

ЗОЛОТАРЬОВ ВОЛОДИМИР МИХАЙЛОВИЧ – доктор технічних наук, професор, генеральний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3886-4993>; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

АНТОНЕЦЬ ТАРАС ЮРІЙОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, заступник головного технолога ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2388-2252>; e-mail: taras1986antonets@gmail.com

ГОНТАР ЮЛІЯ ГРИГОРІВНА – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4433-7305>; e-mail: yuliia.gontar@khpri.edu.ua

АНТОНЕЦЬ СТАНІСЛАВ ЮРІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, начальник управління зовнішньоекономічних зв'язків ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ»; м. Харків, Україна; e-mail: stanislavantonets86@gmail.com

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ЗШИВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ДЛЯ КАБЕЛІВ НА НАПРУГУ ПОНАД 6 КВ

У статті розглянуто питання вибору оптимальної технології зшивання ізоляції силових кабелів із зшитого поліетилену на напругу понад 6 кВ, що є критично важливим аспектом проєктування та експлуатації кабельних ліній середньої, високої та надвисокої напруги. Проведено детальний аналіз двох промислових методів – пероксидного та силанольного зшивання поліетилену. Показано, що хоча обидві технології формують тривимірну зшиту структуру, їхня молекулярна природа, механізми хімічних реакцій, рівномірність зшивки, енергія міжмолекулярних зв'язків і термічна стабільність принципово відрізняються. Особливу увагу приділено порівнянню структурних формул і характеристик матеріалів, зокрема енергії зв'язків, ступеня зшивки, кількості макромолекул у вузлах зшивки та впливу побічних продуктів на однорідність ізоляції. Проаналізовано міжнародний досвід використання кабелів із зшитого поліетилену, включно з вимогами європейських енергетичних компаній та результатами багаторічної експлуатації. Наведені дані показують, що силанольна зшивка не забезпечує необхідної довговічності та стійкості ізоляції при напругах понад 6–10 кВ, що підтверджується випадками масових відмов у різних країнах, зокрема й в Україні. Розкрито причини прискореного старіння силанольної ізоляції, пов'язані з проникненням вологи, нерівномірністю зшивки та виникненням водних і електричних триєнів. Особливо підкреслено важливість комплексних електричних випробувань кабелів із зшитого поліетилену, зокрема контролю часткових розрядів із чутливістю 0,5 пКл, наявності ресурсних випробувань за HD 620 та сертифікації у незалежних лабораторіях. Узагальнивши результати численних досліджень і світового досвіду, автор робить висновок про беззаперечну перевагу пероксидної технології зшивання для кабелів напругою понад 6 кВ і необхідність закріплення цієї вимоги в національних нормативних документах України.

Ключові слова: зшитий поліетилен; пероксидне зшивання; силанольна технологія; часткові розряди; ресурс кабелю; середня напруга.

Вступ. Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) на сьогоднішній день вже практично повністю замінили традиційні кабелі з паперовою ізоляцією. Причина цього – їх незаперечні переваги під час прокладання, монтажу та експлуатації. Зшитий поліетилен було винайдено у березні 1963 року в дослідницькій лабораторії компанії General Electric у місті Ніскаюна, штат Нью-Йорк [1]. Силові ЗПЕ-кабелі середнього класу напруги використовуються в енергетиці з початку 60-х років, а масове виробництво ЗПЕ-кабелів високої напруги почалося з 1971 року [2].

Для виробництва силових ЗПЕ кабелів існує дві технології зшивання ізоляції: перекисна (або пероксидна) та волога (або силанольна). **Пероксидна зшивка** – термічний розклад органічного перекису після екструзії ініціює формування зв'язків між ланцюжками розплавленого полімеру в вулканізаційній трубі. **Силанольна зшивка** – в полімерні ланцюжки вводяться хімічні сполуки на основі силану, які формують зв'язки під впливом води. Процес вулканізації здійснюється у твердій фазі після екструзії [3].

Мета статті – комплексно проаналізувати питання вибору найдоцільнішої технології зшивання поліетиленової ізоляції для кабелів напругою понад 6 кВ, з урахуванням технічних, технологічних та експлуатаційних факторів. Для цього передбачається детально розглянути принципові відмінності між

пероксидною та силанольною технологіями зшивання, оцінити їхні переваги та обмеження, а також узагальнити світовий і вітчизняний досвід експлуатації ЗПЕ-кабелів за останні 40–50 років. Особливу увагу приділено аналізу реальних умов роботи кабельних ліній, доведеним ризикам і хибним уявленням щодо застосування силанольно зшитої ізоляції, що дозволяє сформулювати обґрунтовані висновки та рекомендації щодо раціонального використання таких кабелів залежно від класу напруги.

Відмінність пероксидної та силанольної технологій зшивки. Пероксидна технологія виготовлення кабелів дорожча за силанольну: це не тільки більш складніше, дорожче та енергоємніше обладнання, але й значні виробничі площі [4]. Та крім цього, і сама пероксидна ізоляція дорожча за силанольну на 45 % [5]. Незалежно від способу зшивання в полімері утворюється тривимірна структура [4], тобто поліетилен стає зшитим. Але дуже важливо розуміти, що хімічні реакції, що відбуваються в ізоляції під час зшивки, і сама зшита ізоляція на молекулярному рівні мають принципові відмінності для пероксидної і силанольної технологій [4, 6]. Розглянемо відмінності у структурних формулах між пероксидно (а) і силанольно (б) зшитими поліетиленами (рис. 1), порівняльні характеристики яких наведено в табл. 1 [7].

© В. М. Золотарьов, Т. Ю. Антонєць, Ю. Г. Гонтар, С. Ю. Антонєць, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

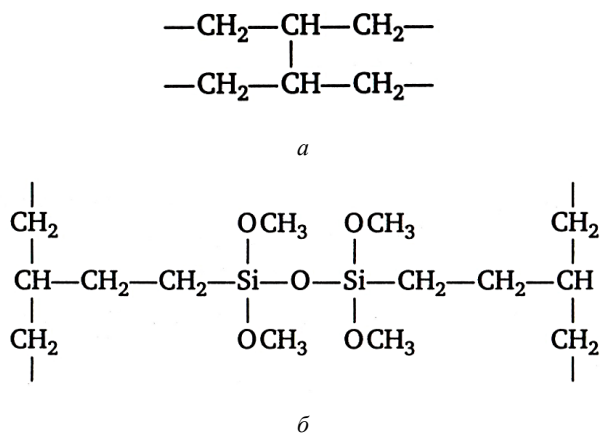


Рисунок 1 – Структурні формули пероксидно (а) і силанольно (б) зшитого поліетиленів

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики технологій зшивки

Параметр	Пероксидна зшивка	Силанольна зшивка
Поперечні зв'язки між лінійними молекулами поліетилену	C-C	Si-O-Si
Кількість міжмолекулярних зв'язків на 1000 атомів вуглецю	2-3	≈2
Ступінь зшивки, %	< 90	< 80
Температура початку розм'якшення	85	92
Енергія поперечних зв'язків, Дж/моль	630	780
Кількість макромолекул у вузлі зшивки	2	до 6

Ці відмінності не є суто технологічними – вони формують інший тип просторової сітки, густину зшивки та природу побічних продуктів, що залишаються в матеріалі після завершення реакції. У пероксидно зшитому поліетилені поперечні зв'язки утворюються переважно між вуглецевими ланцюгами (C-C), що забезпечує формування стабільної й рівномірної структури. Силанольне зшивання приводить до утворення силосанових зв'язків (Si-O-Si), які формують іншу архітектуру полімерної сітки.

Процеси старіння ізоляції безпосередньо залежать від цих структурних особливостей. Одним із основних механізмів деградації є утворення електричних тріпінгів у зонах локальної неоднорідності електричного поля. У пероксидній ізоляції таких зон значно менше, тоді як у силанольній присутність мікрочлених сприяє локальному зростанню напруженості поля. За наявності вологи це призводить до формування водних тріпінгів, які є типовою причиною прискореного старіння силанольно зшитої ізоляції кабелів напругою 6–35 кВ.

Термічна стабільність також суттєво відрізняється для двох типів ізоляції. Пероксидне зшивання забезпечує формування більш стабільної тривимірної сітки, у якій термоокиснювальні процеси розвиваються повільніше. У силанольній ізоляції залишкова кількість низькомолекулярних побічних продуктів може

каталізувати термічну деградацію, спричиняючи зменшення ступеня зшивки та утворення нових мікродфектів. У результаті ресурс силанольної ізоляції зазвичай становить 10–15 років, тоді як для пероксидної типовими є значення 40–60 років.

Важливою ознакою початку деградаційних процесів є рівень часткових розрядів (ЧР). Для пероксидної ізоляції характерні низькі початкові значення ЧР – на рівні одиниць пікокулонів (пКл), що свідчить про відсутність значних внутрішніх дефектів. У силанольних кабелях наявність неоднорідностей та залишкових домішок призводить до підвищених рівнів ЧР уже на початковому етапі, а в процесі експлуатації спостерігається їх прискорене зростання. Це формує канали деградації, які згодом стають ініціаторами пробою.

Таким чином, різні властивості силанольно та пероксидно зшитого поліетиленів і, як наслідок, застосування їх для різного класу напруг у світовій практиці [8–10], обумовлені саме різною молекулярною структурою. Тобто, це різні матеріали.

Слід також відзначити, що фірма Vorealis, котра виготовляє матеріали для виробництва силових кабелів, називає поліетилен, що зшивається пероксидним способом у середовищі газу, класичною системою зшитого поліетилену, і в усіх каталогах фірми йде чітке розділення цих матеріалів: силанольного («Silane») і пероксидного («Classic») [11].

Розглянемо більш детально відмінності у технологіях зшивки:

1. Склад матеріалу.

- Пероксидна ізоляція – це однокомпонентний матеріал. Тому екструзійний процес не потребує дозування і змішування компонентів.

- Силанольна ізоляція – двокомпонентний матеріал, що потребує точного дозування і ретельного змішування основи з каталізатором. Найменше відхилення від технології призводить до неякісної зшивки.

2. Температура пресування.

- Пероксидна ізоляція – температура пресування 120 °С, тобто це низькотемпературна екструзія.

- Силанольна ізоляція – температура пресування 190 °С, це високотемпературна екструзія, що зумовлює більш активне утворення продуктів окислення і розпаду поліетилену, які вносять мікрозабруднення до ізоляції.

3. Процес зшивки.

- Пероксидна ізоляція – зшивка відбувається в автоматичному режимі під час процесу пресування ізоляції.

- Силанольна ізоляція – зшивку необхідно здійснювати після накладання ізоляції. Це довготривалий процес, що потребує чіткого дотримання технологічних параметрів: час і температура. Відхилення від технології призводить до неякісної зшивки.

4. Побічні продукти.

• Пероксидна ізоляція – побічні продукти зшивки видаляються з об'єму ізоляції за допомогою дифузії на технологічній операції дегазації.

• Силанольна ізоляція – побічні продукти зшивки залишаються в ізоляції, тому молекулярна структура ізоляції є різко неоднорідною.

Отже, вибір технології зшивання безпосередньо визначає довговічність і надійність кабельної ізоляції. Пероксидна технологія забезпечує мінімальний рівень внутрішніх дефектів, однорідну структуру та високу стійкість до всіх видів старіння. Силанольна технологія, навпаки, обумовлює підвищені ризики деградації через внутрішню неоднорідність матеріалу та вологісну чутливість. Це є ключовим аргументом на користь обмеження використання силанольно зшитих кабелів у мережах напругою понад 6 кВ та впровадження чітких нормативних вимог щодо застосування пероксидної ізоляції для середньої та високої напруги.

Світовий досвід застосування технологій зшивання ізоляції. Компанія Nexans Group постачає кабельну продукцію по всьому світу: це такі великі енергетичні компанії як E.ON та RWE (Німеччина), EDF (Франція), ENEL (Італія). Кожна з перелічених компаній категорично забороняє до використання в своїх мережах середньої напруги кабелів з ізоляцією із силанового зшивання, не дивлячись на відсутність подібної вимоги безпосередньо в профільному стандарті IEC 60502 (ідентичний йому ДСТУ IEC 60502 [12]), а також CENELEC HD 620 [13].

Європейський ринок є дуже конкурентним ринком відносно силових кабелів. Великі енергетичні компанії, встановлюють власні технічні вимоги, в котрих чітко зазначено, що ізоляція кабелів повинна зшиватися тільки в атмосфері нейтрального газу [14]. Так, у технічних умовах «Technische Spezifikation für VPE-isolierte Mittelspannungskabel. NEAG-Technische Richtlinien. VPE-isolierte Mittelspannungskabel» [15] німецької компанії E.ON Energie AG прописано, що використовувати в своїх мережах можна кабелі, виготовлені тільки за технологією пероксидного зшивання.

Крім цього, досвід зарубіжних кабельних заводів і рекомендації фахівців однозначно говорять про те, що метод пероксидного зшивання використовується для виробництва кабелів середньої, високої і надвисокої напруги, а метод силанольного зшивання придатний тільки для виробництва кабелів низької напруги (до 1 кВ включно) [10]. А такі великі світові виробники як Nexans, ABB, Telefonika та інші відмовилися від силанового зшивання, і використовують його тільки для кабелів класу напруги 3 кВ [9], до котрих не висуваються високі вимоги до їх ресурсу (шахти, тимчасові мережі живлення тощо).

Однією з причин відмови від силанового зшивання при виготовленні кабелю напругою 6–35 кВ у кінці 70-х – початку 80-х років у Європі і Північній Америці стали проблеми нерівномірного розподілу зшивання упродовж ізоляції кабелю, що з'являється в процесі експлуатації. Друга причина – короткий термін служби таких кабелів, що становить не більше

10–15 років, що неодноразово підтверджувалось зарубіжними колегами [14].

У роботі [10] відмічено, що використання силанового зшивання для силових кабелів середньої напруги не може гарантувати їх тривалій експлуатації внаслідок того, зшивання проходить у вологому середовищі, і це створює умови для проникнення молекул води в ізоляцію і появи водних і електричних трингів. Саме вони є основною причиною прискореного старіння ізоляції.

Досвід використання силанольних кабелів в Україні. В Україні теж є негативний досвід застосування кабелів з силанольною ізоляцією в мережах середньої напруги, зокрема, на каскаді Ташликської ГАЕС, Одеському цементному заводі і смт Коцюбинське Київської області [10]. Також мали місце масові пробої силанової ізоляції на СЕС у Миколаївській області (рис. 2).

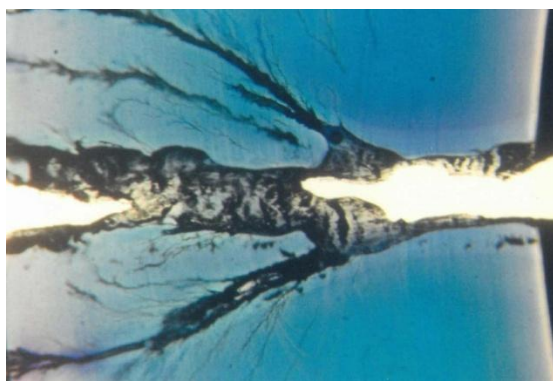


Рисунок 2 – Електричний пробій ізоляції кабелю

Вивчення місць пробів дозволило з'ясувати, що у процесі експлуатації кабелю в ізоляції зростали електричні тринги, які стали причиною пробію. Крім цього, було виявлено велику кількість водних трингів на початковій стадії розвитку (рис. 3). Результати дослідження свідчать про прискорення старіння силанольно зшитої ізоляції в кабелях середньої напруги.



Рисунок 3 – Водний тринг в ізоляції

Українська нормативна документація. У вітчизняних нормативних документах енергетичних компаній теж прописані вимоги щодо технологій зшивання. Так, у технічній політиці НЕК «Укренерго» [16] у пункті 7.2.13 написано: «У разі нового

будівництва, реконструкції та технічного переоснащення КЛ забороняється використовувати:

- кабелі напругою понад 1 кВ з ізоляцією із зшитого поліетилену, яку виготовлено методом силанового зшивання».

В чинних Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ) [17] іде посилання на стандарт СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 «Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова» [18] щодо вибору кабелів за струмовими навантаженнями та струмами перевантаження. Саме цей нормативний документ передбачає вибір технології зшивання поліетиленової ізоляції силових кабелів: «За напруги понад 6–10 кВ рекомендовано використовувати кабелі з ізоляцією із ЗПЕ, виготовленого за технологією пероксидного зшивання».

Випробування ЗПЕ-кабелів – як невід’ємна частина технології виробництва. Силкові ЗПЕ-кабелі – це наукомістка продукція, виробничий цикл якої обов’язково має включати **правильну технологію випробувань**. Виробник повинен мати відповідне акредитоване обладнання, щоб гарантія якості була підтверджена реальними вимірами.

На рис. 4 зображено випробувальне обладнання: установка модульного типу, що дозволяє випробувати ЗПЕ-кабелі на номінальну напругу до 330 кВ. Це високотехнологічний комплекс, котрий має складну систему екранування і заземлення, що дозволяє досягти рівня власних шумів 0.5 пКл. Саме така чутливість установки дає можливість фіксувати регламентовані рівні часткових розрядів в ізоляції. Система вимірювання повністю автоматична і керується комп’ютером.



Рисунок 4 – Модульна резонансна система на напругу до 330 кВ для випробування високовольтних ЗПЕ-кабелів

Окрім технології зшивки та випробувального комплексу, виробник повинен мати протоколи ресурсних дворічних випробувань (згідно з HD 620 S2, частина 10 [19]) та типових електричних та неелектричних випробувань (ДСТУ ІЕС 60502-2 [12]), котрі проводяться у незалежних європейських лабораторіях і підтверджують якість і ресурс кабелів.

Висновки. Аналіз сучасних досліджень та практичного досвіду експлуатації кабельних ліній середньої та високої напруги свідчить про чітку

еволюцію підходів до вибору технології зшивання поліетиленової ізоляції. Ще декілька років тому було дуже багато суперечок щодо того, яка технологія зшивки краща: пероксидна чи силанольна, але на сьогоднішній день вже проведено величезну кількість досліджень у цій галузі (як вітчизняними, так і зарубіжними лабораторіями). І всі ці дослідження показали безперечну перевагу пероксидної зшивки. Ізоляція, зшита за такою технологією, найнадійніша! Цей факт підтверджується великим досвідом застосування ЗПЕ-кабелів (понад 50 років). Технологія пероксидної зшивки передбачає мінімальний вплив людського фактору при виробництві, тому забезпечує більш стабільну та високу якість ізоляції. Щодо силанольного способу зшивання – це порівняно дешева і проста технологія, котра, безперечно, є ефективною і вигіднішою для виробництва кабелів низької напруги (до 1 кВ). Правильний вибір типу кабелю – це запорука надійної та довговічної роботи кабельної мережі.

Результати багаторічного моніторингу відмов у кабельних мережах різних країн підтверджують прямий зв’язок між технологією зшивання та характером дефектів, що виникають у процесі експлуатації. Для силанольно зшитої ізоляції типовими є дефекти, спричинені водними триінгами, підвищеним рівнем часткових розрядів та локальними зонами перезволоження, тоді як для пероксидної ізоляції такі прояви практично не характерні.

Важливим критерієм на користь пероксидної технології є її сумісність з сучасними методами діагностики стану кабельних ліній. Низькі рівні власних часткових розрядів та однорідна структура ізоляції дозволяють більш точно застосовувати методи моніторингу, зокрема вимірювання тангенса кута діелектричних втрат, часткових розрядів, а також випробування підвищеною напругою змінного струму з використанням резонансних установок.

Пероксидна технологія є єдиною, яка дозволяє забезпечити стабільність показників ізоляції на всій довжині виробленої кабельної продукції. У силанольній ізоляції рівномірність зшивки значною мірою залежить від дотримання великої кількості технологічних параметрів, що підвищує ймовірність виникнення локальних ділянок зі зниженим ступенем зшивки та подальшою деградацією в цих зонах.

Доцільним є подальший розвиток національної нормативної бази в частині деталізації вимог до технології зшивання, методів контролю якості та обов’язкових параметрів приймально-здавальних і типових випробувань, що забезпечить підвищення надійності кабельних мереж та зменшення ризиків передчасних відмов.

Слід зауважити, що невід’ємними складовими, котрі гарантують якість та надійність кабелів, є наявність у заводів-виробників випробувального обладнання, що дозволяє проводити вимірювання рівня часткових розрядів з чутливістю 0.5 пКл, та ресурсних випробувань згідно з HD 620 S2, частина 10 [19]. Виробник гарантує якість продукції переліком приймально-здавальних випробувань, що регламентуються нормативними документами (ДСТУ

IEC 60502-2:2023 [12], ДСТУ ІЕС 60840:2021 [20]), а також підтверджує термін служби кабелів довготривалими випробуваннями (згідно з HD 620 S2, частина 10) [19].

Вкрай важливо внести до національної нормативної документації: профільних Стандартів організацій України (СОУ), ПУЕ, державних будівельних норм (ДБН), а також до документів, що стосуються безпечної експлуатації (Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС), Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС), Правила безпечної експлуатації електроустановок (ПБЕЕ)), та інших керівних документів облэнерго, Укренерго, Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), вимоги щодо заборони використання силанольних кабелів для напруги понад 3 кВ.

Список літератури

1. Precopio F. The invention of chemically crosslinked polyethylene. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 1999. Vol. 15, no. 1. P. 23–25. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.744587>.
2. Nexans. Medium voltage underground power cables 6–36 kV. Milton Keynes, Buckinghamshire, United Kingdom: Nexans Energy Networks, 2009. 45 p. URL: <https://content.voltimum.com/ie/3115/201005175087201004093766.pdf>.
3. Long-life XLPE insulated power cable / N. Hampton et al. *7th International Conference on Insulated Power Cables: Proceedings*, Paris-Versailles, France, 24–28 June 2007. URL: <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/fb791a4d-a217-43bf-8f1a-c7d9874ad539/content>.
4. Tripathi P. K. Manufacture of electrical cables, wire and wire products handbook. New Delhi: NIIR Project Consultancy Services, 2023. 512 p.
5. Angreen Advanced Material Technology Co., Ltd. How do you choose the cross-linking method for cable materials?. *Angreen Advanced Material Technology Co., Ltd.* URL: <https://www.angreen.com/news/comparison-of-cable-material-cross-linking-methods-a-selection-guide-based-on-cable-requirements.html>.
6. Global cable industry: materials, markets, products / ed. by G. Beyer. Weinheim, Germany: Wiley & Sons, Limited, John, 2021. 432 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527822263>.
7. Gao J.-G., Liu L.-W., Sun W.-F. Dielectric characteristics of crosslinked polyethylene modified by grafting polar-group molecules. *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 1. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15010231>.
8. Ahmad H., Rodrigue D. Crosslinked polyethylene: A review on the crosslinking techniques, manufacturing methods, applications, and recycling. *Polymer Engineering & Science*. 2022. Vol. 62, no. 8. P. 2376–2401. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.26049>.
9. Гринишина М. В. Особливості технології виготовлення силових високовольтних кабелів з термопластичною полімерною ізоляцією. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2021. № 2 (3). С. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.18>.
10. Luo Y., Luo J., Li B. Performance of cross-linked polyethylene insulated cable based on detection of high voltage electric field. *The International Journal of Multiphysics*. 2019. Vol. 13, no. 2. P. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.21152/1750-9548.13.2.147>.
11. Borealis and Borouge showcase sustainable Wire & Cable innovations at the WIRE 2022 - Borealis. *Borealis Group (en-GB)*. URL: <https://www.borealisgroup.com/news/borealis-and-borouge-showcase-sustainable-wire-cable-innovations-at-the-wire-2022>.
12. ДСТУ ІЕС 60502-2:2023. Кабелі силові з екструдованою ізоляцією й арматура до них на номінальну напругу від 1 кВ ($U_m = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ). Частина 2. Кабелі на номінальну напругу від 6 кВ ($U_m = 7,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ) (ІЕС 60502-

2:2014, ІДТ). На заміну ДСТУ ІЕС 60502-2:2009; чинний від 2024-06-01. Вид. офіц. 2023.

13. DIN VDE 0276-620:1996-12. Power cables. Distribution cables of nominal voltages 3,6 kV to 20,8/36 kV. Replaces DIN VDE 0273 VDE 0273:1987-12. Official edition. 1996.
14. Performance evaluation of cross-linked polyethylene insulation of operating 110 kV power cables / M. Ding et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 11. 2282. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14112282>.
15. Thüga AG. Spezifikation für VPE-isolierte Mittelspannungskabel. München: Thüga AG, 2023. 10 p. URL: https://www.dtv.de/Satellite/public/company/project/CXP4YCNH_WXS/de/documents/serviceDescription/Anlage_2_Spezifikation_M_S_Kabel_07_2023.pdf.
16. СОУ НЕК 20.261:2025. Стандарт підприємства. Технічна політика НЕК Укренерго у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж. На заміну СОУ НЕК 20.261:2023; чинний від 2025-04-22. Вид. офіц. Київ: Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (ДП «НЕК «Укренерго»), 2025.
17. Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
18. СОУ Н МЕВ 40.1 37471933 49:2011. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова (у редакції наказу від 26.01.2017 № 82). На заміну СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011; чинний від 2017-02-26. Вид. офіц. Київ, 2017. 168 с.
19. HD 620 S2:2010. Distribution cables with extruded insulation for rated voltages from 3,6/6 (7,2) kV up to and including 20,8/36 (42) kV. Effective from 2010-01-15. Official edition. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), 2010.
20. ДСТУ ІЕС 60840:2021. Кабелі силові з екструдованою ізоляцією та арматура до них на номінальну напругу понад 30 кВ ($U_m = 36$ кВ) і до 150 кВ ($U_m = 170$ кВ) включно. Вимоги та методи випробування (ІЕС 60840:2020; COR1:2021, ІДТ). На заміну ДСТУ ІЕС 60840:2009; чинний від 2022-06-01. Вид. офіц. 2022.

References

1. F. Precopio, “The invention of chemically crosslinked polyethylene,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 15, no. 1, pp. 23–25, Jan. 1999, doi: <https://doi.org/10.1109/57.744587>
2. Nexans, “Medium voltage underground power cables 6–36 kV,” Nexans Energy Networks, Milton Keynes, Buckinghamshire, United Kingdom, PHLB1009, Mar. 2009. [Online]. Available: <https://content.voltimum.com/ie/3115/201005175087201004093766.pdf>
3. N. Hampton, R. Hartlein, H. Lennartsson, H. Orton, and R. Ramachandran, “Long-life XLPE insulated power cable,” in *7th International Conference on Insulated Power Cables*, Paris-Versailles, France, Jun. 24–28, 2007. [Online]. Available: <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/fb791a4d-a217-43bf-8f1a-c7d9874ad539/content>
4. P. K. Tripathi, *Manufacture of Electrical Cables, Wire and Wire Products Handbook*. New Delhi: NIIR Proj. Consult. Serv., 2023.
5. Angreen Advanced Material Technology Co., Ltd. “How do you choose the cross-linking method for cable materials?” Angreen Advanced Material Technology Co., Ltd. [Online]. Available: <https://www.angreen.com/news/comparison-of-cable-material-cross-linking-methods-a-selection-guide-based-on-cable-requirements.html>
6. G. Beyer, Ed., *Global Cable Industry: Materials, Markets, Products*. Weinheim, Germany: Wiley & Sons, Ltd., John, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/9783527822263>
7. J.-G. Gao, L.-W. Liu, and W.-F. Sun, “Dielectric characteristics of crosslinked polyethylene modified by grafting polar-group molecules,” *Polymers*, vol. 15, no. 1, Jan. 2023, Art. no. 231, doi: <https://doi.org/10.3390/polym15010231>
8. H. Ahmad and D. Rodrigue, “Crosslinked polyethylene: A review on the crosslinking techniques, manufacturing methods, applications, and recycling,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 62, no. 8, pp. 2376–2401, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.26049>
9. M. V. Grynyshyna, “Features of technology of manufacture of power high voltage cables with thermoplastic polymeric insulation,” *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (3), pp. 59–65, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.18> (in Ukrainian)

10. Y. Luo, J. Luo, and B. Li, "Performance of cross-linked polyethylene insulated cable based on detection of high voltage electric field," *The International Journal of Multiphysics*, vol. 13, no. 2, pp. 147–156, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.21152/1750-9548.13.2.147>
11. "Borealis and borouge showcase sustainable wire & cable innovations at the WIRE 2022 - borealis." Borealisgroup (en-GB). [Online]. Available: <https://www.borealisgroup.com/news/borealis-and-borouge-showcase-sustainable-wire-cable-innovations-at-the-wire-2022>
12. *Power Cables With Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages From 1 kV (Um = 1,2 kV) Up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for Rated Voltages From 6 kV (Um = 7,2 kV) Up to 30 kV (Um = 36 kV) (IEC 60502- 2:2014IDT)*, DSTU IEC 60502-2:2023, Technical Standardization Committee No. 131 "Electrical Insulation and Cable Equipment", PJSC "ZAVOD YUZHKADEL", 2023. (in Ukrainian)
13. *Power Cables. Distribution Cables of Nominal Voltages 3,6 kV to 20,8/36 kV*, DIN VDE 0276-620:1996-12, 1996.
14. M. Ding, W. He, J. Wang, and J. Wang, "Performance evaluation of cross-linked polyethylene insulation of operating 110 kV power cables," *Polymers*, vol. 14, no. 11, Jun. 2022, Art. no. 2282, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14112282>
15. Thüga AG, "Spezifikation für VPE-isolierte Mittelspannungskabel," Thüga AG, München, Jul. 2023. [Online]. Available: https://www.dtyp.de/Satellite/public/company/project/CXP4YCNH/WXS/de/documents/serviceDescription/Anlage_2_Spezifikation_M_S_Kabel_07_2023.pdf
16. *Standart pidpriemstva. Tekhnichna polityka NEK Ukrenerho u sferi rozvytku ta ekspluatatsii mahistralnykh ta mizhderzhavnykh elektrychnykh merezh [Enterprise standard. Technical policy of NPC Ukrenergo in the field of development and operation of trunk and interstate electricity networks]*, SOU NEK 20. 261:2025, National Energy Company Ukrenergo, Kyiv, 2025. (in Ukrainian)
17. *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]*. Kyiv: Minist. Energy Coal Ind. Ukr., 2017. (in Ukrainian)
18. *Proektuvannia kabelnykh liniy napruhoiu do 330 kv. nastanova (u redaktsii nakazu vid 26.01.2017 № 82) [Design of cable lines with a voltage of up to 330 kV (as amended by Order No. 82 dated 26 January 2017)]*, SOU N MEV 40.1 37471933 49:2011, Scientific and Design Centre for the Development of the United Energy System of Ukraine NEC Ukrenergo (SDCD UES of Ukraine), Kyiv, 2017. (in Ukrainian)
19. *Distribution Cables With Extruded Insulation for Rated Voltages From 3,6/6 (7,2) kV Up to and Including 20,8/36 (42) kV*, HD 620 S2:2010, CLC/TC 20 - Electric cables, 2010.
20. *Power Cables With Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages Above 30 kV (Um = 36 kV) Up to 150 kV (Um = 170 kV) — Test Methods and Requirements*, DSTU IEC 60840:2021, Technical Standardization Committee No. 131 "Electrical Insulation and Cable Equipment," 2022. (in Ukrainian)

Hadziuua (received) 19.12.2025

UDC 621.315.2

ZOLOTAROV VOLODYMYR – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, General Director of the PJSC "ZAVOD YUZHKADEL"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3886-4993>; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

ANTONETS TARAS ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Deputy Chief Technologist of the PJSC "ZAVOD YUZHKADEL"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2388-2252>; e-mail: taras1986antonets@gmail.com

GONTAR YULIYA – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Insulation and Cable Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4433-7305>; e-mail: yuliia.gontar@khpi.edu.ua

ANTONETS STANISLAV – Candidate of Technical Sciences (PhD), Head of Foreign Economic Relations Department of the PJSC "ZAVOD YUZHKADEL"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: stanislavantonets86@gmail.com

SELECTION OF INSULATION CROSSLINKING TECHNOLOGY FOR CABLES RATED ABOVE 6 kV

This article examines the problem of selecting the optimal insulation crosslinking technology for medium-, high-, and extra-high-voltage Cross-Linked Polyethylene power cables operating above 6 kV. Two industrial methods of polyethylene crosslinking—peroxide and silane—are analyzed in detail. Although both approaches produce a three-dimensional polymer network, their chemical nature, reaction mechanisms, homogeneity of crosslinking, bond energy, and long-term stability differ fundamentally. The study emphasizes the comparison of structural formulas and material properties, including crosslink density, degree of crosslinking, number of macromolecules involved in a crosslink node, and the influence of by-products that affect insulation homogeneity. The article highlights extensive international experience regarding the performance of Cross-Linked Polyethylene cables manufactured using different technologies. Technical requirements of major European utility companies and decades of operational practice clearly indicate that silane-crosslinked polyethylene does not provide sufficient long-term reliability for cables above 6–10 kV. Documented field failures—caused by moisture ingress, uneven crosslinking, and the formation of electrical and water treeing—demonstrate the inability of silane insulation to ensure stable performance under medium-voltage conditions. Evidence from Ukrainian installations further supports these conclusions. Special attention is paid to the role of factory testing as an essential component of cable production. High-voltage test systems with partial discharge sensitivity down to 0.5 pC, as well as long-term ageing tests performed in accordance with HD 620, are identified as mandatory requirements for ensuring insulation quality and lifetime. Based on comprehensive analytical results, laboratory studies, and decades of global operating experience, the article concludes that peroxide crosslinking technology remains the only reliable and recommended method for manufacturing Cross-Linked Polyethylene insulation for cables rated above 6 kV. The author stresses the necessity of incorporating this requirement into national Ukrainian regulatory documents to ensure the reliability and safety of power networks.

Keywords: XLPE insulation; peroxide crosslinking; silane technology; partial discharges; cable lifetime; medium voltage.