

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.315.21:621.315.3:621.315.61

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.052>

СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОВОДІВ

А.А. Щерба*, акад. НАН України, **І.М. Кучерява**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, Київ, 03057, Україна

e-mail: rB.irinan@gmail.com

У роботі представлено огляд літературних джерел та змістовний аналіз сучасних ізоляційних матеріалів для силових кабелів та електричних проводів. Висвітлено стан науково-технічної проблеми відносно наявних ізоляційних матеріалів, їхнього вибору за електрофізичними, тепловими й екологічними характеристиками для забезпечення надійної, безпечної та довготривалої роботи кабельно-провідникових систем. Наведено переваги та обмеження зшито-поліетиленової ізоляції, описано її сучасну модифікацію – триїнгостійкий зшитий поліетилен. Проаналізовано наукові дослідження в напрямку створення перспективних нанокомпозитних та нових екологічно чистих ізоляційних матеріалів, основним результатом вивчення яких є покращення основних властивостей полімерів завдяки додаванню нанорозмірних часток і модифікації структури. Бібл. 50, рис. 8, табл. 5.

Ключові слова: термопластична і термореактивна ізоляція, зшити-поліетиленова ізоляція, триїнгостійка ізоляція, силові кабелі, електричні проводи, нанокомпозитні ізоляційні матеріали.

Вступ. Збільшення попиту на електроенергію, що на сьогодні спостерігається в усьому світі, призводить до зростання обсягу ринку електроізоляційних матеріалів. Розширенню ринку електрообладнання та ізоляційних матеріалів сприяє також швидка урбанізація та розвиток електроенергетичної галузі.

Електроізоляційні матеріали використовуються як конструкційні, для ізоляції струмопровідних частин різних електричних пристроїв, зокрема трансформаторів, автоматичних вимикачів, конденсаторів, кабелів, повітряних ліній електропередачі, електричних двигунів і генераторів, обертальних електричних машин, розподільчих пристроїв, пристроїв захисту від перенапруг і т. ін. Відносно електроізоляційних матеріалів лідирує сектор виробництва кабелів і проводів, і за прогнозами залишатиметься таким до 2030 р. [1].

У 2024 р. обсяг світового ринку ізольованих кабелів і проводів оцінювався в 221,1 млрд. дол. США. Очікується досягнення його розміру до 329,1 млрд. доларів у 2032 р. з щорічним зростанням у період 2025–2032 рр. на 5,1 % [2, 3]. Ключовими виробниками та учасниками ринку електроізоляційних матеріалів, зокрема призначених для кабелів і проводів, є General Electric, Owens Corning, ABB, Siemens, Nexans SA, Furukawa Electric Co. Ltd, The Dow Chemical Company, Nikkan Industries Co., Ltd, Electrical Components International, Encore Wire Corporation [1–4].

Розширення повітряних та кабельних ліній електропередачі, здійснення нових великих енергетичних проєктів суттєво збільшують попит на електроізоляційні матеріали. Саме від якості ізоляційних матеріалів залежать втрати енергії, надійність та безперебійність роботи ліній електропередачі. Ізоляція проводів також визначає ефективність та безпеку їхньої роботи.

Полімерна ізоляція поділяється на термопластичну та термореактивну. Наразі для електроізоляції більша перевага віддається термореактивним матеріалам. Так, у 2021 р. сегмент термореактивних матеріалів займав найбільшу частину (28 %) у галузі електричної ізоляції. Очікується, що він зростатиме до 2027 р. значними темпами [3]. В останні роки тенде-



нції в розвитку енергетичного обладнання та створенні нових ізоляційних матеріалів силових кабелів значною мірою визначає захист навколишнього середовища. У цьому напрямку проводяться дослідження з розробки нових перспективних композиційних матеріалів на основі мікро- та нанорозмірних складових, а також регулювання наноструктури ізоляції для силових кабелів з покращеними властивостями та екологічно чистих кабелів нового покоління [5–14].

Ця робота представляє огляд, загальний опис та перспективи розвитку сучасних електроізоляційних матеріалів для визначення перспектив основних типів полімерної ізоляції при промисловому виготовленні силових кабелів та електричних проводів.

Основні типи полімерної ізоляції для силових кабелів і проводів, які відіграють значну роль в електричних пристроях та системах. Полімерна ізоляція є важливим діелектричним матеріалом кабелів і проводів. Вона призначена для реалізації їхньої безпечної та надійної роботи, зокрема для запобігання контакту провідних елементів один з одним, уникнення пошкодження провідників за допустимої напруги та захисту від впливу навколишнього середовища. Ізоляція поділяється на внутрішню, що оточує і захищає струмопровідну жилу від небажаних електричних контактів з іншими струмопровідними елементами, і зовнішню, яка захищає кабель/провід від механічних, хімічних, теплових та інших впливів, а також людей від контактів із жилою.

Загалом ізоляційні матеріали, що використовуються в кабелях, повинні мати високу діелектричну міцність для унеможливлення електричного пробоя, високі механічні характеристики, зокрема міцність і негігроскопічність, щоб не вбирати вологу з повітря чи ґрунту, не піддаватися хімічним впливам кислот і лугів, до того ж, бути негорючими і мати прийнятну вартість. Жоден ізоляційний матеріал не відповідає всім наведеним властивостям, і вибір типу ізоляції зазвичай залежить від особливостей використання кабелів і якості ізоляції, яку потрібно забезпечити.

Електроізоляція існує в різних варіантах, кожен з яких підходить для окремих особливостей її застосування. Для різних типів проводів і кабелів обирається свій матеріал ізоляції залежно від їхнього призначення й умов експлуатації, зокрема від діелектричної і механічної міцності, стійкості до корозії, вогнестійкості, температурних умов тощо. Фактори, що впливають на вибір ізоляційних матеріалів, включають не лише електричні властивості й температурні показники, але й екологічні міркування, вартість і доступність.

Відповідно до різних експлуатаційних і екологічних характеристик ізоляція проводів виготовляється із пластику, гуми або фторполімеру (рис. 1) [6, 14–16].

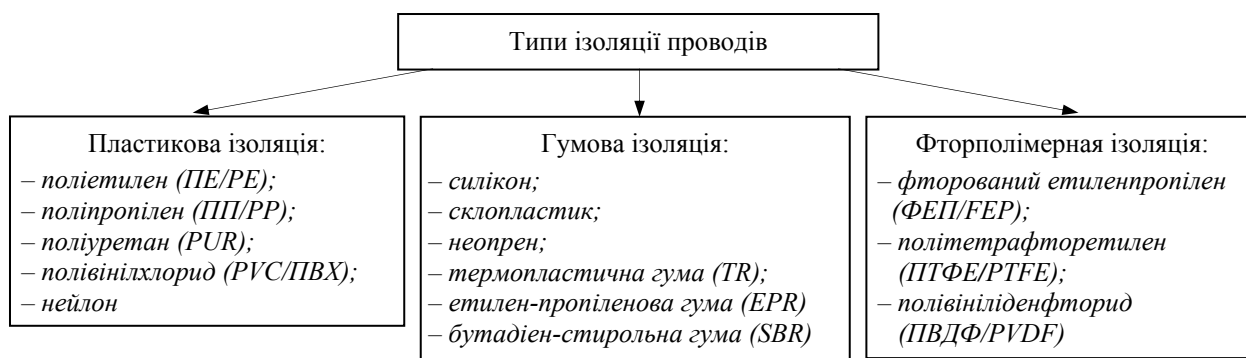


Рис. 1. Типи ізоляції проводів

Сучасним універсальним електроізоляційним матеріалом є поліетилен, який забезпечує високу електричну та хімічну стійкість.

Найбільш вживаними електроізоляційними матеріалами для кабелів є термопласти (thermoplastic), реактопласти (thermosetting plastic) та паперові (paper-based) матеріали (рис. 2) [6, 14, 15, 17–21].

Термопласти – це полімерні матеріали, які при нагріванні розм’якшуються, а при охолодженні твердіють. Їх можна багаторазово пом’якшувати та зміцнювати, нагріваючи та охолоджуючи, не впливаючи на їхні характеристики. Завдяки цій властивості виготовлені з

них компоненти можна переробляти на нові деталі та вироби. Типові термопласти, що використовуються для ізоляції кабелів, включають поліетилен, поліпропілен та полівінілхлорид (рис. 2).

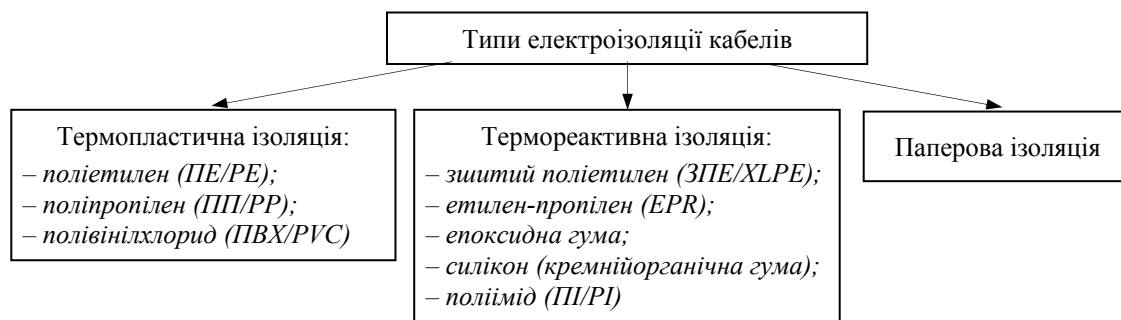


Рис. 2. Типи ізоляції силових кабелів

На відміну від термопластів, реактопласти можна формувати або відливати лише один раз – після затвердіння матеріал зазнає хімічних змін, які запобігають зміні його форми, тобто обробка реактопласту супроводжується необоротною хімічною реакцією, що призводить до утворення неплавкого і нерозчинного матеріалу.

Реактопласти підходять для високовольтних кабелів і жорстких умов експлуатації. Типові термореактивні електроізоляційні матеріали для виготовлення електричних кабелів та проводів використовують структурно модифікований, так званий зшитий поліетилен (ЗПЕ), включають етилен-пропіленову гуму (EPR, ethylene propylene rubber), етилен-пропілендієновий мономер EPDM. Характерні максимальні значення напруженості електричного поля для ЗПЕ та етилен-пропіленової ізоляції наведено в табл. 1 [22, 23].

Паперова ізоляція все ще використовується при виготовленні електричних кабелів, але зазвичай для заміни окремих ушкоджених ділянок давно працюючих кабельних ліній. Цей матеріал просочується діелектричною рідиною і здебільшого покривається свинцевою оболонкою для захисту від проникнення вологи.

У табл. 2 наведено порівняння кабелів із різною ізоляцією.

Найбільш поширені типи ізоляції силових кабелів включають ЗПЕ, ПВХ та етилен-пропіленову ізоляцію (EPR).

При виборі типу ізоляції та оболонки силових кабелю і проводів ураховуються номінальна напруга, робоча температура, умови навколишнього середовища, пожежна безпека, довговічність матеріалу, що мають вирішальне значення для надійної та ефективної передачі електроенергії.

Ізоляційні матеріали для оболонок кабелів і проводів. Зовнішня оболонка кабелів та проводів призначена для безпеки контактів з ними обслуговуючого персоналу та інших людей, а також для захисту провідників та ізоляторів від зовнішніх впливів, механічних пошкоджень, вологи та ін., що призводить до порушення ізоляції.

Основними сучасними матеріалами для оболонок кабелів і проводів є:

– ПВХ – найпоширеніший і найдешевший варіант для кабелю; забезпечує гнучкість, низьку вартість, достатньою розумну довговічність; характеризується стійкістю до масел і води; недоліки: деякі види ПВХ погано вивітрюються та сприйнятливі до ультрафіолетового світла, під час горіння можуть виділятися отруйні галогенні гази, токсичні пари та дим;

– LSF (low smoke & fume) – модифікована суміш ПВХ, яка може виробляти менше HCl та диму (лише до 22 % HCl), ніж кабелі зі звичайним ПВХ, що виділяє до 28 % HCl;

Таблиця 1

Максимальні значення поля для кабелів
з різною ізоляцією

Напруга кабелів	надвисока	висока	середня
Тип ізоляції	Мах напруженість поля, кВ/мм		
Етилен-пропілен	8	5	3
ЗПЕ	11	6	3

Таблиця 2

Властивості кабелів із різною ізоляцією

Ізоляція кабелів	Переваги	Недоліки
ЗПЕ ізоляція – термореактивний матеріал	Високі експлуатаційні характеристики (електроізоляційні властивості, стійкість до високих температур, достатня вологостійкість, механічна міцність), надійність, безпека, прийнятність для монтажу і ремонту, невеликі експлуатаційні витрати	Чуттєвість до водних трингів (деякі сучасні ЗПЕ полімери мають трингостійкість), низька здатність до переробки як термореактивного матеріалу, більш дорогий, ніж ПВХ
ПВХ пластикат – термопластик	Гнучкість, негорючість, хімічна стійкість, довговічність, можливість прокладання кабелів на необмеженій різниці рівнів, низька ціна, широка доступність і популярність	Чуттєвість до вологи, вміст галогенів, виділення токсичних і корозійних речовин при нагріві, не підходить для силових кабелів середньої та високої напруги
Поліетилен (ПЕ) – термопластик	Низькі діелектричні втрати, висока початкова діелектрична міцність	Висока чуттєвість до водних трингів, руйнування при високих температурах
Гумова ізоляція	Гнучкість, технологічність, невисока ціна	Недостатня механічна міцність (необхідні спеціальні захисні покриття), низька вологостійкість
Паперова ізоляція	Багаторічний позитивний досвід експлуатації, стабільні електричні характеристики, висока стійкість до комутаційних перенапруг, прийнятна ціна	Складний і низькопродуктивний процес виготовлення, відсутність вологостійкості (необхідність металеві оболонки), велика вага конструкції, складність ремонту, висока ціна
Етил-пропілен (EPR) – термореактивний матеріал	Висока гнучкість, низька чуттєвість до водного тринга, високі робочі температури; більш гнучкий, ніж ПЕ та ЗПЕ, але має вищі за них діелектричні втрати; більш стійкий до впливу озону й ультрафіолету, ніж ПВХ і ЗПЕ	Потребує неорганічних наповнювачів і добавок, низька здатність до переробки

– LSHF (low smoke halogen free) – компаунди, зовні схожі на ПВХ; не виділяють значної кількості токсичних випарів та диму; виділяють не більше 0,5 % HCl при горінні; дорожчі, ніж кабелі з ПВХ або LSF; забезпечують підвищену безпеку і використовуються у громадських місцях та на відповідальних об'єктах;

– зшитий поліетилен, який може мати підвищені жорсткість і твердість, водночас ПЕ низької щільності (LDPE) є більш гнучким; якщо ПЕ має ультрафіолетову стабілізацію, то забезпечує високу стійкість до вологи та погодних умов; оболонки з поліетилену високої щільності (HDPE) стійкі до атмосферних впливів, підходять для зовнішнього і підземного застосування;

– натуральна гума, яка є водонепроникною, хімічно стійкою, надзвичайно гнучкою, зберігає гнучкість у широкому діапазоні температур і навіть за мінусової температури; синтетичні каучукові суміші пропонують схожі характеристики і мають високу вартість;

– силікон (SIR, silicone rubber), який застосовують за високих або низьких температур: від -50°C до $+180^{\circ}\text{C}$; має високу стійкість до ультрафіолетового випромінювання, під час дії вогню не виділяє диму або токсичних газів, однак матеріал м'який, схильний до пошкоджень, потребує обережного встановлення;

– неопрен – синтетична гума, яка має високу хімічну стійкість, стійкість до масел, характеризується міцністю на розрив та гнучкістю навіть за низьких температур;

– поліуретан (PUR) має хорошу механічну та хімічну стійкість; підходить для згинання та перегинання; залежно від суміші може не містити галогенів і бути вогнестійким, не ідеально підходить для екстремальних температур; зазвичай робочий діапазон від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$;

– тефлон (Teflon®, політетрафторетилен PTFE) негорючий, дуже гнучкий, нетоксичний та екологічно безпечний матеріал; використовується в складних умовах за температур від -75°C до $+200^{\circ}\text{C}$ або короткочасно до $+250^{\circ}\text{C}$; не піддається впливу більшості видів палива, масел і рідин.

Найбільш поширеними матеріалами для оболонки кабелів і проводів є ПВХ, поліетилен та низькодимний безгалогенний матеріал LSHF.

Ізоляція зі зшитого поліетилену. Зшитий поліетилен (ЗПЕ/XLPE) широко використовується в галузі силових кабелів низької, середньої, високої та надвисокої напруги завдяки своїм високим електроізоляційним і механічним властивостям. Перевагами поліетилену є висока електрична міцність, низькі значення густини матеріалу, відносної діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат, гнучкість, достатня стійкість до поглинання води. Зшитий поліетилен є одним із найкращих ізоляційних матеріалів, оскільки має об'ємну структуру молекулярної решітки [20].

Порівняльні характеристики ЗПЕ ізоляції з різними матеріалами представлено в табл. 3 [6, 24]. Важливо, що найбільш високу температуру експлуатації мають зшитий поліетилен (90°C) з температурним обмеженням 250°C , етилен-пропілен (90°C) та кремнійорганічна гума (95°C). Взагалі ЗПЕ підходить для застосування за високих температур. Така ізоляція має дещо вищі діелектричні втрати, ніж поліетилен (PE), але й більш високу стійкість до старіння.

Таблиця 3

Порівняння різних ізоляційних матеріалів

Характеристики	ПВХ / PVC	ПЕ / PE	ЗПЕ / XLPE
Густина ($\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$)	1,4	0,92	0,92
Максимальна тривала температура ($^{\circ}\text{C}$)	60–70	75	90
Температура розм'якшення ($^{\circ}\text{C}$)	120	105–115	127
Температура при миттєвому к.з. ($^{\circ}\text{C}$)	135–160	150	250
Опір ізоляції ($\text{МОм}\cdot\text{км}^{-1}$)	20	1000	1000
Об'ємний опір ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)	1012–1015	1017	1017
Електрична міцність ($\text{кВ}\cdot\text{см}^{-1}$)	20–35	20–35	35–50
Діелектрична проникність (60 Гц)	6–8	2	2,3
Тангенс кута діелектричних втрат (60 Гц)	0,1	10^{-4}	10^{-4}
Стійкість до навколишнього середовища	відмінна	низька	середня
Стійкість до старіння	низька	середня	відмінна
Стійкість до впливу мастил	низька	середня	відмінна
Крихкість за низької температури	низька	середня	відмінна

У процесі експлуатації в ізоляції зі зшитого поліетилену можуть виникати провідні, зокрема водні канали – деревоподібні, насичені парами води утворення, які називаються триїнгами. За походженням розрізняються три види триїнгів:

– електричні триїнги, що виникають при дії змінного струму та високих значеннях імпульсної напруги; розвиваються внаслідок іонізаційних процесів при тривалому електричному старінні кабелю;

– водні триїнги, які з'являються при проникненні води в ізоляцію, зокрема при пошкодженні оболонки кабелів; розвиток такого типу триїнгів може призводити до значного зменшення опору ізоляції і в результаті до пробою;

– триїнги хімічного походження утворюються при накопиченні в ізоляції продуктів хімічних реакцій між кислотами та металевою жилою.

Удосконаленням зшитого поліетилену є триїнгостійкий матеріал TRXLPE (tree retardant cross-linked polyethylene), що представляє на сьогодні надійне рішення для систем передачі та розподілу електроенергії. Спеціальна термореактивна пластикова суміш, що використовується для ізоляції проводів і кабелів, здатна уповільнювати розвиток триїнгів. На рис. 3 показано характерні триїнги в звичайному ЗПЕ (ліворуч) та триїнгостійкому ЗПЕ (праворуч) [25]. Удосконалений ЗПЕ призначений для підтримки високої електричної

міцності ізоляції, низьких електричних втрат, роботи з високими температурами та суворими умовами навколишнього середовища. Такий матеріал є сучасним, більш довговічним (зберігає експлуатаційні характеристики понад 25 років), рентабельним, має підвищену надійність, може бути використаний для різних застосувань, зокрема для ізоляції кабелів високої напруги. До прикладу, на рис. 4 показано довжину силових кабелів середньої напруги з різними типами поліетиленової ізоляції, встановлених у США в останні роки [23].

Нині ведуться теоретичні та експериментальні роботи в напрямку створення самовідновлювальних електроізоляційних композиційних матеріалів [10] для високовольтних електричних компонентів. Такі композиції можуть включати, наприклад, епоксидну смолу, наповнену мікрокапсулами з мономером як "загоювальним" агентом [10] для трігів та інших мікро- та макродефектів в ізоляції. Так, експериментальні результати [10] показали, що мікрокапсули розриваються, коли вони досягають електричного трігіву, і запобігають подальшому його розвитку.

Методи зшивання поліетилену. У звичайному поліетилені ідеально поєднуються електрофізичні та технологічні властивості, однак ізоляція кабелів та проводів із термопластичного поліетилену має ряд суттєвих недоліків [20], наприклад, втрата форми і погіршення механічних властивостей за високих температур, наявність залишкових механічних напруг, що виникають при виготовленні ізоляції і за високих робочих температур можуть призводити до розтріскування ізоляції. Такі проблеми вирішуються застосуванням технології зшивання, при якій змінюється молекулярна структура поліетилену та утворюються нові тривимірні поперечні зв'язки між макромолекулами [20]. Після зшивання поліетилену збільшується його молекулярна вага, зменшується подовження на розрив, суттєво покращуються еластичні властивості, термостійкість, хімічна стійкість, міцність до удару, стійкість до стирання та до утворення тріщин [26].

Нині найбільш поширеними є два методи зшивання поліетилену [19, 20, 26–28].

1. Пероксидний метод передбачає введення у полімер пероксидів (наприклад, перекису декумилу) і далі його зшивання за високої температури (250–400°C), високого тиску (12–20 атм.) в інертному газовому (азотному) середовищі. Принципово важливим є температурний контроль. Результуюча тривимірна полімерна сітка однорідна, має низький натяг і високу гнучкість. Пероксидне зшивання забезпечує стабільність електричних характеристик ізоляції, особливо для кабелів на високу і надвисоку напругу (від 6 до 500 кВ). Це складна, енергоінтенсивна і найбільш дорога технологія, однак і ступінь зшивання поліетилену найбільша – 75 % (зазвичай максимальна доля зшивання визначається кількістю перексиду).

2. Силановий метод – це хімічний метод зшивання поліетилену за допомогою органосиланів у водному/паровому середовищі за температури до 70–90°C або в умовах навколишнього середовища (20°C) більш тривалий час. Максимальна доля зшивання залежить від

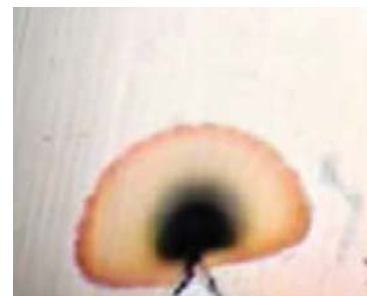
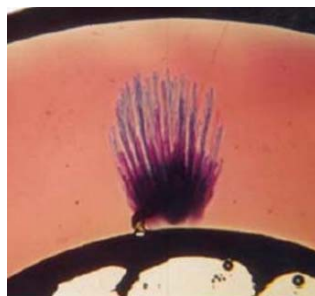


Рис. 3. Розвиток трігів у звичайному ЗПЕ (ліворуч) та трігостійкому ЗПЕ (праворуч) матеріалах

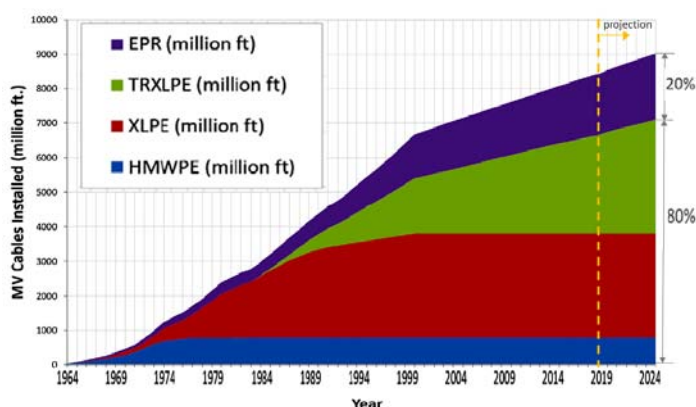


Рис. 4. Довжина в футах кабелів середньої напруги з трігостійкою ЗПЕ ізоляцією (TRXLPE), встановлених у США в останні роки, порівняно з кабелями зі звичайною ЗПЕ ізоляцією (XLPE), високомолекулярною поліетиленовою ізоляцією (HMWPE) та етилен-пропіленовою ізоляцією (EPR) [23]

кількості силану і часу витримки в паровій бані. Це більш простий і гнучкий технологічний метод. Для ізоляції кабелів 1–10 кВ поліетиленові суміші, що зшиваються силаном, визнані в усьому світі найбільш економічними й ефективними матеріалами. Однак застосування силанового способу зшивання при виробництві кабелів середньої напруги обмежено, оскільки кабелі 10–35 кВ мають достатньо велику за товщиною ізоляцію, а силановий метод не забезпечує рівномірності фізико-механічних властивостей в радіальному її напрямку.

Порівняння методів, зокрема в технологічному плані, наведено в табл. 4 [20, 26, 27].

Таблиця 4

Порівняння пероксидного і силанового зшивання поліетилену

Критерій	Пероксидне зшивання	Силанове зшивання
Капітальні інвестиції	високі	низькі
Вартість початкових матеріалів	низька	дещо вища
Вартість суміші для виготовлення	середня	висока
Обладнання (екструдер)	спеціальне	стандартне
Реалізація процесу зшивання	ускладнена	легка
Гнучкість технологічного процесу	низька	висока
Швидкість зшивання	низька	низька
Особливості реалізації	енерговитратний процес	можливість вторинної переробки
Застосування для ізоляції кабелів на напругу	6–550 кВ	1–10 кВ

Пероксидний метод найчастіше використовується для зшивання поліетилену. Зазначимо також, що згідно з аналізом глобального ринку кабелів зі зшитого поліетилену обсяг їхнього ринку щорічно зростатиме на рівні 5,5 % протягом 2026–2033 рр. і досягне 18,5 млрд. доларів США до 2033 р. [29, 30].

Відносно технології зшивання поліетилену прогнозується, що і в майбутньому ринковий сегмент пероксидного методу залишиться лідером, а найшвидше розширюватиме споживання кабелів зі зшитого поліетилену європейська промисловість [29, 30].

Обмеження ЗПЕ. Силові кабелі із ЗПЕ ізоляцією широко використовуються для передачі та розподілу електроенергії завдяки відмінним діелектричним, тепловим і механічним властивостям. Однак термореактивна природа ЗПЕ ізоляції призводить до недостатньої здатності її переробки після виходу кабелів із експлуатації [14, 24]. Це пов'язано з тепловим розширенням ЗПЕ матеріалу приблизно на 15 % при нагріванні від 20 до 105°C, тоді як матеріал жили кабелю (мідь або алюміній) у цьому ж діапазоні температури розширюється менше ніж на 3 % [24]. У такому разі результуючий тиск може вплинути на діелектричні властивості, спричинити пошкодження оболонки та з'єднань [24]. ЗПЕ може відновити частину своєї жорсткості від температурних коливань вище 90°C після охолодження, що визначається вмістом гелю в матеріалі, але все ж таки слід враховувати обмеження щодо діапазону температури, в якому може надійно працювати система ЗПЕ. Зокрема короточасне нагрівання кабелів до 120°C вважається припустимим, проте оператори електричних мереж повинні встановлювати робочі обмеження для забезпечення довгострокової цілісності своїх кабельних систем.

Крім того, побічні продукти зшивання можуть призводити до негативного впливу ЗПЕ кабелю на екосистему, зокрема до забруднення ґрунту і повітря, оскільки більшість промислових відходів ховається на звалищах або видаляється шляхом спалювання.

Переробка зшитого поліетилену як реактивного пластику з обмеженою текучістю і низькою здатністю до формування є надзвичайно важливою і проблематичною. Останні досягнення і виклики у сфері переробки ЗПЕ обговорюються, наприклад, в роботах [31, 32]. Для переробки ЗПЕ досліджуються методи введення вітримерів (vitrimers), γ -випромінювання, ультразвукового розшивання (decross-linking), використання термопластичних вулканізаторів (TPV) тощо [32].

Відмічені фактори викликають потребу в нових технологіях, зокрема для термопластичної ізоляції, що забезпечує вторинну переробку силових високовольтних кабелів змінного та постійного струму. На сучасному етапі удосконалюються різні види термопластичної ка-

бельної ізоляції, зокрема з поліпропілену, поліетилену низької (LDPE) та високої (HDPE) щільності завдяки полімеризації, добавок, введення наночасток, композитної структури та хімічної модифікації у створенні структури і властивостей ефективних матеріалів [14, 17, 24, 33–36].

Полімерні суміші. У виробництві кабелів часто використовуються не чисті полімери, а суміші, серед яких [37, 38]:

- наповнювачі (додаються для покращення електричних або фізичних властивостей);
- пластифікатори (додаються для підвищення гнучкості, особливо за низьких температур); електричні характеристики при введенні пластифікаторів дещо знижуються, пластифікатори в значних обсягах використовуються для виготовлення електроізоляційних покриттів (кабельні пластикати), вони негорючі; їхнє введення у великій кількості знижує міцнісні характеристики і теплостійкість матеріалу;
- антиоксиданти (запобігають передчасному тепловому старінню матеріалу);
- антиозонанти (захищають від впливу озону);
- УФ-стабілізатори (унеможливають деградацію під дією ультрафіолетових променів).

У випадку з термореактивними компаундами використовують також затверджувачі (для сприяння зшиванню) і прискорювачі (для прискорення процесу зшивання).

Рівень добавок, введених у склад, може значно відрізнятись залежно від полімеру та застосування. Наприклад, для вироблення оболонок кабелів вміст полімеру може становити лише 30 %, тоді як для високовольтної та надвисоковольтної ЗПЕ ізоляції кількість полімеру може досягати 97 %.

Нанокompозитні та екологічні ізоляційні матеріали (рис. 5). З початку 2000-х рр. настала ера нанодіелектричних та екологічно чистих ізоляційних матеріалів. Завдяки використанню нанодіелектриків дослідниками обґрунтовано стійкість полімерних ізоляційних матеріалів до часткового розряду (ЧР), розвитку електричних та водних триїнгів, можливість змінення електропровідності, електричної міцності, діелектричних втрат, накопичення просторового розряду, значний прогрес досягнутий в отриманні однорідної дисперсії наночасток [5, 9, 11–14, 39–48]. Якісне покращення деяких характеристик полімерних нанокompозитів відображено в табл. 5 [11, 39]. До прикладу, підвищення стійкості ЗПЕ-ізоляції до старіння без впливу на її механічні та ізоляційні властивості для продовження терміну служби кабелів шляхом введення в ізоляцію наночасток та її модифікації розглядається в роботі [46].

Основними типами нанопоповнювачів є нанорозмірні сферичні частки, волокна, трубки та пластинки (рис. 5). Вони можуть бути синтетичними органічного походження (на основі вуглецю: графітові волокна, нанотрубки, сажа, графен; синтетичні полімери: волокна поліаміду та ін.) та неорганічного походження – оксиди: TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , MgO , Sb_2O_3 ; гідроксиди: $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$; метали: Al , Au , Ag , B , Sn , Cu , сталь; солі: CaCO_3 , BaSO_4 , CaSO_4 карбід: SiC , ін. [8]. Залежно від їхнього вмісту можливо значно змінювати електропровідність матеріалу (до 3-х разів і більше, що потрібно для екранування та напівпровідних шарів), збільшувати діелектричну проникність для певних значень частоти, зменшувати глибину ерозії полімеру, яка розвивається з часом, скорочувати швидкість розвитку електричних та водних триїнгів, підвищувати стійкість до електричного пробою за різної температури (на

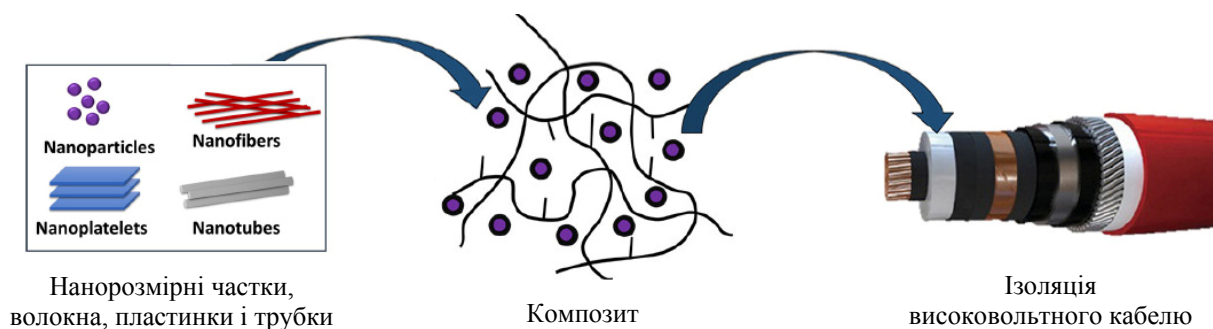


Рис. 5. Схематичне представлення створення нанокompозитної ізоляції силових кабелів

рис. 6 показано електричну міцність різних ЗПЕ нанокompозитів за температури в діапазоні 25–80°C), впливати на явища накопичення просторового заряду. Загалом завдяки використанню нанокompозитних ізоляційних полімерних матеріалів, можливо покращення їхніх електричних, теплових, механічних властивостей, а термін служби нанокompозитів може бути набагато збільшений порівняно з не-наповненими полімерами [11, 39–49].

У роботі [11] наводяться ще не вирішені проблеми і недоліки нанокompозитів, зокрема в дослідженні механізмів старіння та деградації нанодіелектриків, відсутність інформації відносно довготривалої токсичності нанокompозитів, їхнього терміну служби та вторинної переробки комбінованих наноматеріалів для ізоляції кабельно-провідникових виробів.

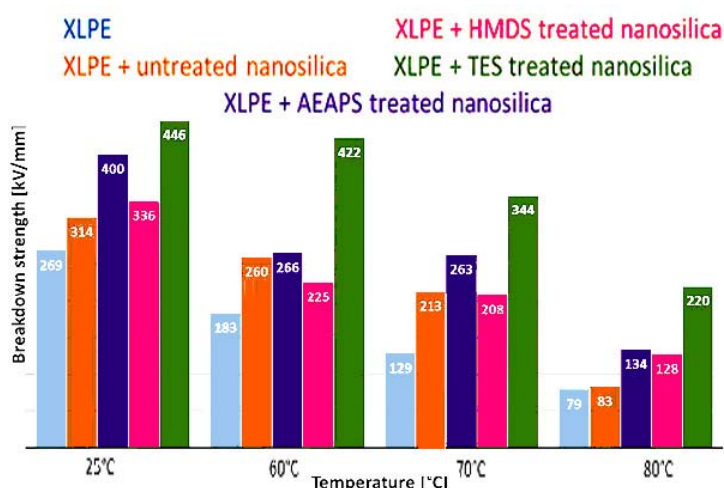


Рис. 6. Електрична міцність (кВ/мм) ЗПЕ і різних нанокompозитних ЗПЕ матеріалів при різній температурі

плення, сополімеризації, термічної обробки, використання стабілізаторів напруги та змішування еластомерів. Таким чином, поставлено нові задачі для подальших досліджень і створення екологічно чистих нанокompозитних ізоляційних матеріалів силових кабелів.

Електричне поле в нанокompозитній ізоляції. Далі проводиться комп'ютерне моделювання електричного поля в ЗПЕ ізоляції кабелю змінного струму з додаванням нанонаповнювачів на основі SiO₂ та глею (глини). Для нового класу матеріалів у роботах [48, 49] досліджено їхню структуру, електричні характеристики, діелектричну міцність, інші властивості залежно від концентрації наночастинок. За результатами [49, 50] на рис. 7 зображено такі залежності для електропровідності та діелектричної проникності, що використані у подальших розрахунках.

Електричне поле $\vec{E}$ у фрагменті ізоляційного матеріалу з мікрровключеннями (водним та повітряним) визначається з рівнянь, записаних в частотній області для комплексних величин:

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

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

Таблиця 5

Змінення властивостей полімерної ізоляції при використанні нанокompозитів

Властивість нанокompозитів	Ефект
Стійкість до ЧР	підвищення
Стійкість до тріггінгів	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
Діелектричні втрати	складність у визначенні
Термін служби	значне збільшення

Іншим перспективним напрямком розвитку ізоляційних матеріалів є створення екологічно чистої ізоляції з відмінними електричними властивостями і можливістю вторинної переробки, наприклад, нанокompозитної ізоляції на основі поліпропілену (ПП/РР), який визначається багаторівневою структурою (молекулярною, кристалічною та фазовою), має високу температуру плавлення і є термопластичним матеріалом [9]. Регулювання нанорозмірної структури і властивостей поліпропіленової ізоляції вивчено в [9] за допомогою різних методів модифікації: нанодопінгу, хімічного щеплення

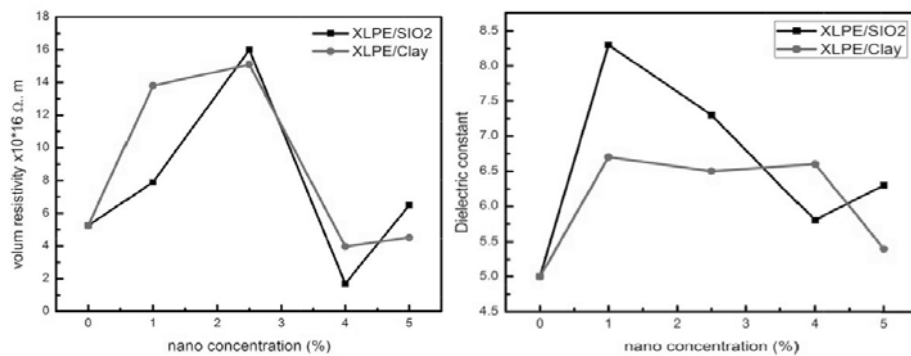


Рис. 7. Залежності електропровідності (ліворуч) та діелектричної проникності (праворуч) нанокompозитних ЗПЕ матеріалів від концентрації наночастинок

У цих виразах: $\vec{J}_{tot}$ – густина повного електричного струму (струму провідності та струму зміщення), ϕ – електричний потенціал; ε_0 і ε_r – відповідно діелектрична стала і відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу та водного/повітряного включення в ньому; σ – електропровідність відповідного середовища; $\omega = 314$ рад/с – кругова частота (встановлена частота – 50 Гц).

За допомогою граничних умов задається середнє значення напруженості електричного поля в ізоляції $E_0 = 2$ кВ/мм.

На рис. 8 зображено розподіл поля $|\vec{E}|$ поблизу сторонніх включень у звичайному ЗПЕ та нанокompозитних матеріалах: ЗПЕ/глей(1%), ЗПЕ/SiO₂(1%). Для нанодіелектриків показано зменшення поля в безпосередній близькості до повітряних і водних пустот і невелике збільшення всередині них. Зменшення поля поблизу включень сприяє меншому руйнуванню основної ізоляції і дещо більшою мірою перешкоджає розширенню включень-пустот.

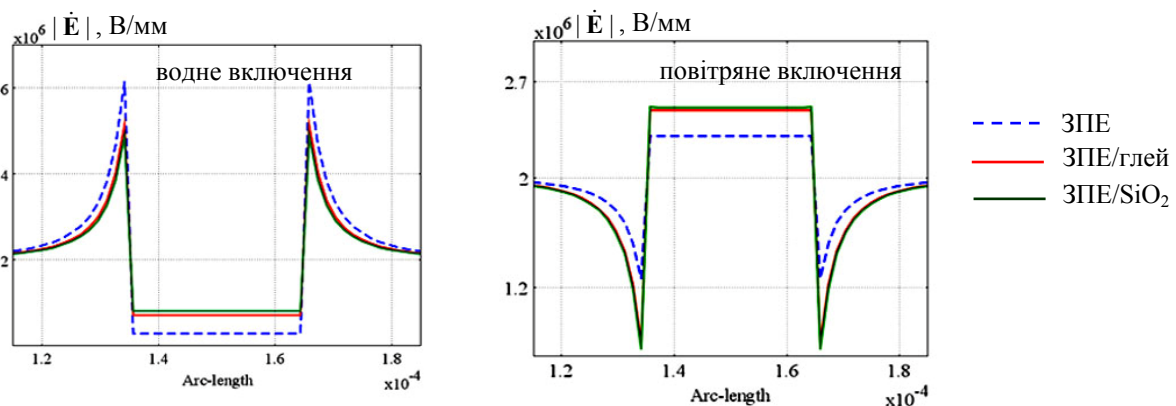


Рис. 8. Розподіл електричного поля поблизу водного (ліворуч) та повітряного (праворуч) включень у звичайному ЗПЕ та нанокompозитних матеріалах – ЗПЕ/глей(1%), ЗПЕ/SiO₂(1%)

Таким чином, залежно від типу і в загальному випадку від концентрації наночастинок, які додаються до ізоляційного матеріалу, змінюються його діелектрична проникність, електропровідність і розподіл електричного поля в ізоляції, особливо поблизу сторонніх мікророзмірних включень. Дизайн ефективних нанокompозитних ізоляційних матеріалів силових кабелів можливо здійснювати на основі контролю їхніх електричних властивостей і розподілу електричного поля поблизу дефектів.

Висновки. 1. На міжнародному ринку ізоляційних матеріалів домінують термореактивні матеріали, зокрема зшитий поліетилен. Очікується, що, незважаючи на проблеми із вторинною переробкою, попит на них буде зростати принаймні до 2033 р.

2. Сучасна удосконалена зшито-поліетиленова ізоляція має цінну властивість триїнго-стійкості, а також можливість покращення електричних, теплових та інших характеристик завдяки введенню нанокompозитних структур.

3. У виробництві для зшивання поліетилену найчастіше використовується пероксидний метод, який визнано надійним для кабелів середньої, високої та надвисокої напруги (до 550 кВ) і єдиним прийнятним для високо- і надвисоковольтних кабелів. Сегмент пероксидного методу є і за прогнозами залишатиметься лідером на світовому ринку силових кабелів до 2033 р.

4. Розробники ізоляційних матеріалів працюють у напрямку покращення пожежної безпеки, високотемпературної стійкості та екологічної сумісності силових кабелів, а також утилізації та довгострокової безпечної експлуатації матеріалів.

5. Майбутні тенденції в розвитку матеріалів ізоляції силових кабелів і проводів пов'язані з можливістю переробки, екологічністю, застосуванням нанотехнологій. Сучасні наукові дослідження та перші експериментальні зразки показали, що додавання наночасток надає можливості покращити основні властивості полімерів.

6. У перспективі реалізацію високоефективних ізоляційних матеріалів передбачається проводити за стратегією створення ефективного мульти-нанокомпозиту та модифікації їхньої структури. Особливу увагу для здійснення проєктів високовольтних силових кабелів змінного та постійного струму планується приділяти також термопластичним ізоляційним матеріалам (ПВХ, поліпропілену, ін.), що забезпечують вторинну переробку.

Роботу виконано за науково-дослідною темою "Елрес", номер держ. реєстрації 0123U100693, КПКВК 6541030.

1. <https://www.alliedmarketresearch.com/insulation-materials-market>
2. <https://www.reanin.com/reports/global-insulated-wire-and-cable-market>
3. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-insulated-wire-and-cable-market/113305/>
4. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/electrical-insulation-material-market>
5. Nelson J.K. (editor) Dielectric polymer nanocomposites. Springer: New York Dordrecht Heidelberg London, 2010, 368 p. ISBN 978-1-4419-1590-0 e-ISBN 978-1-4419-1591-7 – DOI 10.1007/978-1-4419-1591-7
6. Mead J.L., Tao Z., Liu H.S. Insulation materials for wire and cable applications. *Rubber Chemistry and Technology*. 2002. Vol. 75. No. 4. Pp. 701–712. – <https://doi.org/10.5254/1.3544996>
7. Hirschler M.M. (editor) Electrical insulating materials: international issues (Astm Special Technical Publication) Astm Symposium on Electrical Insulating Materials, 2000, Publisher: ASTM International, 211 p. https://books.google.com.ua/books/about/Electrical_Insulating_Materials.html?id=gDGpjwEACAAJ&redir_esc=y
8. 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: 10.1109/MEI.2013.6585854
9. Li J., Yang K., Wu K., Ji Z. Eco-friendly polypropylene power cable insulation: present status and perspective. *IET Nanodielectrics*. 2023. Vol. 6. Is. 3. Pp. 130–146. DOI: <https://doi.org/10.1049/nde2.12048> – <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/nde2.12048>
10. Lesaint C., Risingard 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.
11. 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>
12. Guo X., Xing Z., Zhao S., Cui Y., Li G., Wei Y., Lei Q., Hao C. Investigation of the space charge and dc breakdown behavior of XLPE/ α -Al₂O₃ nanocomposites. *Materials*, 2020, No 6, Pp. 1333. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13061333>
13. Yu G., Cheng Y., Zhang X. The dielectric properties improvement of cable insulation layer by different morphology nanoparticles doping into LDPE. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 3. Article ID 204. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9030204>
14. Andritsch T., Vaughan A., Stevens G.C. Novel insulation materials for high voltage cable systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, July 2017. Vol. 33. No. 4. Pp. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2017.7956630>
15. Hill D. Types of wire and cable insulation, April 16, 2021. <https://precmfgco.com/blog/wire-cable-insulation-types/>
16. Introduction to wire and cable insulating material. NNC, 20 p. <https://nassaunationalcable.com/pages/introduction-to-wire-and-cable-insulating-material>
17. Huang X., Zhang J., Jiang, P. Material progress toward recyclable insulation of power cables. Part 2: Polypropylene-based thermoplastic materials. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020. Vol. 36. Pp. 8–18. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2020.8932973>
18. Larina E.T. Power cables and high-voltage cable lines. Moskva: Energoatomizdat, 1996, 464 p. (Rus)

19. Karpushenko V.P., Shchebenyuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. Low- and medium-voltage power cables. Design, technology, quality. Kharkiv: Region-inform, 2000, 376 p. (Rus)
20. 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)
21. Makarov E.F. Handbook on the 4–35 kV and 110–1150 kV power networks / Ed. by I.T. Goryunov. A.A. Lyubimov. Moskva: Papirus-Pro. 2004. Vol. 3. 688 p. (Rus)
22. Ljumba N. High voltage cable insulation systems. *Energize*, May 2008, p. 27–30 – https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1467725/mod_resource/content/1/High%20voltage%20cable%20insulation%20systems.pdf
23. Hernandez J.C., Ramirez D., Riley C. Power cable system design evolution in the United States from 1996 to 2020. *11th International Conference on Insulated Power Cables*, Jicable'23, Lyon 18–22 June, 2023. Paper A8-4. 7 p. <https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/Jicable23-A8-4.pdf>
24. Mo S., Zhang J., Liang D., Chen H. Study on pyrolysis characteristics of cross-linked polyethylene material cable. *Procedia Engineering*, 2013. Vol. 52, Pp. 588–592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.190>
25. Mendelson A., Aarts M.U. World experience in the use of insulation made of tree-resistant cross-linked polyethylene. *Kabeli i provoda*. 2005. No. 5 (294). Pp. 23–29. (Rus)
26. Morshedjian J., Hosseinpour P.M. Polyethylene cross-linking by two-step silane method: a review. *Iranian Polymer Journal*. 2009. Vol. 18. No. 2. Pp. 103–128
27. Mauri M. Alternative polyethylene crosslinking concepts for power cable insulation. Thesis for the degree of Doctor of philosophy. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2019. 94 p. ISBN 978-91-7597-841-3. https://research.chalmers.se/publication/508562/file/508562_Fulltext.pdf
28. Cross-linked polyethylene https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-linked_polyethylene
29. XLPE Cables Market. April 2025 <https://www.verifiedmarketreports.com/product/xlpe-cables-market/>
30. Cross-linked polyethylene (XLPE) market size, share, trends, growth 2032. <https://www.zionmarketresearch.com/report/cross-linked-polyethylene-xlpe-market>
31. Selvin M., Shah S., Maria H.J., Thomas S., Tuladhar R., Mohan Jacob M. Review on recycling of cross-linked polyethylene. *Industrial Engineering and Chemistry Research*. 2024. Vol. 63. No.3. Pp. 1200–1214. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02580>
32. Chandran N., Sivadas A., Anuja E.V., Baby D.K., Ramdas R. XLPE: Crosslinking techniques and recycling process. Chapter in book "Crosslinkable Polyethylene", Springer Publisher, May 2021. Pp 167–188. https://www.researchgate.net/publication/351317280_XLPE_Crosslinking_Techniques_and_Recycling_Process DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_7
33. Huang X., Zhang J., Jiang P. Thermoplastic insulation materials for power cables: history and progress. *High Volt. Eng.* 2018. Vol. 44. No. 5. Pp. 1377–1398. DOI: <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20180430001>
34. Yu S., Lee S.H., Han J.A., Ahn M.S., Park, H., Han S.W., Lee D.H. Insulative ethylene-propylene copolymer-nanostructured polypropylene for high-voltage cable insulation applications. *Polymer*. 2020. Vol. 202. Pp. 122674. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122674>
35. David E., Fréchette M. Polymer nanocomposites-major conclusions and achievements reached so far. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2013. Vol. 29, Pp. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6648751>
36. Huang X., Zhang J., Jing P., Tanaka T. Material progress toward recyclable insulation of power cables part 2: polypropylene-based thermoplastic materials. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020. Vol. 36, No. 1. Pp. 8–18. <https://doi.org/10.1109/mei.2020.8932973>
37. Mikulyonok I.O. Technological foundations of processing of polymeric materials. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020, 292 p. (Ukr)
38. Mikulyonok I.O., Sokol's'kyi O.L. Polymeric materials and products from them (production, processing, properties): terminological dictionary. Kyiv: Polytechnic, 2015, 208 p. . (Ukr)
39. Tanaka T., Imai T. Advances in nanodielectric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazin*. 2013. Vol. 29. Pp. 10–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6410535>
40. Jarvid M., Johansson, A.; Kroon, R., Bjuggren, J.M., Wutzel, H., Englund, V., Gubanski S., Andersson M.R., Müller C. A new application area for fullerenes: voltage stabilizers for power cable insulation. *Advanced Materials*. 2014. Vol. 27. Pp. 897–902. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201404306>
41. Hui L., Schadler L.S., Nelson J.K. The influence of moisture on the electrical properties of crosslinked polyethylene/silica nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20. Pp. 641–653. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6508768>
42. Yamano Y. Control of electrical tree at initiation stage in LDPE by mixed addition of Al₂O₃ nano-particle and azobenzoic compound. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 21(1). Pp. 209–216. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.003980>
43. Chi X., Gao J., Zhang X. Electrical tree propagating characteristics of polyethylene/nano-montmorillonite composites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015. Vol. 22, Is. 3. Pp. 1530–1536. .
44. Huang X., Jiang P., Tanaka T. A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2011. Vol. 27. Pp. 8–16 DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2011.5954064>

45. Wang Y., Wang C., Zhang, Z., Xiao, K. Anti-thermal aging properties of low-density polyethylene-based nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25. Pp. 1003–1013. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2018.006783>
46. 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 Sinic*. 2024. No. 7. Pp. 078801. DOI: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240201>
47. Tanaka T. Dielectric nanocomposites with insulating properties. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2005. Vol. 12. No. 5. Pp. 914–928. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2005.1522186>
48. Li S., Yin G., Chen G., Li J., Bai S., Zhong L., Zhang Y., Lei Q. Short-term breakdown and long-term failure in nanodielectrics: a review. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2010. Vol. 17. No. 5. Pp. 1523–1535. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2010.5595554>
49. Said S.A., Othman S.A., Ezz-eldin M.R., Taha H.G., El-kattan W.A. Modification of cable insulation characteristics using nanocomposites for the nuclear power plant. *Nuclear and isolation safety*. 2019. V. 3. No 83. Pp. 75–82. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.3\(83\).09](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.3(83).09)
50. Tanaka T., Bulinski A., Castellon J., Frechette M., Gubanski S., Kindersberger J., Montanari G.C., Nagao M., Morshuis P., Tanaka Y., Pelissou S., Vaughan A., Ohki Y., Reed C.W., Sutton S., Han S.J. Dielectric properties of XLPE/SiO₂ nanocomposites based on CIGRE WG D1.24 cooperative test results. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2011. Vol. 18. No. 5. Pp. 1482–1517. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2011.6032819>

UP-TO-DATE ELECTRICAL INSULATING MATERIALS FOR POWER CABLES AND ELECTRICAL WIRES

A.A. Shcherba, I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, Ukraine

e-mail: rB.irinan@gmail.com

The paper presents the review and substantive analysis on modern insulating materials for power cables and electrical wires. The state of the scientific-and-technical problem regarding the existing insulating materials, their selection according to electrical, thermal and ecological characteristics to ensure the reliable, safe and long-term operation of the cable and wire systems is described. The advantages and limitations of cross-linked polyethylene insulation are presented. Its up-to-date modification, tree-resistant cross-linked polyethylene, is described. The studies on the creation of promising nanocomposite and new environmentally friendly insulating materials are analyzed. The main direction of the studies is the improvement of the basic properties of polymers by adding the nano-sized particles and modifying the structure of the materials. Ref. 50, fig. 8, tables 5.

Keywords: thermoplastic and thermosetting insulation, cross-linked polyethylene insulation, tree-resistant (tree retardant cross-linked polyethylene) insulation, power cables, electrical wires, nano-composite insulating materials.

Надійшла: 28.07.2025

Прийнята: 18.08.2025

Submitted: 28.07.2025

Accepted: 18.08.2025