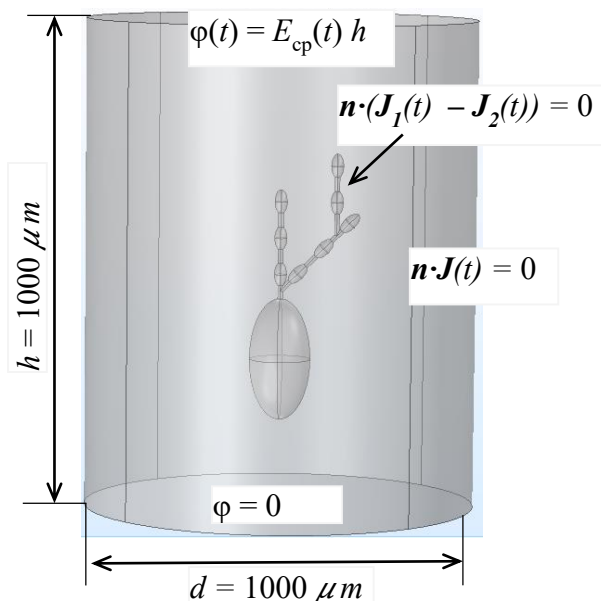


Рисунок 1 – Локальний мікроб'єм ЗПЕ ізоляції кабелю з включенням

локального об'єму з дефектом. Розв'язувалась крайова задача для системи рівнянь Максвелла з граничними умовами для розрахункової області, як показано на рис. 1. На границях області в напрямку зовнішнього ЕП задавались умови Діріхле – значення потенціалів, а на границях, перпендикулярних полю та міжфазних границях провідник-діелектрик – умови Неймана – значення похідні потенціалу по нормалі до поверхні.

Розрахункове рівняння для обчислення розподілу скалярного потенціалу:

$$\operatorname{div} \left[ -\sigma(E) \operatorname{grad} \varphi(t) - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0 \quad (1)$$

Повний струм в розрахунковій області розраховувався як сума струму провідності всередині мікровключення та струму зміщення в діелектрику. Електромеханічні сили, які виникають на міжфазній границі провідник-діелектрик розраховувались за допомогою тензора напружень Максвелла.

**Матеріали та результати досліджень.** Оцінювався вплив на збурення ЕП в ізоляції подовження триїнгу та збільшення кількості його віток внаслідок появи

нелінійні властивості ізоляції – залежність електропровідності  $\sigma(E)$  від напруженості ЕП при  $E > 100$  кВ/мм в локальних областях [3, 6, 8], за умови, що середня напруженість поля в ізоляції  $E_{cp} = 10$  кВ/мм.

У програмному середовищі Comsol Multiphysics з використанням методу скінченних елементів та методу багатомасштабного моделювання проведено розрахунки біля мікрвключень комбінованої форми, як показано на рис. 1.

Спочатку розраховано розподіл електричного потенціалу  $\varphi(t)$  на макрорівні всього об'єму ізоляції та визначено граничні умови для розв'язання задачі на мікрорівні

вищих гармонічних складових прикладеної до ізоляції напруги. Аналізувались такі параметри як максимальна напруженість поля  $E_{max}$ , напружений об'єм ізоляції  $V_n$  (об'єм з підвищеною напруженістю поля) та максимальний тиск  $f_{max}$  на поверхню ізоляції зі сторони рідини. Відповідно до [2, 5] збільшення частоти напруги та струму на порядок (наявність складових до 21 гармоніки включно) призводить до додаткового збільшення максимальної довжини триінгу  $l$  як мінімум у 1,8 рази порівняно з його довжиною  $l_0$  на частоті 50 Гц. Результати моделювання представлені на рис. 2 для нерозгалуженого триінгу з однією віткою (маркери у вигляді крапок) та розгалуженого триінгу з 9 вітками (маркери у вигляді трикутників). Всі величини наведені у відносних одиницях:  $k_{E_{max}} = E_{max}/E_{cp}$ ,  $k_{V_n} = V_n/V_{def}$ ,  $k_l = l/l_0$ , де  $V_{def}$  – об'єм дефекту.

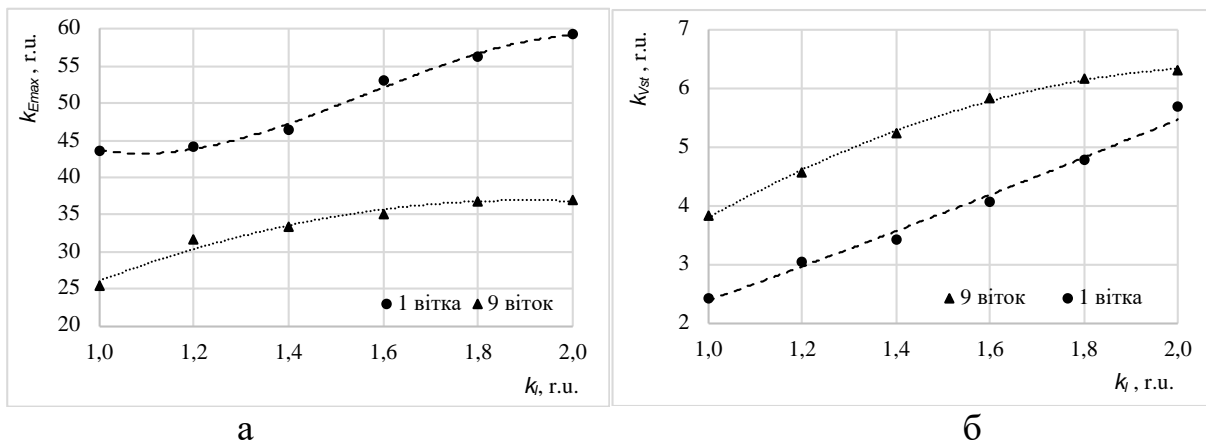


Рисунок 2 – Залежності максимальної напруженості поля і напруженого об'єму ізоляції при збільшенні довжини та розгалуженні водного триінгу

Розрахунки показали, що такий додатковий ріст триінгу викликає збільшення максимальної напруженості поля  $E_{max}$  в 1,3 рази (від значення  $k_{E_{max}} = 43,6$  до 56,2 – рис. 2 а), напруженого об'єму  $V_n$  майже в 1,6 разів (від значення  $k_{V_n} = 3,8$  до 6,2 – рис. 2 б), а максимальний тиск на поверхню твердої ізоляції  $k_{f_{max}}$  – у 1,7 рази. Крім того, такі руйнівні дії на ізоляцію є додатковими до силових впливів, що діють при синусоїдальних напругах і струмах згідно [8-10]. На жаль, наявність несинусоїдальних напруг і струмів при випробуваннях і експлуатації силових кабелів і систем електропостачання з використанням ізоляції зі зшитого поліетилену поки не регламентується.

**Висновки.** Поява несинусоїдального електричного поля у зшитій поліетиленовій ізоляції силових кабелів, тобто поява вищих гармонійних складових, зумовлює пришвидшення росту водних триінгів порівнюючи з випадком синусоїдального поля. Це проявляється в тому, що збільшується інтенсивність інжекції електронів у мікроструктуру ізоляції та, відповідно, накопичення об'ємних зарядів. Також збільшуються релаксаційні втрати і температура її локальних мікроб'ємів.

Проведені розрахунки показали, що збільшення довжини водного триінгу вздовж поля за рахунок несинусоїдальних напруг і струмів впливає на збільшення величин максимальної напруженості поля, напруженого об'єму та

максимального тиску в діелектрику. Так, при появі в електричному полі вищих гармонік до 11 включно величина максимальної напруженості поля збільшується на 30%, напруженого об'єму – на 60%, а максимального пульсуючого тиску – на 70% порівняно з основною частотою.

Це викликає зниження ресурсу ізоляційного матеріалу та його стійкості до електричного пробою при несинусоїдальних напругах і струмах. На думку авторів, зазначені обставини необхідно враховувати в електричних мережах України, в яких використовуються силові кабелі зі ЗПЕ ізоляцією, як під час їх випробувань, так і в процесі експлуатації.

#### Перелік посилань

1. Montanari G.C., Fabiani D., Morshuis P., Dissado, L. 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.
2. Zhou C., Chen, G. Influences of frequency on space charge formation in polyethylene under high voltage AC electric fields. *IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. 2016. Pp. 117-120.
3. Choudhary M., Shafiq M., Kiitam I., Hussain A., Palu I., Taklaja P. A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables. *Energies*. 2022. Vol. 15(9), 3408.
4. Suraci S.V., Fabiani D., Mazzocchetti L., Giorgini L. Degradation assessment of polyethylene-based material through electrical and chemical-physical analyses. *Energies*. 2020. Vol. 13(3), 650.
5. Sekii Y. Charge generation and electrical degradation of cross-linked polyethylene. *IEEE Trans. on Electrical and Electronic Engineering*. 2019. Vol. 14(1), Pp. 4-15.
6. Su J., Du B., Li J., Li Z. Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges. *High Voltage*. 2020. Vol. 5(4), Pp. 353-364.
7. Thomas A. J., Saha T. K. A new dielectric response model for water tree degraded XLPE insulation-part a: model development with small sample verification. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. Vol. 15(4). Pp. 1131-1143.
8. Shcherba M.A. 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.
9. Shcherba M.A. 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.
10. Shcherba M., Shcherba A., Peretyatko Y. 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.