

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.315

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.042>

СУЧАСНІ НАДВИСОКОВОЛЬТНІ КАБЕЛІ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ЗІ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ (ОСОБЛИВОСТІ І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ)

І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
rB.iran@gmail.com

У роботі представлено та проаналізовано основні переваги та тенденції в розвитку і використанні надвисоковольтних кабелів зі зшито-поліетиленовою ізоляцією. Внаслідок своєї здатності підтримувати інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії та волоконно-оптичними технологіями, підвищувати ефективність мережі, знижувати втрати при передачі, а також завдяки досягненням і новим технологіям у конструкціях та вдосконаленні ізоляційних матеріалів, ці кабелі відіграють значну роль у розвитку енергетики в світі та створенні майбутньої енергетичної інфраструктури. Бібл. 31, рис. 3, табл. 3.

Ключові слова: силовий кабель, надвисоковольтна напруга, зшито-поліетиленова ізоляція, волоконно-оптичні технології, відновлювані джерела енергії, композитні ізоляційні матеріали, екологічність.

Вступ. У сучасних умовах у зв'язку з швидкою урбанізацією та індустріалізацією, розширенням міст та створенням нових промислових зон в усьому світі зростає попит на надійні та ефективні рішення для передачі електроенергії. Багато великих міст стикаються з необхідністю передачі постійно зростаючого обсягу електроенергії по вже повністю завантаженим кабельним лініям. З цих причин особлива увага приділяється надвисоковольтним (110–500 кВ) силовим кабелям з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ НВ кабелі), які порівняно з силовими кабелями середньої (6–35 кВ) і високої (до 110 кВ) напруги мають значні переваги (вищу пропускну здатність за струмом, довший термін служби) і при цьому забезпечують стабільне електропостачання [1].

Світ переходить до більш чистих джерел енергії, таких як вітрова, сонячна, гідроелектроенергія, поступово розширюється їхня інфраструктура. Тому зростає потреба в ефективних системах передачі електроенергії для інтеграції в мережу відновлюваних джерел енергії. Саме ЗПЕ НВ кабелі з відмінними електричними і тепловими властивостями все частіше використовуються у відновлюваних джерелах енергії, сприяючи передачі електроенергії на великі відстані з мінімальними втратами.

Зростаюча увага до зменшення втрат при передачі електроенергії та підвищення ефективності мережі є ще одним важливим фактором, що стимулює широке використання ЗПЕ НВ кабелів. Ці кабелі характеризуються меншими діелектричними втратами, високою термічною стабільністю, підвищеною механічною міцністю. Вони зменшують втрати потужності на великих відстанях.

Тенденція широкого використання НВ кабелів додатково підтримується технологічним прогресом у виробництві кабелів та інноваціями в ізоляційних матеріалах.

Крім того, необхідність модернізації застарілої енергетичної інфраструктури в розвинутих регіонах спонукає до заміни старих силових кабелів на вдосконалені і надійні ЗПЕ НВ кабелі [2].

У зв'язку з відміченим світовий ринок ЗПЕ НВ кабелів невинно розширюється. У 2023 р. він оцінювався приблизно в 8,5 млрд. доларів США, а за прогнозами має досягти 14,1 млрд. доларів США до 2032 року, зростаючи кожного року на 6%. [3]. Основні компанії, що

працюють на цьому ринку – Prysmian Group, Nexans S.A., General Cable Corporation, Sumitomo Electric Industries, Ltd., LS Cable & System Ltd., Furukawa Electric Co., Ltd. [3, 4].

Силові кабелі надвисокої напруги є електричними кабелями, що призначені для передачі електроенергії на великі відстані або між різними точками електричної мережі. Про стан і розвиток НВ кабелів свідчать дані рис. 1, 2 [3, 5]. Тільки в Європі за період 1996–2015 р.р. впроваджено 4691 км загальної довжини ЗПЕ НВ кабелю змінного струму, з яких 1940 км – на напругу 220–235 кВ; 1073 км – кабелі 245–345 кВ; 1678 км – кабелі 380–500 кВ, крім того, встановлено 8000 км підводних кабелів постійного струму [6].

НВ кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену мають ряд особливостей, що підвищують їхню функціональність. Це зниження втрат енергії, оскільки, працюючи при більш високій напрузі, НВ кабелі передають електроенергію з мінімальним опором. Нові технології в галузі ізоляційних матеріалів, зокрема зшитий поліетилен з мульти-нанокомпозитною і модифікованою структурою, покращують характеристики та довговічність кабелів [7–9]. НВ кабелі передбачають створення та інтеграцію в інтелектуальні мережі, завдяки використанню волоконно-оптичного модуля, вбудованого в структуру кабелів, і волоконно-оптичних технологій моніторингу їхнього функціонування в режимі реального часу [10–12]. Крім відміченого, НВ кабелі мають достатньо компактний дизайн, у порівнянні з традиційними повітряними лініями вимагають менше місця, відмінно підходять для міських територій. ЗПЕ НВ кабелі більш безпечні, ніж старі НВ маслонаповнені кабелі. У більшості випадках вони прокладаються під землею, що знижує ризик ураження електричним струмом та електромагнітного забруднення навколишнього середовища.

Метою даної роботи є вивчення та узагальнення інформації щодо сучасних силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену на надвисоку напругу, зокрема відносно новітніх технічних і технологічних рішень для використання та вдосконалення таких кабелів.

Порівняння НВ кабелів з високовольтними повітряними лініями електропередачі [13–15]. Надійність електромережі є важливим чинником, оскільки порушення в електропостачанні призводить до значних економічних наслідків. Кабельні системи (КС) менш піддаються несправностям у порівнянні з повітряними лініями електропередачі (ПЛЕ) і потребують менш значного обслуговування, майже не зазнають погодних і кліматичних впливів. Крім того, НВ кабелі, особливо підземного прокладання, є більш компактними і естетичними для міських територій. Витрати на будівництво підземних кабельних ліній є меншими порівняно з проектами повітряних ліній електропередачі. До того ж, електромагнітні поля кабельних ліній за потреби можна контролювати, тоді як поле від повітряної лінії електропередачі регулювати непрактично (табл. 1).

Маслонаповнені НВ кабелі (кабелі з паперовою ізоляцією, просоченою маслом) повсюдно замінюються на НВ кабелі з твердою ЗПЕ ізоляцією, оскільки вони не відповідають таким сучасним вимогам, як простота встановлення і ремонту, мінімізація втрат, низькі витрати на обслуговування, менша вартість, задоволення зростаючим екологічним обмеженням [14, 15].

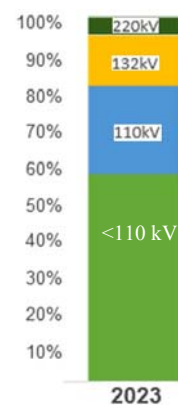


Рис. 1. Кількість у процентному відношенні кабелів різної напруги у світі станом на 2023 р. [3]

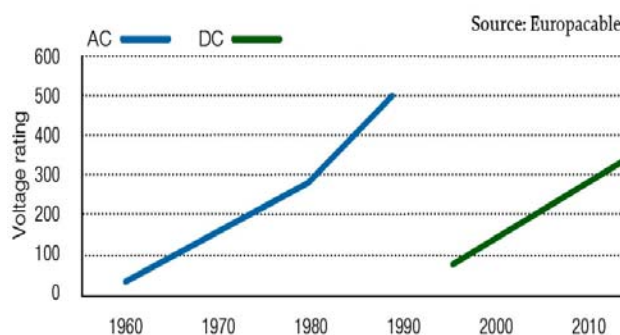


Рис. 2. Змінення напруги ЗПЕ кабелів змінного і постійного струму в різні періоди часу [5].

Таблиця 1
Фактори впливу на рівень електромагнітного поля [14]

Розташування провідників	ПЛЕ	Підземна КС
	висота більше 10 м	глибина більше 1 м
Рівень електромагнітного поля на поверхні землі	нижче	вище
Ширина дії електромагнітного поля на поверхні землі	більша	менша
Зменшення рівня поля	власне значення поля	засоби зменшення: оптимізація конфігурації прокладання; магнітне екранування

Структура ЗПЕ НВ кабелів [1, 5, 16–22]. НВ кабелі є важливим компонентом сучасних енергетичних систем, оскільки вони забезпечують безпечну і надійну передачу великої потужності на великі відстані, в тому числі в міських районах.

ЗПЕ НВ кабелі (рис. 3) зазвичай мають переріз жили до 2500 мм², ізоляцію з високо-

якісного чистого зшитого поліетилену, високу стійкість до вологи, теплових впливів та хімічного розкладання, а також відмінні електричні та термічні властивості [1–3].

Кабельна жила великого перерізу (більше 1200 мм² з алюмінію і більше 1000 мм² з міді) виготовляється, як правило, сегментованою (конструкція Milliken) (рис. 3). Кількість секторів залежно від перерізу може варіюватися від 4 до 7. Сегментована конструкція дозволяє значно знизити поверхневий ефект та ефект близькості [1, 23].

Матеріали жили включають переважно мідь та алюміній і мають значення для ефективності та економічності кабелів. Мідь є традиційним матеріалом, завдяки відмінній електропровідності, тепловим характеристикам і механічній міцності. Мідь забезпечує надійність, високу пропускну здатність за струмом і менші втрати потужності кабелів.

До того ж, мідь добре переробляється і має екологічні переваги. У проектах, де скорочення втрат електроенергії та забезпечення максимальної надійності є вирішальними, мідь є більш кращим вибором. Проте на вибір матеріалу часто впливає вища вартість міді порівняно з алюмінієм. Алюміній має нижчу електропровідність порівняно з міддю, меншу вагу, є більш економічним і вважається придатним для передачі електроенергії на великі відстані.

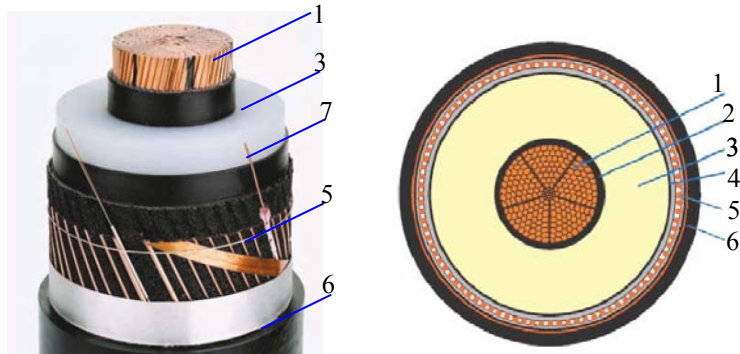


Рис. 3. Структура НВ кабелю: 1 – сегментована жила; 2, 4 – напівпровідні шари; 3 – ізоляція; 5 – мідний екран; 6 – зовнішня оболонка; 7 – волоконно-оптичний модуль

Ізоляція та напівпровідні шари, що призначені для вирівнювання електричного поля, накладаються і зшиваються разом у процесі потрійної екструзії. Така технологія забезпечує як гладку поверхню переходу між напівпровідними шарами та ізоляцією, так і відсутність включень і порожнин у ЗПЕ ізоляції. Тверда полімерна ізоляція дає значні переваги, особливо при прокладанні на територіях з великими нахилами, височинами, на трасах з великою різницею рівнів, у вертикальних та похилих колекторах, а також екологічні вигоди, оскільки НВ кабелі з твердою ЗПЕ ізоляцією є більш безпечними і нешкідливими у порівнянні з вологими маслонаповненими НВ кабелями.

Напрямки вдосконалення ЗПЕ ізоляції НВ кабелів. У процесі експлуатації в ЗПЕ ізоляції можуть виникати провідні мікророзмірні канали – триїнки електричного, водного або хімічного походження. Сучасним удосконаленням ЗПЕ є триїнгостійкий поліетиленовий матеріал, завдяки термореактивній пластичній суміші, що уповільнює розвиток триїнгів [24].

Іншими напрямками у розвитку ізоляційних матеріалів для НВ кабелів є

– використання спеціальних композитних матеріалів з мікрвключеннями, що представляють собою "загоювальні" елементи для трігів та інших мікро- та макродефектів в ізоляції [25];

– створення нанодіелектричних та екологічно чистих полімерних ізоляційних матеріалів шляхом введення в них наночастинок та їх модифікації [7–9, 26, 27]; такі нанокомпозитні матеріали покращують основні характеристики ізоляції, що відображено в табл. 2 [8, 26, 27].

ЗПЕ НВ кабелі різних класів напруги. Найбільш поширеними в світі є НВ кабелі на напругу 110 кВ,

132 кВ, 220 кВ, 400 кВ. Кожен клас напруги є критично важливим елементом для мереж передачі та розподілу електроенергії. І це завдяки прогресу в кабельних технологіях, який зосереджений на покращенні електричних, теплових і механічних характеристик кабелів.

У зв'язку з прискоренням урбанізації силові кабелі 132 кВ найбільш часто застосовуються в міських і приміських мережах розподілу електроенергії, зокрема в міських районах для забезпечення стабільного електропостачання, підтримки функціонування житлових, комерційних і промислових установ, а також для заміни застарілих та менш ефективних кабельних систем.

Кабелі 220 кВ мають широке використання в проектах з передачі електроенергії великої потужності для комунальних компаній і великомасштабних промислових застосувань.

Силові кабелі 400 кВ важливі для транскордонної передачі електроенергії – між регіонами та країнами, а також для проектів з відновлюваної енергетики, що вимагають передачі електроенергії на величезні відстані.

Споживачі НВ кабелів. Кінцевими споживачами силових НВ кабелів є комунальні, промислові, енергетичні, комерційні підприємства, транспорт, інфраструктура і проекти з відновлюваної енергетики. Така різноманітність підкреслює універсальність і важливу роль силових ЗПЕ НВ кабелів у різних сферах застосування.

Комунальні підприємства віддають перевагу використанню передових кабельних технологій для забезпечення оптимальної роботи електричних мереж, зменшення втрат при передачі та підвищення надійності електропостачання споживачів.

Промисловий сектор є доволі значним споживачем ЗПЕ НВ кабелів, які застосовуються на виробничих потужностях, хімічних підприємствах, гірничодобувних підприємствах, в багатьох енергоємних галузях. Саме в галузі промисловості робиться все більший акцент на енергоефективності – оптимізації споживання енергії, а також на екологічності.

Комерційний сектор включає будівлі, центри зберігання-обробки даних і комерційні комплекси, в тому числі для забезпечення безперебійного електропостачання і розвитку розумного міста.

Сучасний розвиток транспортної інфраструктури обумовлює використання надійних НВ кабелів у проектах електрифікації залізниці та метрополітену.

Способи прокладання передбачають наземне, підземне та підводне розташування кабелів [1, 6, 14, 15]. Традиційним є наземне прокладання силових кабелів зі спрощеним монтажем, економічними перевагами, полегшеним доступом до обслуговування, особливо в сільській місцевості і невеликих містах. Однак різні фактори навколишнього середовища

Таблиця 2

Змінення характеристик ізоляції при введенні наночастинок [8, 26, 27]

Властивість нанокомпозитів	Ефект
Стійкість до ЧР	підвищення
Стійкість до трігів	підвищення, призупинення розвитку
Стійкість до трекінгу	підвищення
Електрична міцність, стійкість до пробою	збільшення / без змін
Просторовий заряд	скорочення (підвищення порогу поля)
Електропровідність	збільшення / зменшення (іони і домішки)
Діелектрична проникність	збільшення / зменшення
Термін служби	значне збільшення

(погодні умови, вітер, рослинність) створюють проблеми для надійності та довговічності підвісних установок.

Підводні НВ кабелі мають вирішальне значення для передачі електроенергії через водойми, для міжнародного обміну електроенергією та підтримки морських проектів у сфері відновлюваної енергетики.

Підземне прокладання кабелів є найбільш надійним, безпечним, естетичним і поширеним, насамперед в густонаселених містах і регіонах із суворими екологічними нормами. Підземні силові кабелі зменшують рівень електромагнітного поля та забезпечують підвищений захист від зовнішніх факторів.

У останні роки розроблено інноваційні технології підземного будівництва і монтажу НВ кабелів, що все ширше застосовуються на практиці [14]:

- відмова від великих відкритих траншей;
- механічне прокладання, коли розкопування траншеї, укладання кабелю та заповнення землею траншеї виконуються одночасно;
- горизонтальне буріння та невеликі тунелі дозволяють уникнути великих відкритих траншей і зовнішніх впливів;
- прямі маршрути тунелів без різких поворотів при зменшенні кількості з'єднань (у досвіді Японії кабельні лінії на напругу 275 кВ довжиною більше 2 км);
- створення багатоцільових тунелів для різної інфраструктури – розміщення кабелів разом з телекомунікацією, системами водо- та газопостачання тощо;
- прокладання нових кабелів в існуючих каналах для заощадження витрат на будівництво;
- невеликі, частково збірні бухти кабелів для зменшення обсягу земляних робіт і вартості будівництва.

Пос'єднання НВ кабелів із сучасними інтелектуальними моніторинговими системами [10, 11, 28]. Оптичні волокна, інтегровані в силові кабелі, (рис. 3) можуть використовуватись для вимірювання фактичних характеристик кабелю вздовж усієї його довжини, а також для передачі даних. Контроль характеристик у реальному часі дає можливість постійно контролювати стан кабелю та визначати місця можливих дефектів і неполадок, передавати диспетчеру інформацію про роботу кабелів у кабельній лінії. Волоконно-оптичний модуль несприйнятливий до електромагнітних впливів та перешкод, забезпечує точне вимірювання характеристик кабелю, дозволяє оцінювати стан кабельної лінії у реальному часі, здійснювати її оперативне управління, прогнозувати і коректувати подальші режими роботи.

Таблиця 3

Волоконно-оптичні технології для НВ кабелів і кабельних ліній

Назва технології	Призначення
DTS (distributed temperature sensing)	розподілене вимірювання температури кабелів
DCR (dynamic cable rating)	дистанційне визначення та коректування струму навантаження кабелів
DAS (distributed acoustic sensing)	визначення деформації (механічних ушкоджень) та температури кабелів
Вимірювання часткових розрядів	винайдення триїнгів та дефектів в ЗПЕ ізоляції
WPT (water penetration test) WPM (water penetration measurement)	тестування на проникнення води
SVL (sheath voltage limiter)	контроль та обмеження напруги зовнішньої оболонки кабелю

На теперішній час у світі успішно реалізуються волоконно-оптичні технології, наведені в табл. 3.

Одним з останніх прикладів застосування інтелектуальних технологій є проект фірми Nexans у Швейцарії з встановлення між електричними станціями Foretaille та Renfile 30 км підземних кабелів на напругу 220 кВ з системою моніторингу температури, що має два 144-жильне волоконно-оптичне з'єднання [29].

Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії. Перехід до відновлюваних джерел електроенергії, таких як вітер та сонячна енергія, потребує створення надійних систем передачі. Інтеграція кабелів з вітровими, сонячними і гідроелектростанціями обумовлена потребою в чистих і стійких відновлюваних джерелах електроенергії і надає широких можливостей для силових ЗПЕ НВ кабелів. НВ кабелі полегшують з'єднання між віддаленими об'єктами виробництва відновлюваної енергії та міськими центрами споживання, тим самим сприяючи сталому розвитку, ефективному розподілу електроенергії та збереженню навколишнього середовища.

Силові НВ кабелі в Україні. Першою в Україні надвисоковольтною кабельною лінією з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу 330 кВ стала дволанцюгова підземна кабельна лінія загальною довжиною 12,8 км для електропостачання сталеливарного комплексу заводу "Дніпросталь" [30].

ПАТ "Завод Південкабель" випускає силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу від 110 до 330 кВ – одножильні з алюмінієвою/мідною жилою сегментованої конструкції Мілікен з перерізами від 1200 мм², також зі свинцевою оболонкою, для прокладання в ґрунті, зокрема у вологому ґрунті (траншеях, лотках, трубах), для відкритого прокладання у кабельних спорудах (кабельних тунелях, каналах, коробах, блоках, шахтах, галереях, кабельних естакадах) тощо, забезпечуючи промислові підприємства, електро-станції, гірничозбагачувальні комбінати, нафтові родовища та вугільні шахти, метрополітени і новобудови, залізниці та міський транспорт [22, 31]. Крім того, завод виготовляє силові НВ кабелі з волоконно-оптичними модулями для інтелектуальних мереж [12].

Подальші можливості й обмеження НВ кабелів. Розвиток і поширення НВ кабелів пов'язуються, перш за все, з модернізацією застарілої енергетичної інфраструктури, підвищенням надійності електромереж, підтриманням економічного зростання та переходом на чисті джерела енергії в розвинених регіонах.

Як очікується [4], НВ кабельні системи відіграватимуть центральну роль у створенні інтелектуальних енергетичних мереж. На основі так званих "гібридних силових і комунікаційних кабелів" прогнозуються потужні системи для передачі інформації та контролю мереж при збереженні водночас високої надійності розподілу та передачі електроенергії. Завдяки таким кабельним технологіям, можна буде здійснювати повний моніторинг потоків електроенергії в існуючих розподільних мережах [4].

Разом з цим, основними проблемами залишаються висока початкова вартість ЗПЕ НВ кабелів порівняно зі звичайними силовими кабелями, складні процеси монтажу, потреба в спеціалізованому обладнанні та досвіді виробництва й обслуговування кабелів.

Міжнародна нормативна документація включає ряд стандартів і технічних умов тестування НВ кабелів – ІЕС 60840, ІЕС 62067 (українські стандарти ДСТУ ІЕС 60840:2021, ДСТУ ІЕС 62067:2014), стандарт якості роботи кабелів – ІЕС60331, а також системи управління якістю (ISO 9001) та екологічного менеджмента (ISO 14001) [14]

Висновки. У роботі представлено та проаналізовано наступні основні тенденції у використанні і розвитку надвисоковольтних кабелів зі зшитого-поліетиленовою ізоляцією.

- Досягнення в конструктивному виконанні кабелів, значний прогрес у створенні нових ізоляційних матеріалів і технологій, зокрема композитних матеріалів на основі зшитого поліетилену з додаванням нанорозмірних часток і модифікацією структури, що покращує експлуатаційні характеристики кабелів і надійність систем передачі електроенергії.

- Переважне використання та інноваційні технології підземного прокладання кабельних ліній, що узгоджується з гармонійним розміщенням кабелів на міських територіях та сучасними екологічними вимогами, а також відповідає напрямку переходу до розумних міст та стійкої енергетичної інфраструктури.

- Інтеграція з волоконно-оптичними технологіями для моніторингу та управління в режимі реального часу сучасними кабельними лініями, що забезпечує попередження можливих несправностей, ефективне обслуговування та підвищення надійності електромереж.

– Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії для передачі електроенергії на великій відстані з мінімальними втратами від віддалених об'єктів виробництва відновлюваної енергії до населених пунктів і центрів споживання.

– Акцент на екологічності виробничих процесів, екологічно чистих матеріалах і компонентах, які піддаються переробці, зменшенні впливу на навколишнє середовище, що відповідає світовій тенденції екологічно безпечного енергетичного майбутнього.

– Проекти розширення і з'єднання електромереж на основі надвисоковольтних кабелів із зшитого поліетиленовою ізоляцією з метою створення об'єднаної і стійкої мережі для постачання і обміну електроенергією між великими регіонами і країнами.

Силові кабелів надвисокої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену знаходиться в центрі уваги глобального енергетичного сектору і відіграють вирішальну роль у формуванні майбутньої енергетичної інфраструктури.

Роботу виконано за науково-дослідними темами "Елрес" (номер держ. реєстрації 0123U100693, КПКВК 6541030) та "Режим 2" ((номер держ. реєстрації 0123U100769, КПКВК 6541230).

1. 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.
2. Wald D.F. Evolution and future of extra high voltage cables. *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, QC, Canada, 31 May–3 June 2009. P. 495–499. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166398>
3. EHV XLPE Power Cable Market <https://dataintel.com/report/ehv-xlpe-power-cable-market>
4. Extra high voltage cables market updates (2023-2030). <https://www.linkedin.com/pulse/extra-high-voltage-cables-market-updates-2023-2030>
5. Cable Power. Eurocable. Booklet. 23 p. <https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/Revolve-Europacable-Cable-Power-June-14.pdf>
6. Wendt V. Underground cables in Europe: overview. The European Association of Wire and Cable Manufacturers and National Associations. 5th July 2017, 14 p. https://renewables-grid.eu/fileadmin/user_upload/Files_RGI/Event_material/Prospects_of_undergrounding_power_lines/2017_RGI_workshop_underground_cables_Volker_Wendt_Europacable.pdf
7. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, September 2013, Vol. 29, No 5. P. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585854>
8. Pleša I., Nottingher P.V., Stancu C., Wiesbrock F., Schlögl S. Polyethylene nanocomposites for power cable insulations. *Polymers* (www.mdpi.com/journal/polymers), 2019, Vol. 11(1). 60 p. <https://doi.org/10.3390/polym11010024>
9. Wang J.Q., Li W.K., Zhang W.Y., Wan B.Q., Zha J.W. Aging and life control of cross-linked polyethylene as cable insulation material. *Acta Physica Sinica*, 2024. No 7. P. 078801. DOI: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240201>
10. Кириленко О.В., Щерба А.А., Кучерява І.М. Інтелектуальні технології моніторингу технічного стану сучасних високовольтних кабельних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*, 2021, № 6. С. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.029>
11. Кучерява І.М. Сучасні інтелектуальні системи моніторингу силових кабелів та кабельних ліній. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, 2023. Вип. 66. С. 111–123. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.111>
12. *Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения*. Харьков: Майдан, 2017, 64 с.
13. Sidabutar E.R.A. 500-kV XLPE underground cable line construction for sustainability electric power transmission in city centers. *Proceeding International Conference on Science and Engineering*, 2021, Vol. 4, P. 182–191. <https://sunankalijaga.org/prosiding/index.php/icse/article/view/656>
14. Schroth R. HV and EHV insulated power cables: evolutions and trends. P. 119–143. <https://www.stjornarradid.is/library/01--Frettatengt---myndir-og-skrar/ANR/ANR---Raflinur-i-jord/30-International-cablemakers-federation-Schroth.pdf>
15. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. М.: Папирус-Про. 2005. Т. 4. 640 с.
16. Кабельные системы высокого напряжения 110–500 кВ. Nexans. 54 с.
17. XLPE power cable systems for high and extra-high voltages. Südkabel. 2004, Cables Catalogue, 30 p.
18. Высоковольтные кабели. Prysmian Group. 13 с.
19. Современные решения в области силовых кабелей. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена среднего и высокого напряжения. ABB. 20 с.
20. LS EHV Cable System. 66–500kV XLPE Cable & Accessories. Cables Catalogue, 64 p. www.lscable.com
21. High and extra high voltage power cable systems 63 to 500 kV. Silec Cable. Booklet. 4 p.

22. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 45 до 330 кВ. Каталог ПАТ "Завод Южкабель". <https://electrotorg.biz.ua/userfiles/public/-Кабели-XLPE-45-330-kB.pdf?srsId=AfmBOOrNsTide2IVM24OFDUMIBDuNfXcehUSNB1TCBe4R-GOAxOik78V>
23. Лету Ф. Токопроводящие жилы высокого качества для высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей (типа «Милликен»). *Кабели и провода*. 2008, № 1(308). С. 18–21.
24. Мендельсон А., Аартс М.У. Мировой опыт применения изоляции из триингостойкого сшитого полиэтилена. *Кабели и провода*, 2005. № 5 (294). С. 23–29.
25. Lesaint C., Risinggard V., Hestad F., Hvidsten S. Self-healing composites for high voltage electrical insulation. *9th International Conference on Insulated Power Cables*, Jicable'15, Versailles 21–25 June, 2015, 6 p.
26. Tanaka T., Imai T. Advances in nanodielectric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2013, Vol. 29, P. 10–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6410535>
27. Wang J.Q., Li W.K., Zhang W.Y., Wan B.Q., Zha J.W. Aging and life control of cross-linked polyethylene as cable insulation material. *Acta Physica Sinica*, 2024, no. 7, p. 078801 – <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240201>
28. Smart grid solutions. Prysmian Group. 16 p. https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/smartgrid_FINAL_LOW.pdf
29. Nexans виграла тендер від Swissgrid на модернізацію електромережі Швейцарії. 11 травня 2023. <https://mardalcables.com/nexans-modernizatsiia-elektromerezhi-dlia-swissgrid/?srsId=AfmBOOrSxpONYJgJGJKU0wQNnsMixulzu-KU-C2YVqO-hAjuS8vpQC7o>
30. Лях В.В., Молчанов В.М., Судаков И.В., Павличенко В.П. Кабельная линии напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16
31. ПАТ "Завод Південкабель". <https://www.yuzhcable.info/cat/12>

UP-TO-DATE EXTRA-HIGH-VOLTAGE CABLES WITH CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATION (FEATURES AND DEVELOPMENT TRENDS)

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv-57, Ukraine

e-mail: rB.irinan@gmail.com

The paper presents and analyzes the basic advantages and trends in the development and application of extra-high-voltage cables with cross-linked polyethylene insulation. Due to their ability to support the integration with renewable energy sources and fiber-optic technologies, increase the network efficiency, reduce the transmission losses, as well as owing to the achievements and new technologies in designs and improvements in insulation materials, these cables play a significant role in the development of the world's energy industry and the creation of future energy infrastructure. Ref. 31, fig. 3, tables 3.

Keywords: power cable, extra-high voltage, cross-linked polyethylene insulation, fiber-optic technologies, renewable energy sources, composite insulating materials, environmental friendliness.

1. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences. 2013. 550 p. (Rus)
2. Wald D.F. Evolution and future of extra high voltage cables. *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, QC, Canada, 31 May–3 June 2009, Pp. 495–499. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166398>
3. EHV XLPE Power Cable Market. <https://dataintelo.com/report/ehv-xlpe-power-cable-market>
4. Extra high voltage cables market updates (2023-2030). <https://www.linkedin.com/pulse/extra-high-voltage-cables-market-updates-2023-2030>
5. Cable Power. Eurocable. Booklet. 23 p. <https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/Revolve-Europacable-Cable-Power-June-14.pdf>
6. Wendt V. Underground cables in Europe: overview. The European Association of Wire and Cable Manufacturers and National Associations. 5th July 2017, 14 p. – https://renewables-grid.eu/fileadmin/user_upload/Files_RGI/Event_material/Prospects_of_undergrounding_power_lines/2017_RGI_workshop_underground_cables_Volker_Wendt_Europacable.pdf
7. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, September 2013, Vol. 29. No 5. Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585854>
8. Pleşa I., Notingher P.V., Stancu C., Wiesbrock F., Schlögl S. Polyethylene nanocomposites for power cable insulations. *Polymers* (www.mdpi.com/journal/polymers), 2019, Vol. 11(1), 60 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11010024>
9. Wang J.Q., Li W.K., Zhang W.Y., Wan B.Q., Zha J.W. Aging and life control of cross-linked polyethylene as cable insulation material. *Acta Physica Sinica*, 2024, no. 7, P. 078801. DOI: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240201>
10. Kyrylenko O.V., Shcherba A.A., Kucheriava I.M. Intellectual technologies for monitoring of technical state of up-to-date high-voltage cable power lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2021. No. 6. Pp. 29–40. <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.029> (Ukr)

11. Kucheriava I.M. Monitoring systems for modern power cable lines. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2023. Is. 66, Pp. 111–123. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.111> (Ukr)
12. Guiding technical material on the construction, testing and operation of modern extra-high-voltage power cable lines. Kharkiv. Maidan, 2017, 64 p. (Rus)
13. Sidabutar E.R.A. 500-kV XLPE underground cable line construction for sustainability electric power transmission in city centers. *Proceeding International Conference on Science and Engineering*, 2021. Vol. 4. Pp. 182–191. <https://sunankalijaga.org/prosiding/index.php/icse/article/view/656>
14. Schroth R. HV and EHV insulated power cables: evolutions and trends. Pp. 119–143. <https://www.stjornarradid.is/library/01--Frettatengt---myndir-og-skrar/ANR/ANR---Raflinur-i-jord/30-International-cablemakers-federation-Schroth.pdf>
15. Makarov E.F. Handbook on the 4–35 kV and 110–1150 kV power networks. Moskva: Papirus-Pro. 2005. Vol. 4. 640 p. (Rus)
16. Cable systems for high-voltage of 100–500 kV. Nexans. 54 p. (Rus)
17. XLPE power cable systems for high and extra-high voltages. Südkabel. 2004, Cables Catalogue, 30 p.
18. High-voltage cables. Prysmian Group. 13 p. (Rus)
19. Modern solutions in the field of power cables. Cables with cross-linked polyethylene insulation for medium and high voltage. ABB. 20 p. (Rus)
20. LS EHV Cable System. 66–500kV XLPE Cable & Accessories. Cables Catalogue, 64 p. – www.lscable.com
21. High and extra high voltage power cable systems 63 to 500 kV. Silec Cable. Booklet. 4 p.
22. Power cables with XLPE insulation for voltage from 45 to 330 kV. Private join-stock company "Youzhcable works". Cable production guide. <https://electrotorg.biz.ua/userfiles/public/-Кабели-XLPE-45-330-кВ.pdf?srsId=AfmBOorNsTide2lVM24OFDUMIBDuNfXcehUSNB1TCBe4R-GOAxOik78V> (Rus)
23. Letu F. High-quality conducting cores for high-voltage and ultra-high-voltage cables (Milliken-type). *Kabeli i provoda*, 2008. No 1(308). Pp. 18–21. (Rus)
24. Mendelson A., Aarts M.U. World experience in the application of insulation made of tree-resistant cross-linked polyethylene. *Kabeli i provoda*, 2005. No 5 (294). Pp. 23–29. (Rus)
25. Lesaint C., Risinggard V., Hestad F., Hvidsten S. Self-healing composites for high voltage electrical insulation. *9th International Conference on Insulated Power Cables*, Jicable'15, Versailles 21–25 June, 2015, 6 p.
26. Tanaka T., Imai T. Advances in nanodielectric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2013, Vol. 29. Pp. 10–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6410535>
27. Wang J.Q., Li W.K., Zhang W.Y., Wan B.Q., Zha J.W. Aging and life control of cross-linked polyethylene as cable insulation material. *Acta Physica Sinica*, 2024, No 7. P. 078801. DOI: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240201>
28. Smart grid solutions. Prysmian Group. 16 p. https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/smartgrid_FINAL_LOW.pdf
29. Nexans won a tender from Swissgrid to modernize the electrical system in Switzerland. May 11, 2023. <https://mardalcables.com/nexans-modernizatsiia-elektromerezhi-dlia-swissgrid/?srsId=AfmBOorSxpONYJgiGJKU0wQNnsMixulzu-KU-C2YVqO-hAjuS8vpQC7o> (Ukr)
30. Lyach V.V., Molchanov V.M., Sudakov I.V., Pavlichenko V.P. 330 kV cable line is a new step in development of Ukrainian power networks. *Elektricheskie seti i sistemy*. 2009. No 3. Pp. 16–21. (Rus)
31. Private join-stock company "Youzhcable works". XLPE-insulated power cables for voltage from 220 to 330 kV. <https://www.yuzhcable.info/cat/12/lang/en>

Надійшла: 06.01.2025

Прийнята: 03.02.2025

Submitted: 06.01.2025

Accepted: 03.02.2025