



ВПЛИВ ПОРУШЕННЯ РОЗМІРІВ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ НА РОЗПОДІЛ У НІЙ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Виконано комп'ютерне моделювання електричного поля в поліетиленовій ізоляції високовольтного кабелю з неконцентричністю елементів. Показано нерівномірність розподілу поля в ізоляції, концентрацію та максимальні значення поля в локальних областях поблизу жили, а також можливість деградації ізоляції при зниженні її електричної міцності. Обґрунтовано важливість дотримання співвідношення та встановлених розмірів конструктивних елементів кабелю.

К л ю ч о в і с л о в а: високовольтний кабель, шито-поліетиленова ізоляція, неконцентричність елементів кабелю, електричне поле, комп'ютерне моделювання.

Вступ. Сучасні кабельні системи характеризуються застосуванням силових кабелів з ізоляцією зі шитого поліетилену (ЗПЕ) на високу та надвисоку напругу, збільшенням потужності, що передається, функціонуванням на відповідальних промислових і енергетичних об'єктах [4]. До таких кабелів ставляться підвищені вимоги щодо якості матеріалів, технології виготовлення, конструкції, прийнятних умов навколишнього середовища і зовнішніх впливів. Надійність кабелів з ЗПЕ ізоляцією та кабельних ліній на їх основі залежить від багатьох факторів, серед яких технологічні і конструкційні особливості, дефектність матеріалів, якість прокладання кабелів та установки кабельної арматури, режими та умов експлуатації [3, 5–12].

Високі вимоги ставляться, насамперед, до технології виробництва, у процесі якого повинні використовуватися високоякісні матеріали та контролюватися розміри і фізичні показники кабелів. Товщина та ексцентриситет ізоляційних шарів (основної поліетиленової ізоляції та оточуючих її напівпровідних шарів) при виготовленні безупинно відслідковуються приладами лазерного контролю [12, 13]. На сьогоднішній день розроблено також надточні методи вимірювання товщини всіх елементів кабелів і ступеня їх концентричності, наприклад, тривимірний метод ультразвукового сканування [7], який забезпечує точність визначення розмірів елементів на рівні $\sim 10\text{--}20$ мкм.

У загальному випадку номінальна товщина ізоляції кабелю залежить від напруги, на яку він розрахований, і строго регламентується. Основні параметри якості залежать від концентричності, співвідношення конструктивних елементів і ексцентриситету. Всі елементи кабелів повинні мати номінальну товщину, не допускається відхилення від встановлених розмірів.

Важливим для контролю якості кабельних ліній є не тільки комп'ютеризоване управління технологічними процесами виробництва, але й випробування, що дозволяють виявляти найбільш

характерні дефекти в ЗПЕ ізоляції у випадку можливих технологічних дефектів, а також порушень при транспортуванні, монтажі й експлуатації кабелів. У ході приймально-здавальних випробувань кожна будівельна довжина кабелів тестується, у тому числі перевіряються конструктивні розміри кабелів [13]. Крім того, з метою визначення стану ізоляційної структури проводяться випробування після завершення будівельно-монтажних робіт і періодичні випробування в експлуатації. Одне з основних вимог до ізоляційної системи, що відслідковується, — концентричність її шарів і співвідношення з усіма елементами. Це принципово для кабелів на надвисоку напругу (більше 161 кВ у відповідності до стандартів МЭК), для яких недотримання концентричності елементів може призводити до пробоя при експлуатації й урешті решт до перебоїв з електропостачанням споживачів, необхідності заміни ушкоджених частин кабелю.

У технологічному процесі накладання тришарової ізоляції можливі збої, що мають наслідком відхилення від концентричності ізоляції та елементів кабелю у поперечному перерізі. Один з таких випадків зміщення елементів кабелю відносно центра з порушенням товщини по всьому об'єму ЗПЕ ізоляції представлено на Рис. 1 [9].

У зв'язку з тим, що відхилення від встановлених розмірів ізоляції та неоднакова її товщина по перерізу кабелю можуть спричинити негативні явища, пов'язані з неоднорідним розподілом електричного поля в ізоляції, актуальним є вивчення розподілу електричного поля в ЗПЕ ізоляції у разі некоаксіальності з іншими елементами кабелю.

Мета даної роботи полягає в проведенні комп'ютерного моделювання та дослідженні особливостей розподілу напруженості електричного поля в ЗПЕ ізоляції високовольтного кабелю у випадку порушення її концентричності з іншими елементами у перерізі.

Модель та вихідні дані для дослідження. Математична модель у квазіелектростатичному наближенні базується на рівнянні для скалярного



електричного потенціалу, за результатами розв'язання якого визначається напруженість електричного поля в ізоляції. Модель описана в роботі [6]. Дослідження проводяться за допомогою програми Comsol [2]. Обирається розрахункова область, в якій моделюються електричні процеси в поперечному перерізі кабеля.

Основні граничні умови електричної задачі складаються з умови нульового електричного потенціалу на поверхні металевго екрана та вибору амплітудного значення фазної напруги на поверхні струмопровідної жили.

Розглядається одножильний кабель з ЗПЕ ізоляцією на напругу 110 кВ. Розміри елементів кабеля: діаметр жили – 25,2 мм; товщина ізоляції – 16 мм; переріз мідного екрана – 35 мм²; товщина кожного з двох напівпровідних шарів – 1 мм.

Значення електрофізичних параметрів конструктивних елементів: електропровідність основної ізоляції – 10⁻¹⁵ (Ом·м)⁻¹, напівпровідних шарів – 10⁻⁷ (Ом·м)⁻¹, діелектрична проникність матеріалів – 2,3.

Результати комп'ютерного моделювання. При моделюванні різного відхилення ізоляційної структури від центра кабеля ступінь її неконцентричності визначається в процентному співвідношенні до номінальної товщини основної ізоляції кабеля (16 мм). Варіюється зміщення центра ізоляції від центра кабеля Δ (Рис. 1) у межах від 0 до 40% (до 6,4 мм).

На Рис. 1 представлено нерівномірний розподіл напруженості електрично-

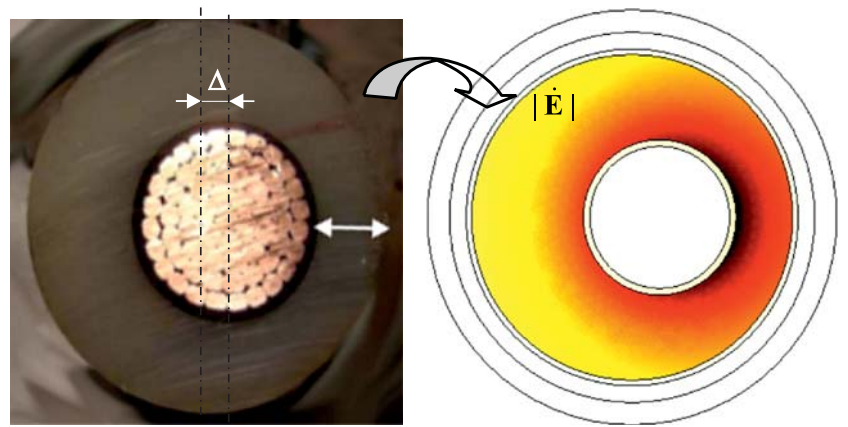


Рис. 1. Зміщення елементів кабеля відносно центру з порушенням розмірів ЗПЕ ізоляції [9] і нерівномірний розподіл напруженості електричного поля $|E|$ у такій ізоляції.

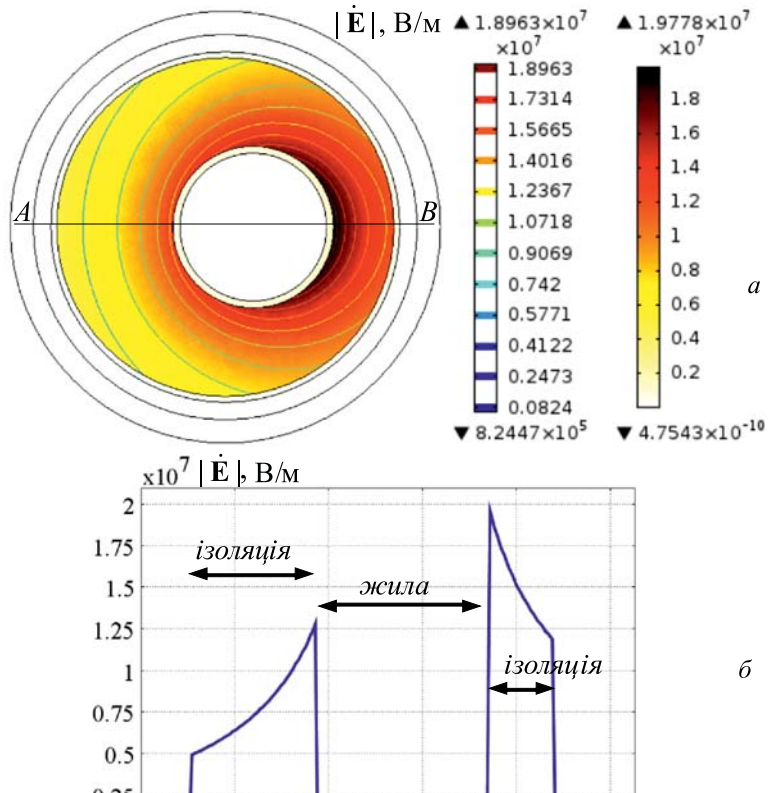


Рис. 2. Розподіл електричного поля (у кольорі та ізолініями) в ізоляції кабеля зі зміщенням центра на 30% від номінальної товщини ізоляції (а). Змінення поля вздовж відміченої лінії АВ, що проходить через центр кабеля (б).

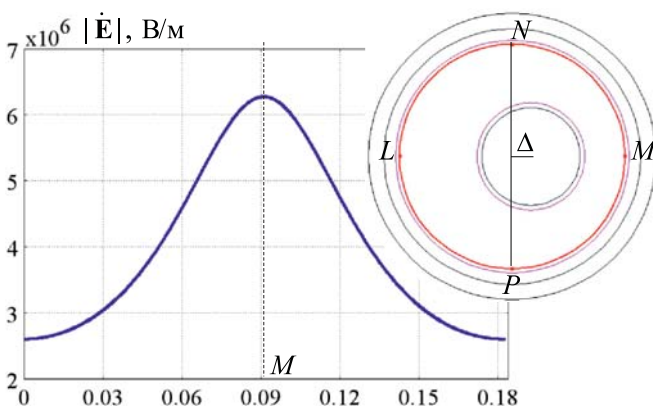


Рис. 3. Змінення напруженості електричного поля вздовж зовнішньої границі основної ізоляції - дуги LNMP, показаної на вставці праворуч. Максимальне значення поля досягається в точці М. Зміщення центра ізоляції від центра кабеля Δ складає 30% від номінальної товщини ізоляції.

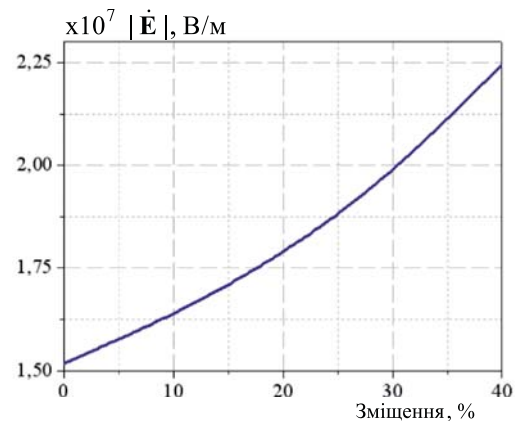


Рис. 4. Змінення максимального значення напруженості поля в ізоляції залежно від зміщення відносно центра кабеля, вираженого у відсотках від номінальної товщини ізоляції.



го поля в ізоляції з порушенням співвісності у перерізі кабеля. У такому випадку при зміщенні центра на 30% від номінальної товщини ізоляції розподіл електричного поля у відтинках кольору та у вигляді ізоліній поля показано на Рис. 2, а. Залежність на Рис. 2, б відображає змінення поля вздовж лінії АВ, що проходить через центр кабеля. Показано концентрацію поля та ліній його однакового рівня в області, де ізоляція має меншу товщину. У цій області на границі з жилою досягається максимальне значення поля. Це значення в 1,3 рази перевищує максимальну напруженість поля в ізоляції, що розраховується у разі коаксіальності кабеля.

Для розглянутого випадку на Рис. 3 наведено змінення напруженості поля вздовж зовнішньої границі основної ізоляції – дуги *LNMPL*, відміченої на вставці. Показано, що максимальне значення поля має місце в точці *M*.

На Рис. 4 представлено залежність максимального значення напруженості поля в ізоляції від її зміщення відносно центра кабеля. Зі збільшенням неконцентричності кабеля до 40% значення напруженості поля збільшується аж до 22,45 кВ/мм, що перевищує межу електричної міцності поліетиленового матеріалу – 21,7 кВ/мм [1]. Настільки високі значення поля і його концентрація поблизу жили кабеля послаблюють ізоляцію, спричиняють пробій, з часом експлуатації кабеля призводять до її деградації та виходу з ладу.

Висновки. Проведено комп'ютерне дослідження розподілу напруженості електричного поля в ЗПЕ ізоляції високовольтного кабеля у разі порушення її розмірів і концентричності кабеля. Для цього випадку показано змінення конфігурації електричного поля та його ізоліній в ізоляції, найбільші значення поля на внутрішній поверхні ізоляції поблизу жили кабеля, а також можливість досягнення межі міцності ізоляційного матеріалу, що спричиняє його деградацію в локальних областях.

За аналізом характеру розподілу електричного поля в ізоляції обґрунтовано необхідність дотримання концентричності та встановлених розмірів елементів кабеля для забезпечення його надійного функціонування.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Berger L.I.* Dielectric strength of insulating materials. / CRC Handbook of Chemistry and Physics/ Ed. by W.M. Haynes, D.R. Lide, T.J. Bruno. – Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 96-th edition 2015. – Pp. 15–44-15-49.
2. *Comsol* multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
3. *Densley J.* Ageing mechanisms and diagnostics for power cable. An overview // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17, No. 1. – P. 14–22.
4. *Electrical power cable engineering* / Third Edition. Ed. by W.A. Thue. – CRC Press, 2011. – 460 p.
5. *Hampton N.* HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 19 p.
6. *Kucheriava I.M.* Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2017. – № 2. – P. 19–24.
7. *Sutton S., Willmott P.* Determining cables metrics using 3D ultrasonic scanning // Proc. of 24th Internat. Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED). – Glasgow, 12–15 June 2017. – CIRED, Open Access Proc. J. – Vol. 2017, Is. 1. – pp. 112–115.
8. *Teyssedre G., Laurent C.* Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – Vol. 29, No. 5. – P. 26–36.
9. *Williams F.D.* Cable accessory failure analysis. – A Research Center in the School of Electrical and Computer Engineering at the Georgia Institute of Technology. – 2010. – 59 p.
10. *Кучерявая И.Н.* Причины выхода из строя муфт кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее и высокое напряжение // 698жГідроенергетика України. – 2017. – № 1–2. – С. 63–80.
11. *Кучерявая И.Н.* Факторы качества и надежности сшитого-полиэтиленовой изоляции силовых кабелей // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – Київ: ІЕД НАН України. – 2017. – Вип. 48. – с. 94–104.
12. *Руководство по выбору, прокладке, монтажу, испытаниям и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 45 до 150 кВ.* – ПАО "Завод "Южкabelь", 2014. – 88 с. – <http://www.yuzhcable.com.ua/download.html>
13. *Руководящий* технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. Научно-методич. издание. – Харьков: Майдан, 2007. – 62 с.

