

## ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.315.2:004.94

### ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ У ЗШИТО-ПОЛІЕТИЛЕНОВІЙ КАБЕЛЬНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ З ЕКСЦЕНТРИЧНІСТЮ ТА ДЕФЕКТОМ НАПІВПРОВІДНОГО ЕКРАНА

**І.М. Кучерява**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [rB.irinan@gmail.com](mailto:rB.irinan@gmail.com)

*За допомогою комп'ютерного моделювання проведено дослідження двовимірного електричного поля у зшито-поліетиленовій ізоляції з ексцентриситетом та виступом ізоляції у внутрішній напівпровідний екран високовольтного кабелю. Проаналізовано нерівномірність розподілу та закономірності змінення рівня електричного поля залежно від розглянутих дефектів. Представлено залежності максимального поля від значення концентричності (у діапазоні 0–0,5) ізоляції. За результатами чисельного дослідження обґрунтовано необхідність унеможливлення ексцентричності ізоляційної системи та її дефектів у технологічному процесі виготовлення силових кабелів для забезпечення їхньої високої якості та надійного функціонування надалі. Бібл. 15, рис. 6.*

**Ключові слова:** високовольтний кабель, зшити-поліетиленова (ЗПЕ) ізоляція, ексцентричність ізоляції, виступ ізоляції, напівпровідні екрани, електричне поле, комп'ютерне моделювання.

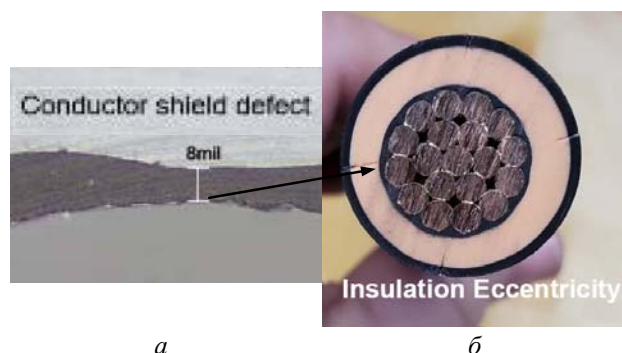
**Вступ.** У всьому світі стрімко зростає попит на електроенергію, що призводить до більшого її виробництва та передачі, а отже, і до збільшення потреби у високовольтних кабелях. Розвиток електроенергетичної галузі супроводжується вдосконаленням кабельної техніки, зокрема силових кабелів на високу й надвисоку напругу, що використовуються для передачі та розподілу електроенергії в енергетичних системах та відіграють важливу роль в енергетиці, промисловості та житті людей.

У 2023 році розмір світового ринку високовольтних кабелів оцінювався в 18,43 млрд. доларів США. Очікується, що в 2032 році він досягне 31,66 млрд. доларів, зростаючи щорічно на 6,2 % у період 2024–2032 рр. [1].

В енергетичних системах внаслідок значної ролі всіх складових підвищується актуальність їхньої надійності, безпечності, тривалості терміну служби. Усі складові, зокрема силові кабелі, повинні мати високу якість і надійність, щоб забезпечити безперервне енергопостачання. Це означає, що кабелі повинні бути розроблені, виготовлені та тестовані за певними критеріями.

Сучасні силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) мають у своєму складі центральний провідник – струмопровідну жилу, внутрішній напівпровідний екрануючий шар, основну поліетиленову ізоляцію та зовнішній напівпровідний екран. У процесі виробництва всі шари ізоляції накладаються одночасно методом потрійної екструзії.

Надійність кабелю забезпечується якістю виготовлення ізоляційної тришарової системи, використаними матеріалами, контролем відцентрованості (концентрич-



**Рис. 1.** Нерівномірність товщини напівпровідного екрана по жилі (а) та ексцентричність ізоляції силового кабелю (б) [2].

ності) усіх ізоляційних шарів, округлістю їхньої поверхні (без нерівностей, виступів, пустот). До прикладу, нерівномірність у вигляді локального зменшення товщини напівпровідного екрана по жилі та відхилення від центру ізоляційних шарів ЗПЕ ізоляції показано на рис. 1 а, б [2], відповідно. Округлість і прямолінійність (за довжиною) конструкційних елементів впливають на витрати ізоляційного матеріалу та розподіл електричного поля в кабелі.

Важливим фактором, що пов'язаний з якістю кабелю, є ексцентриситет. Ексцентриситет ізоляції означає нерівномірну її товщину навколо жили (рис. 1 б [2]). Ексцентриситет впливає на електричні характеристики, може призводити до руйнування ізоляційного матеріалу, короткого замикання, аварійних ситуацій і врешті-решт до економічних втрат. Тому для забезпечення якості силового кабелю необхідно точно витримувати геометричні характеристики кабеля.

Вимірювання електричних, термічних, механічних характеристик і геометричних розмірів у поперечному перерізі включені у випробування силових кабелів [3–5]. Порушення геометричних розмірів призводить до втрати електричних і механічних властивостей та характеристик, а точне забезпечення розмірів має велике значення для унеможливлення дефектів кабелів.

Вимірювання геометричних розмірів силових кабелів включає діаметр, товщину ізоляційних шарів і ексцентриситет ізоляції в поперечному перерізі, що є важливими елементами виготовлення та випробування кабелів. У загальному випадку на ексцентриситет ізоляції впливають технічні фактори, а саме характеристики технологічної лінії виготовлення кабелів, зокрема робоча температура та швидкість поперечної лінії, а також рівень кваліфікації операторів.

Вимірювання концентричності ізоляційної системи важливо для гарантії симетричного розподілу ізоляції кабеля навколо провідника. В ідеалі концентричність має бути 100 %, проте в реальних умовах може коливатися в межах 70–90 %. Чим вище значення, тим краще та якісніше кабель. Відповідно до стандарту IEC 60840 (розділ 10.6.2) [5, 6] концентричність визначається за максимальною ( $T_{\max}$ ) і мінімальною ( $T_{\min}$ ) товщиною ізоляції в кожному поперечному перерізі кабеля за формулою

$$(T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max} \quad (1)$$

і не повинна перевищувати граничного значення 0,15 (15 %).

На рис. 2 показано зміння товщини ізоляції (ліворуч) та її концентричності (праворуч) на довжині 0,8 м високовольтного кабеля, отримані в процесі виробництва за допомогою ультразвукового методу вимірювання в роботі [7]. Технологіями виробництва різних силових кабелів передбачений також моніторинг у режимі реального часу товщини та ексцентриситету ізоляційних шарів лазерними засобами [8, 9], випробуванням вихровими струмами [10], автоматичними оптичними методами [11, 12] та ін.

Метою цього дослідження є аналіз електричного поля високовольтного кабеля з ексцентриситетом ЗПЕ ізоляції й нерівномірною товщиною напівпровідного екрана по жилі, зокрема порівняння цих дефектів, як ризиків підвищення напруженості електричного поля і зменшення електричної міцності ізоляційного матеріалу.

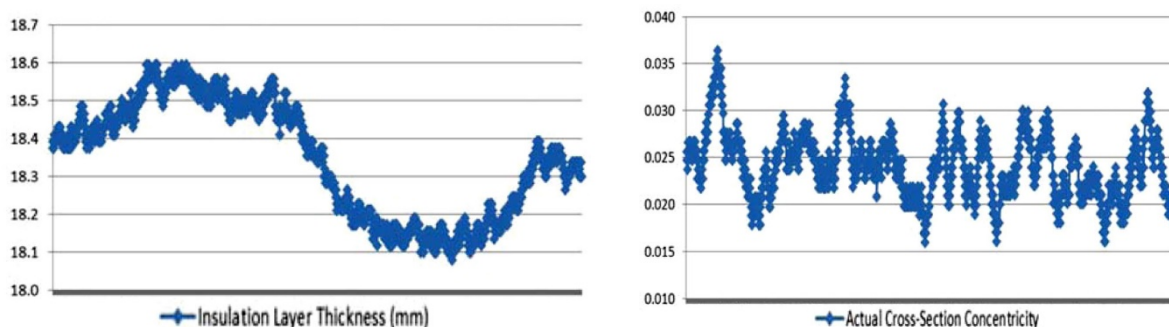


Рис. 2. Зміння товщини ізоляції (ліворуч) та її концентричності (праворуч) у процесі виробництва високовольтного кабеля [7].

Дослідження проводиться за допомогою двовимірного чисельного моделювання методом скінченних елементів у програмі Comsol [13] для силового кабеля 110 кВ.

Детальне вивчення тривимірного електричного поля в ЗПЕ ізоляції з різними структурними дефектами напівпровідного екрана виконано в статті [14].

**Модель для дослідження.** Моделюються електричні процеси в поперечному перерізі кабеля. Математична модель у квазіелектростатичному наближенні ґрунтується на таких рівняннях для визначення комплексної величини скалярного електричного потенціалу  $\phi$ :

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{tot} = 0 \quad \nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla\phi = 0,$$

$$\text{де } \mathbf{J}_{tot} = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = -\nabla\phi,$$

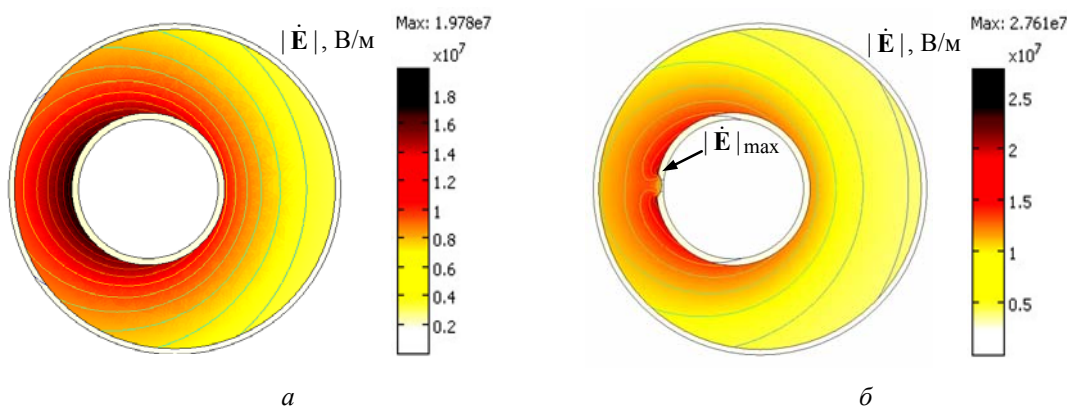
де  $\mathbf{J}_{tot}$  – густина повного електричного струму (струму провідності та струму зміщення),  $\epsilon_0$  та  $\epsilon_r$  – електрична стала та відносна діелектрична проникність середовища (різних шарів ізоляції);  $\sigma$  – електропровідність відповідного середовища;  $\omega = 314$  рад/с – кругова частота (встановлена частота – 50 Гц).

Основні граничні умови електричної задачі складаються з умови нульового електричного потенціалу на поверхні металевого екрана, що оточує ізоляцію, та вибору амплітудного значення фазної напруги на поверхні жили.

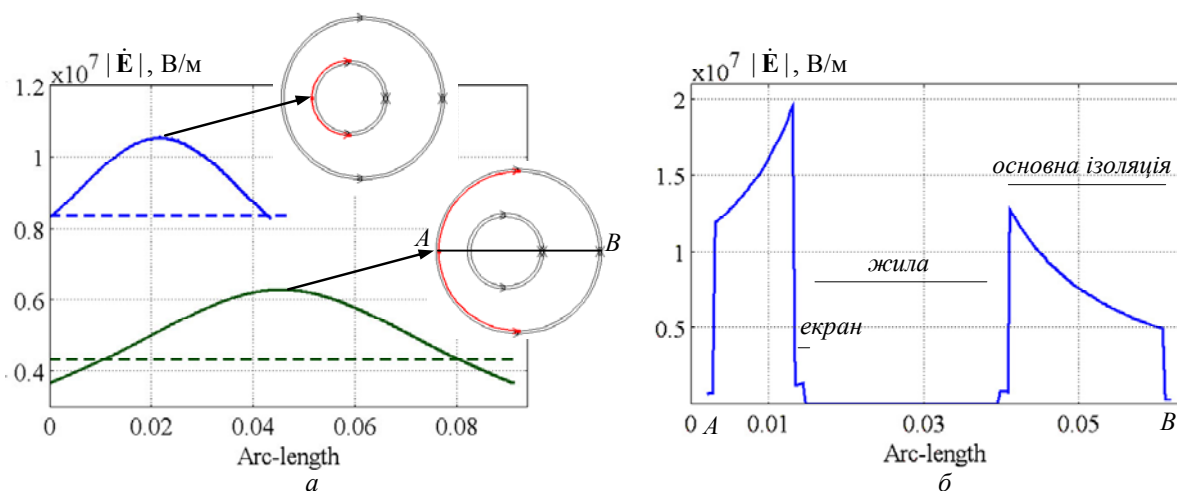
Напруженість електричного поля визначається за електричним потенціалом як  $\mathbf{E} = -\nabla\phi$ .

**Результати комп'ютерного моделювання.** Розраховується електричне поле одножильного 110 кВ кабеля із ЗПЕ ізоляцією з товщиною основного шару ізоляції 16 мм і товщиною напівпровідних екранів 1 мм.

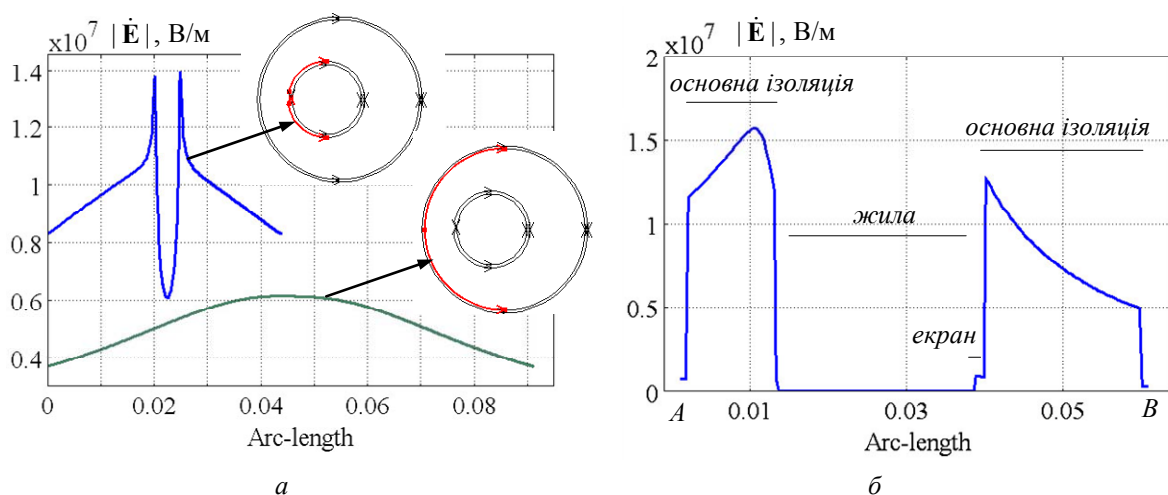
Рис. 3 показує розподіл напруженості та ізолінії електричного поля  $|\mathbf{E}|$  в ізоляції з відхиленням від центру відповідно до рис. 1 б (рис. 3 а) та додатково в ізоляційній системі зі зменшенням товщини напівпровідного екрана по жилі відповідно до рис. 1 а (рис. 3 б). Показано суттєве збільшення поля ( $\sim 1,4$  раза) за нерівномірності товщини напівпровідного екрана. Водночас максимальне значення напруженості поля виявляється в кутках, де починається виступ основної ізоляції в напівпровідний екран (рис. 3 б). Дані рис. 3 свідчать, що дефекти ізоляції у вигляді ексцентричності й нерівномірності товщини ізоляційного екрана змінюють конфігурацію електричного поля й послаблюють ізоляцію внаслідок локального збільшення поля до 27,6 кВ/мм, що перевищує граничне значення діелектричної міцності поліетилену, яка складає 21,7 кВ/мм [15]. Це означає, що саме ці локальні зони є потенційно небезпечними для руйнування матеріалу.



**Рис. 3.** Розподіл напруженості та ізолінії електричного поля в ізоляції з ексцентричністю відповідно до рис. 1 б (а) та в ізоляції кабеля з нерівномірною товщиною напівпровідного екрана відповідно до рис. 1 а (б).



**Рис. 4.** Змінення електричного поля вздовж половини зовнішньої поверхні напівпровідного екрана по жилі (верхня крива) та половини внутрішньої поверхні екрана по ізоляції з ексцентричністю (нижня крива) (а). Змінення електричного поля вздовж лінії  $AB$  (б)



**Рис. 5.** Змінення електричного поля вздовж половини зовнішньої поверхні внутрішнього напівпровідного екрана (верхня крива) та половини внутрішньої поверхні зовнішнього екрана (нижня крива) для випадків нерівномірності товщини внутрішнього екрана та ексцентричності ізоляції, відповідно (а). Змінення поля вздовж центральної лінії  $AB$  на рис. 4 а для цих випадків (б)

На рис. 4 ілюструється змінення електричного поля  $|\dot{E}|$  уздовж половини зовнішньої поверхні напівпровідного екрана по жилі (верхня крива) і половини внутрішньої поверхні екрана по ізоляції (нижня крива) з відхиленням від центру відповідно до рис. 1 б (рис. 4 а). Пунктирні прямі відповідають аналогічним випадкам за нульової (100 %) концентричності ізоляції. Змінення електричного поля вздовж лінії  $AB$ , показаної на рис. 4 а, відображається на рис. 4 б. Найбільші значення  $|\dot{E}|$  концентруються поблизу внутрішнього напівпровідного екрана з боку зменшеної товщини ізоляції за її ексцентричності. Посилює цей ефект наявність нерівномірності напівпровідного екрана по жилі (рис. 5).

Аналогічно до рис. 4 на рис. 5 а показано електричне поле  $|\dot{E}|$  вздовж половини зовнішньої поверхні внутрішнього напівпровідного екрана (верхня крива) і половини внутрішньої поверхні зовнішнього екрана (нижня крива) із відхиленням ізоляції від центру і зі стоншеним внутрішнім екраном (відповідно до рис. 1). Змінення поля вздовж центральної лінії  $AB$  (див. рис. 4 а) відображено на рис. 5, б. Порівняння даних рис. 4 і 5 показує, що загальний рівень поля вздовж внутрішнього напівпровідного екрана збільшується не набагато (лише в локальних зонах до  $\sim 1,3$  рази), а в центрі стоншення екрана навіть зменшується (в  $\sim 1,7$  рази) – верхні криві рис. 4 а та 5 а.

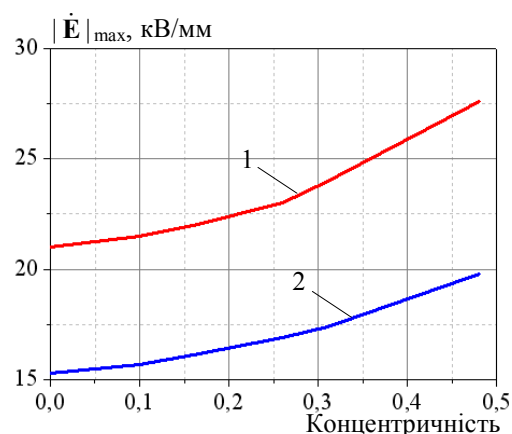
Рис. 6 подає змінення максимальної напруженості поля  $|\dot{E}|_{\max}$  в ізоляції залежно від значення концентричності ЗПЕ ізоляції, обчислену за формулою (1), у разі дефекту напівпровідного екрана (крива 1) і для бездефектного екрана (крива 2). Як видно, за наявності дефекту перевищується межа міцності поліетиленової ізоляції, тоді високі значення поля можуть призводити до деградації, а з часом до пробігу й виходу ізоляції з ладу.

**Висновки.** За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що ексцентриситет ізоляції збільшує рівень електричного поля і призводить до неоднорідності розподілу в ній електричного поля (рис. 3, 4). Такі впливи посилюються в разі наявності дефекту напівпровідного екрана (рис. 5).

Показано, що в разі змінення концентричності ізоляції в межах  $[0-0,48]$  можливе збільшення максимального значення напруженості електричного поля до 1,3 раза (рис. 6).

У сенсі рівня та однорідності розподілу електричного поля в зшити-поліетиленовій ізоляції її ексцентриситет є негативним фактором і важливою характеристикою для моніторингу і повного усунення в процесі технологічного виробництва силових кабелів для гарантування їхньої високої якості та надійної експлуатації.

*Роботу виконано за темою «Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу» (Шифр "Елрес", Державний реєстраційний номер: 0123U100693), КПКВК 6541030.*



**Рис. 6.** Залежність змінення максимальної напруженості електричного поля в ізоляції від її концентричності за наявності дефекту напівпровідного екрана (крива 1) та для бездефектного екрана (крива 2).

1. High Voltage Cable Market. URL: <https://straitresearch.com/report/high-voltage-cable-market>
2. Hernandez-Mejia J.C., Elledge S., Riley C., Ramirez D. Cable quality assurance program. NEETRAC (National Electric Energy Testing, Research and Applications Center), IEEE PES ICC Spring 2023, Denver CO, May 2023. 9 p. URL: [https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA\\_ICC\\_Spring2023.pdf](https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA_ICC_Spring2023.pdf)
3. Національний стандарт України. Кабелі з екструдованою ізоляцією силові та арматура до них на номінальну напругу понад 150 кВ ( $U_m = 170$  кВ) і до 500 кВ ( $U_m = 550$  кВ). Вимоги та методи випробування (IEC 62067:2011, IDT) ДСТУ IEC 62067:2014. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=60880](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60880)
4. IEC standard IEC 62067:2022. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ( $U_m = 170$  kV) up to 500 kV ( $U_m = 550$  kV). Test methods and requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/66951> [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec62067%7Bed2.0.RLV%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62067%7Bed2.0.RLV%7Den.pdf)
5. ДСТУ IEC 60840:2021 Кабелі силові з екструдованою ізоляцією та арматура до них на номінальну напругу понад 30 кВ ( $U_m = 36$  кВ) і до 150 кВ ( $U_m = 170$  кВ) включно. Вимоги та методи випробування (IEC 60840:2020). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=95896](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95896)
6. IEC standard IEC 60840:2020 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m = 36$  kV) up to 150 kV ( $U_m = 170$  kV). Test methods and requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/63025>
7. Humphreys-JONES G. Ultrasonic extrusion quality monitoring of multilayer HV cables during rodution – "a new vision in cable monitoring". 9th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15, Versailles 21–25 June, 2015. Pp. E8.5, 6 p. URL: [http://www.jicable.org/TOUT\\_JICABLE\\_FIRST\\_PAGE/2015/2015-E8-5\\_page1.pdf](http://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2015/2015-E8-5_page1.pdf)
8. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. Харьков: Майдан, 2007. 62 с.
9. Wang L., Wang C., Cheng J., Zhang T., Wang H. Mathematical model establishment for cable eccentricity online detection system based on X-ray. Proceedings of the 29th Chinese Control And Decision Conference

- (CCDC), 28-30 May 2017, Chongqing, China. Pp. 5957–5960. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978236>
10. Wen, J.; Zhao, H. On line measurement of cable insulation wall thickness and eccentricity using eddy current. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1–5 June 2003; Nagoya, Japan. Pp. 816–819.
  11. Li H., Wentao Jia W. Analysis of cable eccentric diameter measurement based on the production line. *Journal of Physics: Conference Series* 2587(1):012093. ICAMMT-2023, 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2587/1/012093>  
[https://www.researchgate.net/publication/373885523\\_Analysis\\_of\\_cable\\_eccentric\\_diameter\\_measurement\\_based\\_on\\_the\\_production\\_line](https://www.researchgate.net/publication/373885523_Analysis_of_cable_eccentric_diameter_measurement_based_on_the_production_line)
  12. Zhang X., Yin H. A monocular vision-based framework for power cable cross-section measurement. *Energies* www.mdpi.com/journal/energies, 2019. Vol. 12. 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12153034>
  13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
  14. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Електричне поле напівпровідного екрана силового кабелю з полімерною ізоляцією з урахуванням структурних неоднорідностей. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5, с. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.003>
  15. Berger L.I. Dielectric strength of insulating materials. in *Handbook of Chemistry and Physics*. Ed. by W.M. Haynes, D.R. Lide, T.J. Bruno. CRC Press: Taylor & Francis Group, 95-th edition, 2014–2015. Pp. 15-46–15-50. URL: [https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel\\_strength.pdf](https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf)  
[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod\\_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf)

## ELECTRIC FIELD IN CROSS-LINKED POLYETHYLENE CABLE INSULATION WITH ECCENTRICITY AND SEMICONDUCTOR SCREEN DEFECT

**I.M. Kucheriava**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteiskyi ave, 56, Kyiv, Ukraine  
E-mail: [rB.irinan@gmail.com](mailto:rB.irinan@gmail.com)

*The study of two-dimensional electric field in cross-linked polyethylene (XLPE) insulation with eccentricity and a protrusion of the insulation into the internal semiconducting screen of high-voltage cable is carried out by computer modeling. The non-uniformity of the distribution and the regularities of the change in the level of the electric field depending on the considered defects are analyzed. The dependence of the maximum electric field strength on insulation concentricity (within the range of 0–0.5) is presented. The need to prevent the eccentricity of the XLPE insulation system and its defects in the production process of power cables is grounded to ensure their high quality and further reliable operation. Ref. 15, fig. 6.*

**Key words:** high-voltage cable, cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, insulation eccentricity, insulation protrusion, semiconducting screens, electric field, computer modeling.

1. High Voltage Cable Market. URL: <https://straitresearch.com/report/high-voltage-cable-market>
2. Hernandez-Mejia J.C., Elledge S., Riley C., Ramirez D. Cable quality assurance program. NEETRAC (National Electric Energy Testing, Research and Applications Center), *IEEE PES ICC Spring 2023*, Denver CO, May 2023. 9 p. URL: [https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA\\_ICC\\_Spring2023.pdf](https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA_ICC_Spring2023.pdf)
3. National standard of Ukraine. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ( $U_m = 170$  kV) up to 500 kV ( $U_m = 550$  kV). Test methods and requirements. (IEC 62067:2011, IDT) DSTU IEC 62067:2014. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=60880](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60880) (Ukr)
4. IEC standard IEC 62067:2022. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/66951> [https://webstore.iec.ch/p-preview/info\\_iec62067%7Bed2.0.RLV%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec62067%7Bed2.0.RLV%7Den.pdf)
5. National standard of Ukraine (DSTU) IEC 60840:2021 .Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m = 36$  kV) up to 150 kV ( $U_m = 170$  kV). Test methods and requirements. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=95896](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95896) (Ukr)
6. IEC standard IEC 60840:2020 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m = 36$  kV) up to 150 kV ( $U_m = 170$  kV). Test methods and requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/63025>
7. Humphreys-JONES G. Ultrasonic extrusion quality monitoring of multilayer HV cables during roduction – a new vision in cable monitoring. *9th International Conference on Insulated Power Cables*, Jicable'15, Versailles 21–25 June, 2015. Pp. E8.5, 6 p. URL: [http://www.jicable.org/TOUT\\_JICABLE\\_FIRST\\_PAGE/2015/2015-E8-5\\_page1.pdf](http://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2015/2015-E8-5_page1.pdf)

8. Guiding technical material on the construction, testing and operation of cable lines using cables with cross-linked polyethylene insulation for voltage 64/110 kV. Kharkov: Maidan, 2007, 62 p. (Rus)
9. Wang L., Wang C., Cheng J., Zhang T., Wang H. Mathematical model establishment for cable eccentricity online detection system based on X-ray. *Proceedings of the 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 28-30 May 2017, Chongqing, China. Pp. 5957–5960. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978236>
10. Wen, J.; Zhao, H. On line measurement of cable insulation wall thickness and eccentricity using eddy current. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1–5 June 2003; Nagoya, Japan Pp. 816–819.
11. Li H., Wentao Jia W. Analysis of cable eccentric diameter measurement based on the production line. *Journal of Physics: Conference Series* 2587(1):012093. ICAMMT-2023. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2587/1/012093>  
[https://www.researchgate.net/publication/373885523\\_Analysis\\_of\\_cable\\_eccentric\\_diameter\\_measurement\\_based\\_on\\_the\\_production\\_line](https://www.researchgate.net/publication/373885523_Analysis_of_cable_eccentric_diameter_measurement_based_on_the_production_line)
12. Zhang X., Yin H. A monocular vision-based framework for power cable cross-section measurement. *Energies* www.mdpi.com/journal/energies, 2019. Vol. 12. 26 p. URL: <https://doi.org/10.3390/en12153034>
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
14. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Electric field of semiconducting screen in power cable with polymer insulation taking into account structural inhomogeneities. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2024. No. 5. Pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.003> (Ukr)
15. Berger L.I. Dielectric strength of insulating materials. in Handbook of Chemistry and Physics. Ed. by W.M. Haynes, D.R. Lide, T.J. Bruno. CRC Press: Taylor & Francis Group, 95-th edition, 2014–2015, Pp. 15-46–15-50. URL: [https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel\\_strength.pdf](https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf)  
[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod\\_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf)

Надійшла: 11.07.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 11.07.2024

Accepted: 27.08.2024