

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ДЕГРАДАЦІЇ ЗШИТОЇ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ І САМОУТРИМНИХ ІЗОЛЬОВАНИХ ПРОВІДІВ ЗА НЕСИНУСОЇДНИХ НАПРУГАХ І СТРУМАХ

А.А. Щерба^{1*}, чл.-кор. НАН України, М.А. Щерба^{2**}, докт. техн. наук,
Ю.В. Перетятко^{2***}, канд. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: anat.shcherba@gmail.com.

² НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: m.shcherba@gmail.com.

Досліджено особливості електрофізичних процесів деградації зшитої поліетиленової (ЗПЕ) ізоляції силових кабелів і самоутриманих ізольованих проводів (СПП) з урахуванням водяних мікрровключень і віток триїнгів, виникаючих в ній під час виготовлення та експлуатації. Обґрунтовано, що поява несинусоїдних напруг і струмів у лініях електропередачі (ЛЕП), що використовують сучасні силові кабелі та СПП з твердою ЗПЕ ізоляцією, викликає підсилення електрофізичних чинників, спрямованих на збільшення пульсуючого електромеханічного тиску рідких струмопровідних мікрровключень і віток триїнгів на поверхню твердої ЗПЕ ізоляції та зростання з часом їхніх розмірів вздовж напруженості наявного електричного поля (ЕП). У роботі визначено закономірності змінення з часом величини напруженого об'єму та максимального тиску в ЗПЕ ізоляції та додаткового впливу на такі закономірності вищих гармонічних складових електричних напруг і струмів за несинусоїдних процесів в такій ізоляції. Вказано, що такі електрофізичні впливи на полімерну ізоляцію призводять до збільшення інтенсивності як порогових, так і стохастичних механізмів руйнації мікроструктури ЗПЕ ізоляції силових кабелів і СПП та вимагають розробку додаткових регламентів щодо стандартних умов їхнього виготовлення та експлуатації. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: напруженість електричного поля, сучасна полімерна ізоляція, водяні мікрровключення, пульсуючий електромеханічний тиск, напружений об'єм, деградація, силовий кабель, СПП, надійність.

Вступ. Використання відновлюваних джерел електроенергії з вихідними напівпровідниковими інверторами напруги та потужних нелінійних навантажень в сучасних електричних мережах може призводити до погіршення якості електричної енергії, зокрема спотворювати синусоїдний характер напруг і струмів, сприяючи по суті появи в них високочастотних складових. В той же час експериментальні дослідження електрофізичних властивостей ЗПЕ ізоляції показали, що збільшення частоти синусоїдної напруги прискорює збільшення довжини водних триїнгів до певного розміру та змінення їхньої форми, зменшуючи тривалу стійкість ізоляції до повного електропробою [1, 2].

На збільшення довжини і змінення форми водних триїнгів впливають мультифізичні процеси, які умовно можна поділити на електрохімічні, електротермічні та електромеханічні [3]. З них слід виділити виникнення часткових розрядів (ЧР) у газових мікропорожнинах ізоляції в результаті втрати електронів молекулами полімеру під впливом ЕП [4], електротермічні впливи внаслідок підвищення тиску води через її нагрівання і випаровування та згорання локальних нанообластей ЗПЕ ізоляції з утворенням струмопровідних наночастинок вуглецю у плазмових мікрозонах ЧР [5]. Особливу увагу слід звернути на електромеханічні процеси, що проявляються у вигляді явища діелектрофорезу полярних молекул води у мікроструктурі полімерів під впливом неоднорідного ЕП [6]; електрострикції, тобто деформацій ізоляції в змінному ЕП (іони кристалічної решітки організовані досить жорстко і можуть змішуватися під дією поля тільки на дуже малі відстані, що в змінному ЕП може спричинити електрострикцію решітки); електроосмосу, тобто проникнення води під дією ЕП в поверхневі та середні структурні нано- та мікропори в ізоляції; виникнення електростатичних і електродинамічних сил на межі діелектричних і провідних середовищ [5–7].

Під час дослідження мультифізичних процесів електродеградації ЗПЕ ізоляції важливою є оцінка ступеню впливу кожного з окремих ефектів на загальний механізм руйнації її мікроструктури,

© Щерба А.А., Щерба М.А., Перетятко Ю.В., 2023

ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0002-0200-369X>; **<https://orcid.org/0000-0001-6616-4567> ;

***<https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>

оскільки на даний час відсутня єдина математична модель появи та розвитку водних триїнгів в ЗПЕ ізоляції. Узагальнення відомих результатів експериментальних досліджень показує, що для оцінки впливу на електрофізичні процеси деградації ЗПЕ ізоляції силових кабелів і СІП треба враховувати щонайменше наступні процеси: зростання інтенсивності та частоти електромеханічних впливів з боку рідких струмопровідних мікрровключень на структуру ізоляції; зростання енергетичних втрат в мікродефектах ізоляції через наявність додаткових вищих гармонічних складових наруги і струму; підвищення релаксаційних втрат і температури локальних мікрооб'ємів ізоляції; збільшення кількості виникаючих носіїв заряду за одиницю часу біля мікрровключень та зростання інтенсивності інжекції в них електронів. Узагальнюючим електрофізичним механізмом підвищення інтенсивності деградації ЗПЕ ізоляції в змінному ЕП є змінення форми та зростання довжини водяних мікрровключень та мікротриїнгів вздовж ЕП.

Метою роботи є вдосконалення математичної моделі ЗПЕ ізоляції силових кабелів та СІП шляхом урахування появи в них несинусоїдних напруг і струмів задля проведення чисельних розрахунків процесів зростання напруженості ЕП, величини напруженого об'єму та максимальних електромеханічних тисків, що можуть призводити до змінення форми та довжини внутрішніх водяних мікродефектів ізоляції.

Фізико-математичну постановку задачі сформульовано шляхом удосконалення математичної моделі, розробленої в роботах [8–10]. ЕП приймається несинусоїдальним і досліджується його розподіл в ЗПЕ ізоляції, що має водяні мікрровключення складної форми – еліпсоїдальні з циліндричними мікротриїнгами на вершині, довжина і кількість яких змінюється з часом. При цьому враховувалися нелінійні властивості ЗПЕ ізоляції, які проявляються за локальної напруженості ЕП $E > 100$ кВ/мм, тобто враховувалося змінення електропровідності ЗПЕ ізоляції від напруженості ЕП $\sigma(E)$ за залежностями, наведеними в [3, 6, 8].

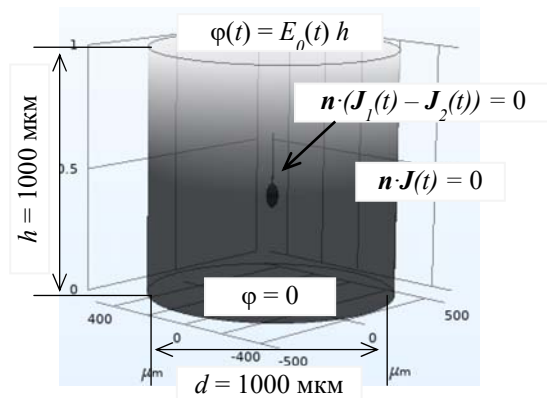


Рис. 1

У пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics з використанням методу скінчених елементів та методу багатомасштабного моделювання проведено розрахунки збурень ЕП у локальному мікрооб'ємі ЗПЕ ізоляції кабелів або СІП з мікрровключенням комбінованої форми всередині, як показано на рис. 1.

Спочатку на макрорівні всього об'єму ізоляції у поперечному перерізі розраховувався розподіл електричного потенціалу $\varphi(t)$ і визначалися граничні умови для розв'язку задачі на мікрорівні локального об'єму з дефектом. Вирішувалася крайова задача для системи рівнянь Максвелла з граничними умовами для розрахункової області, як показано на рис. 1. На границях області у на-

прямку зовнішнього ЕП задавалися умови Дірихле – значення потенціалу $\varphi(t) = E_0(t) h$ і $\varphi = 0$. На границях, перпендикулярних ЕП, – умови Неймана – рівність нулю нормальних компонент повного струму $n \cdot J(t) = 0$ або, виражаючи через потенціал φ – рівність нулю похідних від потенціалу по нормалі до поверхні ($\partial\varphi/\partial n = 0$). На міжфазних границях всередині розрахункової області – границях ізоляція-мікродефект – також задавалися умови Неймана, тобто рівності між собою нормальних компонент повного струму $n \cdot (J_1(t) - J_2(t)) = 0$, тобто похідних $\partial\varphi_1/\partial n = \partial\varphi_2/\partial n$.

Система рівнянь Максвелла вирішувалася у квазістатичному припущенні ($\partial B/\partial t \approx 0$), оскільки частота гармонік ЕП була низькою. Розрахункове рівняння для знаходження розподілу потенціалу $\varphi(t)$ в мікрооб'ємі ЗПЕ ізоляції, як і в [10], мало вигляд

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

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

Повний струм в розрахунковій області $J_{\text{повн}}(t)$ розраховувався як сума струмів провідності всередині мікрровключення та зміщення у діелектрику. Електромеханічні сили впливу ЕП зарядів на поверхні водяних мікротриїнгів на тверду ЗПЕ ізоляцію розраховувалися з використанням тензору напружень Максвелла. Середня напруженість ЕП в ізоляції $E_0 = 10$ кВ/мм. Розміри еліпсоїдального включення і триїнгу були меншими від допустимих відомих стандартами.

Результати чисельного експерименту. На рис. 2 напрямки і довжини стрілок (у логарифмічній шкалі) відповідають локальним тискам f зі сторони рідини дефекту на поверхню ізоляції. Значення тиску

f_{max} біля вістря триїнгу дорівнювало 2–4 МПа в залежності від його конфігурації і є порядку межі механічної міцності для ЗПЕ ізоляції. Тонування відповідає області напруженого об'єму V_n діелектрика, тобто об'єму, у якому напруженість ЕП є нижчою від значення електропробою ізоляції, але вищою від значення, за якого в ньому можуть виникати стохастичні руйнівні процеси. Область V_n розраховувалася як в [9, 10], в ній напруженість E принаймні у 1,5 рази вища від середньої напруженості E_0 . Колір тонування згідно шкали праворуч відповідає напруженості ЕП, наведеній у відносних одиницях, у вигляді коефіцієнта підсилення поля $k_E = E/E_0$.

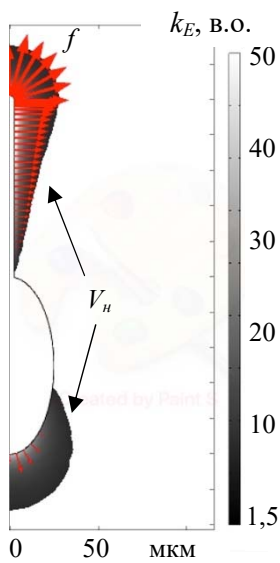
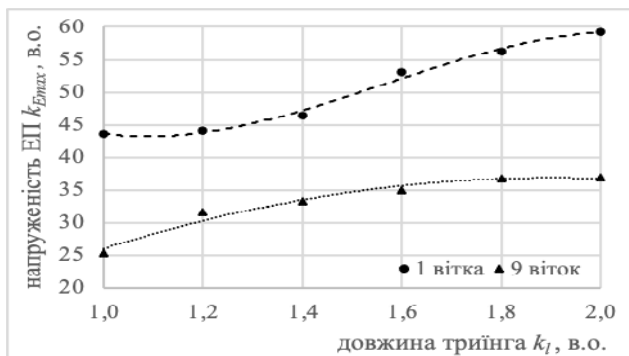


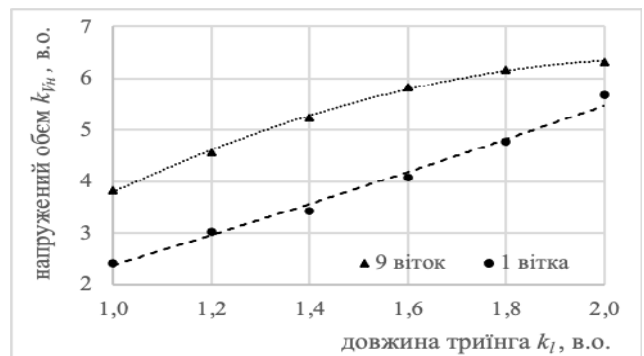
Рис. 2

На рис. 3 показано залежності величин максимальної напруженості ЕП E_{max} і напруженого об'єму V_n у відносних одиницях: $k_{E_{max}} = E_{max}/E_0$, $k_{V_n} = V_n/V_0$ (де V_0 – об'єм водного мікродфекту) від довжини триїнга l також у відносних одиницях $k_l = l/l_0$ (l_0 – початкова довжина триїнгу за частоти 50 Гц). Криві з маркерами у формі крапок і крупнішим пунктиром відповідають триїнгу з однією віткою, а криві з маркерами трикутниками і мілким пунктиром – розгалуженому триїнгу з 9 вітками.

Згідно [2, 5] підвищення на порядок частоти напруги та струму (наявність складових до 10-ої гармоніки включно) призводить до прискореного накопичення об'ємного заряду в ЗПЕ ізоляції та зростання за той же час максимального розміру триїнгу вздовж ЕП щонайменше в 1,8 разів ($k_l = 1,8$) порівняно з частотою 50 Гц. Наші розрахунки показують, що таке змінення триїнгу викликає збільшення максимальної напруженості поля E_{max} в 1,3 рази (від значень $k_{E_{max}}$ 43,6 до 56,2 – рис. 3,



а



б

Рис. 3

а), напруженого об'єму k_{V_n} майже у 1,6 разів (від значень 3,8 до 6,2 – рис. 3, б), а максимального тиску на поверхню твердої ізоляції k_f – у 1,7 рази. Причому такі руйнівні впливи на ізоляцію є додатковими до силових впливів, діючих за синусоїдних напругах і струмах згідно [8-10]. Таким чином, у разі виникнення в електричному полі складових до 10-ої гармоніки включно величина максимальної напруженості поля збільшується на 30 %, величина напруженого об'єму – на 60 %, а максимального пульсуючого електромеханічного тиску – на 70 % порівняно з основною частотою, що пояснює зменшення ресурсу ЗПЕ ізоляції та її стійкості до електропробою за несинусоїдних напругах і струмах в жилах силових кабелів та СІП. На жаль, наявність несинусоїдних напруг і струмів під час випробування та експлуатації силових кабелів і СІП, що використовують ЗПЕ ізоляцію, до цих пір ще не регламентується.

Висновки. 1. Поява в твердій ЗПЕ ізоляції несинусоїдного ЕП і відповідно його вищих гармонічних складових викликає зростання інтенсивності електромеханічних впливів зарядів, індукованих на поверхні водяних мікротриїнгів, на її мікроструктуру, викликаючи в ній більш швидке зростання довжини триїнгів вздовж поля, ніж за синусоїдних процесах. Це підтверджено результатами експериментальних досліджень [2, 4-6]. Таке явище виникає тому, що поява вищих гармонік ЕП підвищує інтенсивність інжекції електронів в мікроструктуру ізоляції і відповідно накопичення об'ємних зарядів. В ній зростають також релаксаційні втрати та температура локальних мікрооб'ємів.

2. Проведені в роботі розрахунки показали, що виникаюча за несинусоїдальних ЕП інтенсифікація збільшення довжини водяних мікротриїнгів вздовж ЕП викликає підвищення максимальної напруги ЕП, величини напруженого об'єму та максимального тиску в твердій ЗПЕ ізоляції, що використовується в сучасних силових кабелях та СІП. Так під час виникнення в електричному полі складових

до 10-ої гармоніки включно, величина максимальної напруженості поля збільшується на 30 %, величина напруженого об'єму – на 60 %, а максимального пульсуючого електромеханічного тиску – на 70 % порівняно з основною частотою. Це викликає зменшення ресурсу ЗПЕ ізоляції та її стійкості до електропробою при несинусоїдних напругах і струмах в жилах силових кабелів та СПП. Урахування вказаних обставин в електричних мережах України, що використовують силові кабелі та СПП з сучасною твердою ЗПЕ ізоляцією, на думку авторів, є необхідним як під час їхніх випробувань, так і експлуатації.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (шифр "ЕЛКАБ"), КПКВК 6541030.

ELECTRO-PHYSICAL PROCESSES OF DEGRADATION OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATION OF POWER CABLES AND SELF-CARRYING INSULATED WIRES UNDER NON-SINUSOIDAL VOLTAGES AND CURRENTS

A.A. Shcherba¹, M.A. Shcherba², Ju.V. Peretyatko²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: iednat1@gmail.com

² NTU Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: m.shcherba@gmail.com

The features of electro-physical processes of degradation of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation of power cables and self-carrying insulated wires (SIW) are studied, taking into account water microinclusions and dendrite branches that appear in such insulation during manufacture and operation. It is substantiated that the appearance of non-sinusoidal voltages and currents in power transmission lines (TL) using modern power cables and SIW with solid XLPE insulation causes an increase in electro-physical factors aimed at increasing the pulsating electromechanical pressure on the surface of solid XLPE insulation by liquid conductive microinclusions and dendrite branches and an increase in over time, their sizes along the strength of the existing electric field (EF). The paper defines the patterns of change over time in the magnitude of the stressed volume and the maximum pressure in the XLPE insulation and the additional impact on such patterns of higher harmonic components of electrical voltages and currents during non-sinusoidal processes in such insulation. It is indicated that such electro-physical effects on solid polymer insulation lead to an increase in the intensity of both threshold mechanisms and stochastic ones of destruction of the microstructure of the solid XLPE insulation of power cables and self-carrying insulated wires and require the development of additional regulations for standard conditions for their manufacture and operation. References 10, figures 3.

Keywords: electric field strength, modern polymer insulation, water microinclusions, pulsating electromechanical pressure, stressed volume, degradation, power cable, self-carrying insulated wire, reliability.

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 Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. Vol. 23(3). Pp. 1375-1385. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005613>

2. Zhou C., Chen G. Influences of frequency on space charge formation in polyethylene under high voltage AC electric fields. IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Toronto, ON, Canada, October 16-19, 2016. Pp. 117-120. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2016.7785572>

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. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093408>

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. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13030650>

5. Sekii Y. Charge generation and electrical degradation of cross-linked polyethylene. *IEEE Transaction on Electrical and Electronic Engineering*. 2019. Vol. 14(1). Pp. 4-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/tee.22790>

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. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve.2020.000>

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 Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. Vol. 15(4). Pp. 1131-1143. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4591236>

8. Shcherba M.A. Multi-physical processes during electric field disturbance in solid dielectric near water micro-inclusions connected by conductive channels. IEEE 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, Ukraine, June 7-11, 2016. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521842>

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 Ukrainian Conference on *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, May 29 – June 02, 2017. Pp. 417-420. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100530>

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, May 12-14, 2020. Pp. 353–356. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>

Надійшла 20.06.2022

Остаточний варіант 29.07.2022