

ТЕРМІЧНА СТІЙКІСТЬ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ПІДЗЕМНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ В АВАРІЙНИХ УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ І КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

А.А. Щерба^{1*}, академік НАН України, О.Д. Подольцев^{1**}, докт. техн. наук,
І.М. Кучерява,¹ докт. техн. наук, Т.Ю. Антоненко^{2***}, канд. техн. наук

¹Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: podol@ied.org.ua.

² ПАТ «Завод «Південкабель»,
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна.

Роботу присвячено отриманню нових даних у галузі кабельної техніки шляхом вивчення роботи сучасної високовольтної кабельної лінії в аварійних режимах задля забезпечення надійності і ресурсу функціонування. З використанням скінченно-елементного аналізу досліджено температурні режими підземної трифазної кабельної лінії з кабелями зі зшитого-полімерною ізоляцією напругою 110 кВ в номінальному режимі та в аварійних режимах короткого замикання і короткочасного перевантаження кабелів. Розв'язано ряд практично важливих задач, що виникають під час проектування таких кабельних ліній, зокрема проведено розрахунок режиму трифазного КЗ в лінії з урахуванням її повторного включення після КЗ з певним часом витримки (5, 10 та 15 с) та за різного навантаження – 50% і 100% від номінального струму. Результати дають змогу визначити допустимий час роботи лінії з температурою жил кабелів не вище допустимого граничного значення. Досліджено характер зростання у часі температури кабелів за різного струмового перевантаження, що змінюється в діапазоні від 120% до 200%. Результати дають можливість визначити допустимий час роботи лінії, коли температура жили кабелів не перевищує 130°C. У випадку дволанцюгової кабельної лінії наведено результати розрахунку нестационарного теплового процесу в аварійному режимі пошкодження одного ланцюга та передавання подвійної потужності іншим ланцюгом. Показано, що гранична температура жили 130°C досягається після 1,3 години роботи такої лінії. Розв'язані в роботі задачі дають змогу отримати відповіді на питання щодо термічної стійкості високовольтної кабельної лінії в аварійних режимах і представляють інтерес для проектувальників таких ліній, організацій, відповідальних за їхню безпечну експлуатацію, електроенергетичних компаній для більш ефективного використання кабельних ліній. Бібл. 36, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: кабелі зі зшитого-полімерною ізоляцією, кабельна лінія, аварійний режим, температурні режими, час роботи кабелю в безпечному режимі.

На даний час у лініях електропередачі високої та надвисокої напруги (зокрема 110 кВ і більше) широко використовуються силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ). Така ізоляція має високу електричну міцність і пластичність, низькі діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат. Її електрофізичні характеристики можуть залишатися стабільними у разі підвищення температури на 30% і більше. Однак надійність і тривалість служби ЗПЕ ізоляції кабелів багато в чому залежить від умов експлуатації [1, 2].

Під час прокладання кабелів у землі важливими є розташування кабелів у лініях, характеристики навколишнього середовища (засипного ґрунту в траншеї та природного ґрунту навколо неї), дотримання електричних і теплових режимів роботи. Перевищення температури елементів кабелів вище за встановлені норми призводить до прискореного старіння ізоляції, що є причиною зниження її електричної міцності [1, 3]. Особливо важливо це враховувати для високовольтних кабельних ліній (КЛ). Зазначимо, що в Україні переважно використовуються високовольтні силові кабелі із ЗПЕ ізоляцією на напругу до 330 кВ [1, 4–7], зокрема в [6] детально представлено особливості і характеристики кабелів на напругу від 220 до 330 кВ.

Установлено нормативи щодо електричних і теплових характеристик силових кабелів [2, 5], зокрема допустима температура нагріву жил у разі тривалій експлуатації – 90°C; максимально

© Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М., Антоненко Т.Ю., 2026

ORCID: *<https://orcid.org/0000-0002-0200-369X> ; ** <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397> ;

*** <https://orcid.org/0009-0007-2388-2252>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

припустима температура жил кабелів під час короткого замикання (КЗ) – 250°C; гранично допустима температура екрана у разі КЗ – 350°C; допустима температура жил в режимі перевантаження – до 130°C; тривалість роботи кабелів у перевантаженні – не більше 8 годин на добу і до 1000 годин за термін служби. Номінальний переріз струмопровідних жил та екранів обирається в залежності від струмових навантажень і перевіряється за припустимими струмом жили та її струмом під час КЗ [5]. До того ж, для практичних прокладань КЛ розраховані й уточнюються поправочні коефіцієнти, наприклад, для перерахунку струмів залежно від розміщення кабелів, температури оточуючого середовища, характеристик ґрунту для підземних кабелів [2, 5].

Визначення температури кабелів у конкретному випадку практичного застосування передбачає врахування умов експлуатації та режиму роботи (нормального або аварійного у разі перевантаження або КЗ), а також є важливою складовою забезпечення надійності та встановленого терміну служби кабельних ліній внаслідок того, що їхній перегрів може призводити до пошкодження ізоляції та виходу кабелів з ладу. Температура впливає не тільки на допустимий струм жили, але й на втрати потужності.

З відміченого вище впливає також задача визначення допустимих струмових навантажень (значень максимального струму жили кабелю), у разі яких кабель працює без перегріву в різних умовах. Розрахунок тривало допустимого струму кабелів і втрат регламентується міжнародним стандартом МЕК [8], що діє і в Україні [9]. Основи комп'ютерного моделювання та підходи до розв'язання мультифізичних електромагнітних і теплових польових задач представлено в [10, 11].

Особливості роботи кожної конкретної кабельної лінії в характерних режимах роботи, в тому числі й аварійних, виявляються протягом достатньо довгого строку експлуатації та потребують додаткового вивчення теплових стаціонарних і нестаціонарних процесів, урахування змінення температури кабелів, а отже і вироблення практичних заходів щодо коректування струмових навантажень з метою стабільного і довготривалого функціонування кабельної лінії.

Метою роботи є отримання нових даних відносно роботи високовольтних кабелів у аварійних режимах шляхом кількісного дослідження за допомогою комп'ютерного моделювання теплового поля і температурних характеристик діючої підземної кабельної лінії із ЗПЕ ізоляцією на напругу 110 кВ у таких режимах роботи, як номінальний режим, струмові перевантаження і КЗ, та їх порівняння із існуючими нормативними характеристиками.

Розв'язані в роботі задачі виявилися в процесі тривалого (впродовж 10 років) функціонування високовольтної КЛ в Україні та представляють науковий і практичний інтерес як для виробників кабелів, так і для експлуатуючих організацій.

Досліджувана трифазна кабельна лінія складається з одножильних кабелів марки ПвЕгаПу 1 х 500 / 95(150) з мідною жилою перерізом 500 мм² і мідним екраном по жилі, має поздовжню і поперечну герметизацію екрана водоблокуючим полотном та посилену поліетиленову оболонку [5]. Переріз мідного екрана за умовами виробника може становити 95 мм² або 150 мм². Кабелі прокладені трикутником в ґрунті у траншеї на заданій глибині 1,5 м (рис. 1, а). Трифазна система кабелів розглядається за ідеалізованою моделлю трьох кабелів зі збалансованими струмами, без врахування кабельних аксесуарів та муфт.

Моделювання проводиться чисельним методом скінчених елементів у програмі Comsol [12]. У залежності від поставлених задач чисельно розраховується та досліджується двовимірне стаціонарне або нестаціонарне температурне поле в перерізі КЛ з урахуванням механізму теплопровідності. Конвективний та променистий механізми теплообміну не розглядаються. Усі характеристики кабелів та вихідні дані для розрахунків обумовлено виробником і відповідають КЛ, що довгий час (10 років) знаходиться в експлуатації.

Обґрунтування підходу до дослідження. Надзвичайно важливо забезпечити роботу силових кабелів у межах теплових меж, щоб не ставити під загрозу їхню безпечну експлуатацію. Допустимий струм кабелів можна розрахувати, застосовуючи метод, детально описаний у стандарті МЕК 60287 [8]. Однак цей стандарт надає лише формули для визначення номінального струму або максимально допустимого струму в стаціонарних умовах та максимального підвищення температури, але не враховує рівняння теплопередачі (на відміну від стандарту ІЕС 60287-2-1:2023 [13], що застосовується для різних умов прокладання кабелів до 5 кВ, в тому числі і в землі). Це ж стосується і стандарту МЕК 60853 [14], який пропонує методи визначення циклічних та аварійних номінальних струмів силових кабелів, але не надає можливості визначення змінення їхньої температури. Стандарт МЕК 60986 [15] стосується меж

температури КЗ кабелів, надає таблиці з максимально допустимими температурами КЗ для обмеження нагріву, але не дає можливості визначити змінення температури кабелю в часі.

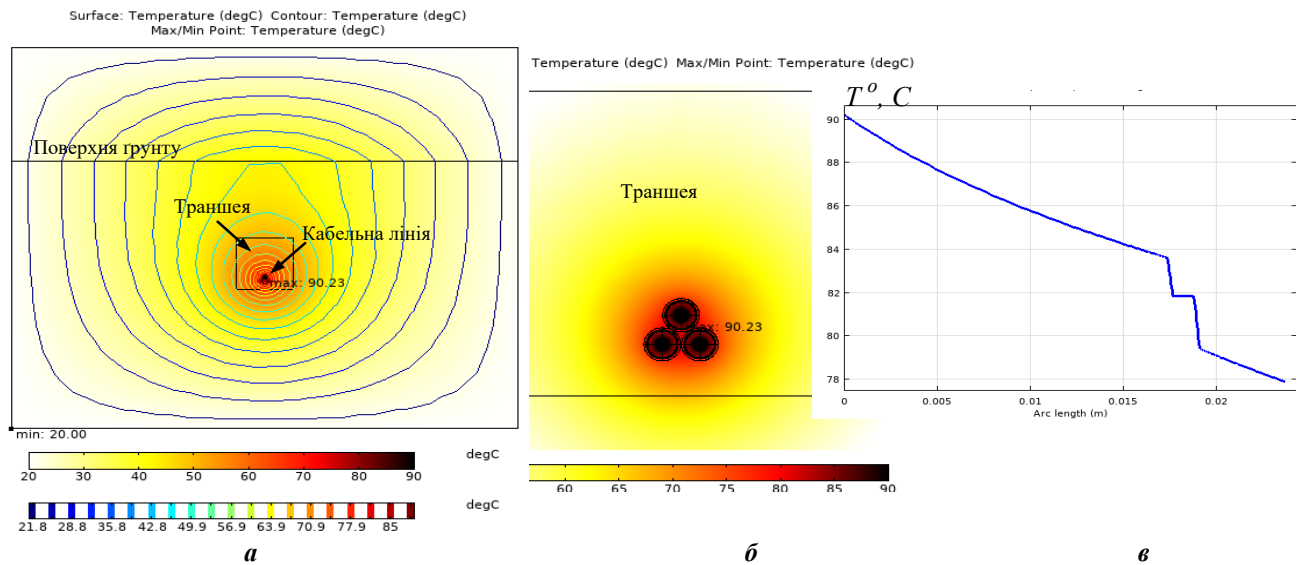


Рис. 1

Розрахунки номінального струму силових кабелів вимагають визначення температури елементів структури кабелю для заданого струму або знаходження допустимого струму для заданої температури кабелю [16]. Такі розрахунки передбачають визначення джерел тепла і його розсіювання за межі кабелю, що залежить від рівня струму, розмірів кабелю, способу прокладання. За такого підходу необхідно розв'язувати рівняння теплопровідності, застосовуючи числові методи [16].

Для чисельних розрахунків широко використовуються дво- та тривимірні методи аналізу скінченних елементів [17–20], що визнано потужним і реалістичним підходом до розв'язання електромагнітних і теплових задач для енергетичних систем [21]. Наприклад, міжнародний стандарт IEC TR 62095 [16] пропонує застосовувати методи скінченних елементів, коли методи, представлені в МЕК 60287 (стаціонарні умови) та МЕК 60853 (циклічні умови), не можуть бути застосовані.

У загальному сенсі існують різні підходи до розрахунку температури силових кабелів із ЗПЕ ізоляцією в номінальному та аварійних режимах. Найбільш відомими є використання 1) аналітичних виразів [22], 2) теплових еквівалентних кіл (або електротеплових аналогів) [10, 23–25] та 3) скінчено-елементного аналізу [1, 10, 11, 26].

Як зазначено вище, аналітичні методи не дають можливості детально аналізувати змінення температури в залежності від часу протікання аварійного процесу. Моделювання теплових процесів у кабельних лініях на основі теплових схем заміщення, як, наприклад, у режимі трифазного КЗ у навантаженні [10], передбачає використання достатньо непростих моделей MatLab/Sumilink, разом з тим надаючи можливості розрахунку сумісних електромагнітних і теплових процесів у КЛ. Найбільш широко використовуваним для комплексних стаціонарних і нестаціонарних розрахунків теплових процесів на основі рівняння теплопровідності залишається комп'ютерне моделювання за допомогою методу скінченних елементів, що і обрано інструментом дослідження в даній роботі.

Основні сучасні методи та підходи до визначення експлуатаційних характеристик КЛ високої напруги, у тому числі допустимого струмового навантаження кабелів, представлено в роботах [27–29].

Подальша розробка та удосконалення методів оцінки теплової стійкості кабельних ліній має практичне значення для електроенергетичної галузі.

Математичні моделі для розрахунку теплових процесів в КЛ. Комп'ютерне моделювання температурного поля виконується в двовимірному випадку в припущенні, що КЛ є протяжною і розміщена паралельно поверхні ґрунту на заданій глибині; умови прокладання незмінні по всій довжині кабельної траси. Крім того, приймається, що земля навколо траншеї і засипний ґрунт у траншеї однорідні по всій глибині. У більш загальному випадку фізичні властивості ґрунту неоднорідні внаслідок того, що зазнають змін під час функціонування КЛ, а також під дією погодних факторів. Джерелами нагріву є електричні струми, що протікають в жилах і наводяться в екранах кабелів.

Стационарне температурне поле. Розподіл двовимірного температурного поля в області перерізу кабельної лінії в стаціонарному режимі роботи описується диференціальним рівнянням теплопровідності

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (1)$$

де λ – теплопровідність відповідного матеріалу; Q – густина потужності діючих в області теплових джерел, до яких відносяться джоулеве тепло, що виділяється в провідниках струмопровідних жил кабелів і втрати від струму в мідному екрані кожного кабелю.

Потужність питомого тепловиділення в елементах розрахункової області обчислюється наступним чином:

$$Q = \begin{cases} J_{\text{ж}}^2 / \sigma_{\text{ж}} & \text{у жилах;} \\ J_{\text{е}}^2 / \sigma_{\text{е}} & \text{в екранах;} \\ 0 & \text{в інших елементах кабелів і підобластях.} \end{cases} \quad (2)$$

Тут $J_{\text{ж}}$, $J_{\text{е}}$ – відповідно діючі значення густини струму в жилах та екранах кабелів; $\sigma_{\text{ж}}$, $\sigma_{\text{е}}$ – електропровідність матеріалів жил та екранів, яка змінюється залежно від температури [30, с. 315].

Втрати енергії в електричній ізоляції в (2) не враховуються. Вони можуть бути обчислені за результатами роботи [31].

Нестационарне температурне поле визначається за рівнянням

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (3)$$

де C і ρ – питома теплоємність і густина матеріалу відповідного елемента. Температурні залежності $\lambda(T)$, $C(T)$ для поліетилену представлено в [32]. Залежності $\lambda(T)$, $C(T)$, $\rho(T)$ для міді надано в [33]. Потужність тепловиділення Q в (3) визначається за формулою (2).

Розміри розрахункової області обираються значно більшими за розміри кабелів (рис. 1, а), тому граничними умовами на всіх зовнішніх границях є умова, що температура на цих границях дорівнює заданій температурі навколишнього середовища $T = T_0 = 20^\circ\text{C}$. Початкова температура в розрахунковій області також дорівнює температурі навколишнього середовища – $T|_{t=0} = T_0$.

Результати комп'ютерного моделювання. Схему траншейного прокладання кабелів показано на рис. 1 а, б. Розрахункова область вміщує модель трифазної кабельної лінії в траншеї зі спеціальним засипним ґрунтом і природним ґрунтом навколо.

Будову кабелю, що досліджувався, показано на рис. 2. Основні характеристики цієї кабельної лінії з різними площами перерізу екрана (95 і 150 мм²) представлено в табл. 1. Екрани кабелів в лінії заземлені з обох сторін. Опір заземлювачів у розрахунках не враховується.

У табл. 1 наведено характеристики кабелю ПвЕгаПу 1 х 500 та кабельної лінії на його основі, а також значення струму є даними виробника відповідно до стандарту МЕК 60287 [8] і вихідними умовами для розрахунків. Опори жили та екрана кабелю у табл. 1, 2 представлено для частоти 50 Гц і максимальної робочої температури жили 90⁰С. Змінення характеристик ґрунту навколо кабелів не враховується, хоча в дійсності його термічний опір та теплоємність залежать від складу самого ґрунту, вмісту вологи, погодних умов, зміни у часі температури [34].

1. *Перевірка комп'ютерної програми шляхом порівняння температури жили, отриманої за чисельним розрахунком і за стандартом МЕК [8], в якому регламентуються дані, отримані аналітичними методами.* Результати чисельного розрахунку усталеного теплового процесу в кабельній лінії з площею екранів кабелів 95 мм² наведено на рис. 1, а, б, де показано розподіл температурного поля (в кольорі та ізолініями) навколо кабелів (струм жили / екрана – 687 / 154 А, переріз екрана 95 мм²) та змінення температури вздовж радіусу верхнього кабелю від поверхні жили



Рис. 2

до зовнішньої точки оболонки (рис. 1, в). Найбільша температура – температура жили – дорівнює 90°C , що в точності відповідає нормам МЕК [8].

Таблиця 1

<i>Геометричні характеристики</i>	
Діаметр кабелю, мм	74
Діаметр жили, мм ²	26,5
Товщина ЗПЕ-ізоляції, мм	15,0
Товщина напівпровідного шару по жилі, мм	1,4
Товщина напівпровідного шару по ізоляції, мм	1,0
Шар водоблокуючого полотна, мм	0,3
Товщина екрана, мм	1,13
Товщина поліетиленової оболонки, мм	4,5
Глибина прокладання кабелів у землі, м	1,5
<i>Електричні характеристики</i>	
Кабель з перерізом екрана 95 мм ²	
Струм у жилі / електричний опір, А / Ом/км	687 / 0,048
Струм в екрані / електричний опір, А / Ом/км	154 / 0,230
Кабель з перерізом екрана 150 мм ²	
Струм у жилі / електричний опір, А / Ом/км	666 / 0,048
Струм в екрані / електричний опір, А / Ом/км	226 / 0,148
Заземлення кабелів	з двох сторін
Частота, Гц	50
<i>Теплові характеристики</i>	
Питомий тепловий опір поліетилену (ізоляції, оболонки, напівпровідних шарів), К·м/Вт	3
Питомий тепловий опір міді (жил, екрана), К·м/Вт	0,0025
Питомий тепловий опір водоблокуючого шару, К·м/Вт	50
Тепловий опір засипного ґрунту, К·м/Вт	1,0
Тепловий опір землі навколо траншеї, К·м/Вт	1,5

Таблиця 2

Площа перерізу екрана S_s , мм ²	Струм, А / опір, Ом/км в жилі	Струм, А / опір, Ом/км в екрані	Максимальна температура, $T_{\max}$
95	687 / 0,048	154 / 0,23	90,23
150	666 / 0,048	226 / 0,148	90,13

температурного поля в КЛ.

3. Визначення термічної стійкості кабелю до струмів трифазного КЗ на виході КЛ у разі спрацьовування апарату автоматичного повторного включення (АПН), коли реалізується практичний випадок релейного захисту у разі КЗ кабелів за різного струмового навантаження. Припускається, що релейний захист відключає зовнішнє КЗ, і далі після певної витримки за часом t_g спрацьовує АПН, і лінія знову підключається до джерела живлення. При цьому можуть бути реалізовані два варіанти: коли лінія після цього працює в штатному режимі або відбувається повторне КЗ. Такі аварійні режими роботи КЛ у мережі передбачають розрахунок термічної стійкості кабелів, що важливо як для проектувальників, так і організацій, що експлуатують кабельні лінії.

На рис. 3 показано змінення в часі температури жили верхнього кабелю в лінії з площею перерізу екрана 150 мм² та за різної тривалості витримки t_b (5, 10, 15 с) після односекундного КЗ і автоматичному повторному включенні КЛ після такої витримки, коли знову відбувається КЗ. Розрахункові результати наведено для двох значень струму в жилах кабелів: а) 50% струм жили (333 А); б) 100% струм жили (666 А). На рис. 3, а показано характерні точки червоного кольору: 1 – момент виникнення КЗ, 2 – відключення лінії через 1 секунду, 3 – повторне включення КЛ, яка працює в режимі КЗ. Задані значення струму (333 і 666 А) та представлені на рис. 3 умови щодо включення КЛ і режиму КЗ заявлено виробником та виявлено практично значимими для досліджуваної КЛ.

Далі розглянуто ряд задач, що виникали в процесі тривалого (впродовж 10 років) функціонування високовольтної КЛ в Україні та важливі для виробників кабелів і експлуатуючих їх організацій.

2. Оцінка зниження пропускної здатності кабелю у разі збільшення площі перерізу його екрана. Розрахунки проводилися для кабелю з екранами 95 мм² та 150 мм². Чисельні результати наведено в табл. 2. Із таблиці видно, що у разі збільшення площини екрана збільшуються струм в екрані (з 154 А до 226 А) та втрати в ньому. Внаслідок цього для підтримки температури жили на рівні 90°C необхідно зменшувати струм в жилі – в даному випадку з 687 А до 666 А. Співвідношення цих значень дорівнює $666/687=0,97$ і складає саме таке значення поправочного коефіцієнта, що рекомендується [9]. Отже, результати чисельного розрахунку в табл. 2 підтверджують правильність вибору поправочного коефіцієнта 0,97 у разі переходу до площі перерізу екрана 150 мм².

Розглянуті задачі 1 та 2 відповідають стаціонарному режиму нагріву кабелів. Подальші задачі передбачають дослідження нестационарного

Термічна стійкість кабельної лінії впродовж відповідного інтервалу часу оцінюється за даними рис. 3 з урахуванням перевищення регламентованої граничної температури жили в режимі перевантаження 130°C і в режимі КЗ – 250°C [2, 5]. Результати на рис. 3 дають змогу визначити допустимий час роботи КЛ, коли температура жили кабелів не перевищує допустимі граничні значення.

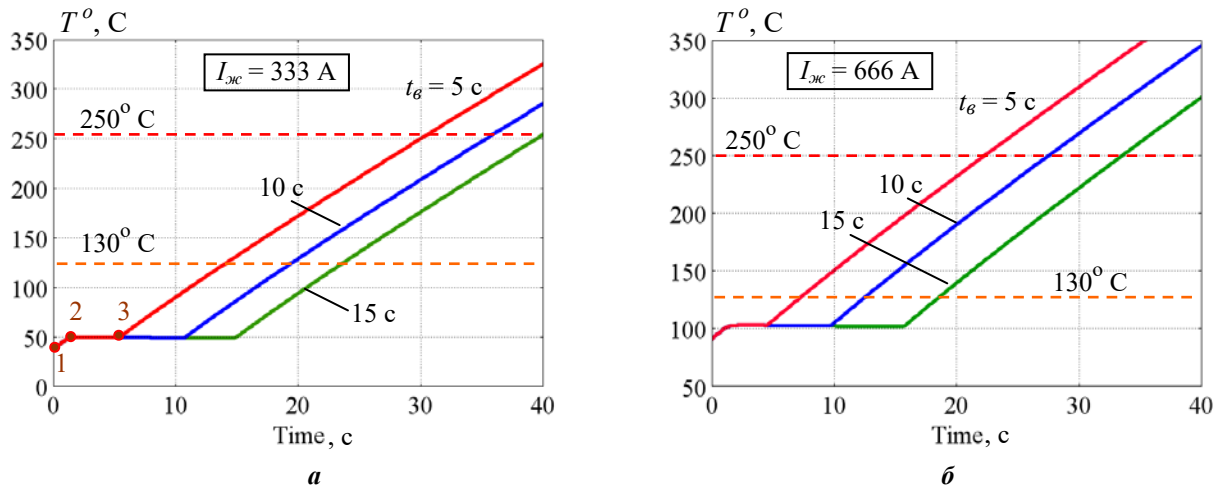


Рис. 3

4. Розрахунок рівня перевантаження дволанцюгової лінії з кабелями, що мають площу перерізу екрана 150 мм^2 . Кабельна лінія складається з двох ланцюгів, подібних до рис. 1, б. Припускається, що в одному з ланцюгів відбувається аварія і тоді вся потужність передається по іншому ланцюгу – тобто струм в жилах його кабелів підвищується в 2 рази. Для такого випадку на рис. 4 показано зміння температури жили верхнього кабелю у перевантаженому ланцюгу зі струмом $2 \cdot 666\text{ А}$. Як видно з рис. 4, температура жили 130°C , що відповідає допустимому рівню в режимі перевантаження, досягається після 1,3 години роботи кабельної лінії. Це означає, що КЛ під час відключення одного з ланцюгів зможе саме стільки ще працювати в розглянутому аварійному режимі і передавати при цьому всю номінальну потужність.

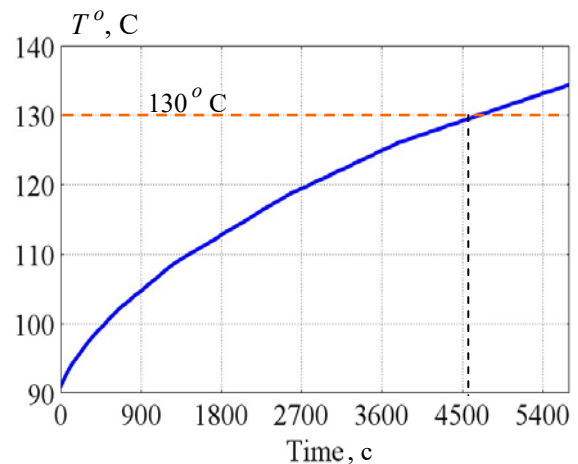


Рис. 4

5. Визначення температурного режиму роботи КЛ, що перевантажується впродовж певного часу. Задача відповідає випадку, коли КЛ працює разом із силовим трансформатором.

Відомо, що більшість силових трансформаторів, що розміщені на виході КЛ, допускають перевантаження протягом визначеного часу, наприклад, перевантаження 110–120% – нескінченно довго, 130% – до 6 годин; 150% – півгодини; 200% – 5 хвилин. При цьому проєктувальники такої КЛ повинні бути впевнені, що кабелі в лінії витримують можливі перевантаження.

Розрахункові результати зміння в часі температури жили кабелю за вказаних перевантаженнях наведено на рис. 5. Приймалося, що початкове значення струму жили складає 666 А, площа перерізу екрана – 150 мм^2 , а початкова температура всіх елементів кабелю дорівнює температурі в усталеному режимі. Пунктирні лінії на рис. 5 позначають допустимий час роботи силового трансформатора. Видно, що за цей час температура жили буде зростати, але не перевищуватиме припустиму температуру в режимі перевантаження – 130°C , тобто за умови підвищення струму до 2-х разів впродовж заданих інтервалів роботи КЛ залишається ще резерв по навантаженню.

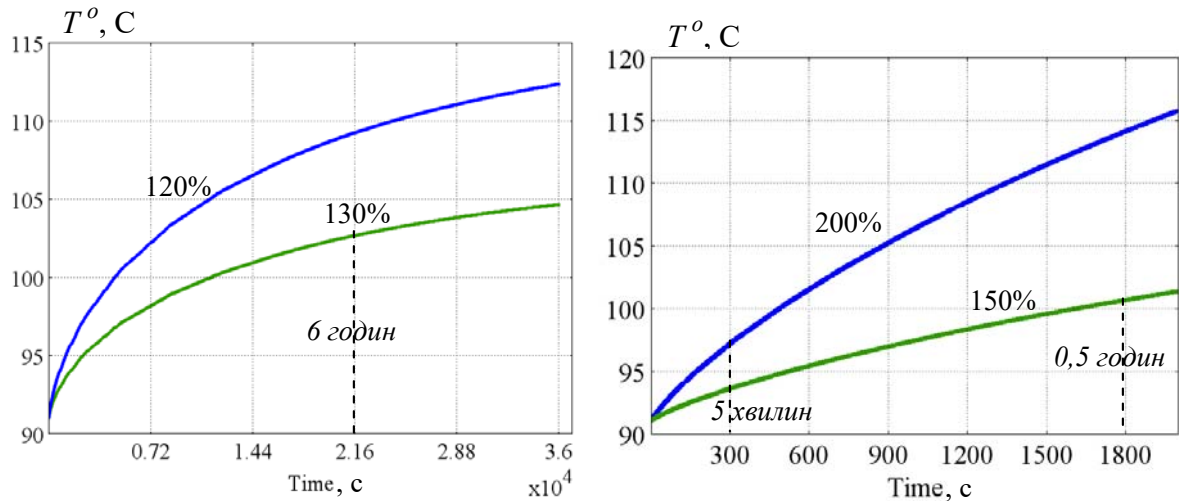


Рис. 5

Під час дослідження температурних режимів у двох останніх розділах (4, 5) враховано змінення температури по товщині зшити-поліетиленової ізоляції кабелів, про що свідчить рис. 1, в. Це особливо важливо у разі циклічного нагрівання кабелів, оскільки пов'язано з температурним старінням ізоляції та електротермічними напруженнями всередині кабелю [35, 36].

Зазначимо, що вирішення аналогічних до представлених у роботі питань передбачає подальші дослідження, зокрема в напрямку врахування кабельних з'єднань, заземлювачів, поточного стану зшити-поліетиленової ізоляції тощо.

Висновки. Отримано нові дані щодо роботи високовольтних кабелів напруги 110 кВ в аварійних режимах на етапі експлуатації, що важливо для підвищення надійності та стабільності функціонування кабельних ліній в системах електропостачання.

З використанням скінченно-елементного методу аналізу досліджено температурні режими роботи підземної трифазної кабельної лінії із кабелями зі зшити-полімерною ізоляцією на напругу 110 кВ у номінальному режимі роботи та в аварійних режимах короткого замикання і короткочасного перевантаження кабелів.

Розв'язано ряд практично важливих задач, що виникають під час проектування таких кабельних ліній, зокрема проведено розрахунок режиму трифазного КЗ з урахуванням автоматичного повторного включення лінії після КЗ з певним часом витримки (5, 10 та 15 с) та за різного навантаження – 50% і 100% від номінального струму. Результати дають змогу визначити допустимий час роботи лінії, коли температура жили кабелів не перевищує допустимі граничні значення.

Досліджено характер змінення температури кабелів за різного струмового перевантаження, що змінюється в діапазоні від 120% до 200%. Результати дають змогу визначити допустимий час роботи лінії, коли жили кабелів не нагріваються вище припустимої температури 130°C.

У випадку дволанцюгової кабельної лінії проведено розрахунок нестационарного теплового процесу у аварійному режимі пошкодження одного ланцюга та передавання подвійної потужності по іншому ланцюгу. Показано, що гранична температура жили – 130°C досягається після 1,3 години роботи такої лінії.

Розроблена методологія та отримані результати щодо термічної стійкості високовольтної кабельної лінії в аварійних режимах перевантаження і короткого замикання представляють інтерес для проектувальників таких ліній, організацій, що відповідають за безпечну експлуатацію кабелів, а також можуть прокласти шлях для електроенергетичних компаній до більш ефективного використання кабельних ліній.

Роботу виконано за науково-дослідною фундаментальною темою "Елрес", номер держ. реєстрації 0123U100693, КПКВК 6541030 та прикладною НДР "Режим 3", КПКВК 6541230.

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.

2. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. Т. 3. М.: Папирус-Про, 2004. 688 с.
3. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. Published by Peter Peregrinus for the IEE, 1992. 601 p.
4. Золотарев В.М. Решение проблемы создания отечественных электротехнологических комплексов производства кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ. *Вісник Нац. техн. ун-ту Харківський політехнічний інститут*. 2009. № 39. С. 50–63.
5. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 64/110 кВ. Науч.-метод. издание РТМ К28–004:2006. Харьков: Майдан, 2007. 62 с.
6. Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу від 220 до 330 кВ. Довідник продукції ПАТ «Завод Південкабель». URL: <https://www.yuzhcable.info/cat/12/> (дата звернення 23.08.2025)
7. Лях В.В., Молчанов В.М., Судаков И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. *Електрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16–21.
8. IEC 60287-1-1:2023 Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General. URL: <https://www.vde-verlag.de/iec-standards/251857/iec-60287-1-3-2023.html> (дата звернення 23.08.2025)
9. ДСТУ IEC 60287-1-1:2009. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100%) і обчислення втрат. Загальні положення (IEC 60287-1-1:2001, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81689 (дата звернення 23.08.2025)
10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
11. Кучерявая И.Н. Тепловой расчет силового кабеля на напряжение 110 кВ с учетом нелинейных характеристик полимерной изоляции. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 4. С. 7–11.
12. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (дата звернення 23.08.2025)
13. IEC 60287-2-1:2023. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance Calculation of thermal resistance. Edition 3.0. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3102414>.
14. IEC 60853-1:1985. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables. Part 1: cyclic rating factor for cables up to and including 18/30(36) kV. IEC: Geneva, Switzerland, 1985. Pp. 1–39.
15. IEC 60986:2000. Short-circuit temperature limits of electric cables with rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). IEC: Geneva, Switzerland, 2000. Pp. 1–19.
16. IEC TR 62095:2003. Electric cables-calculations for current ratings-finite element method. IEC: Geneva, Switzerland, 2003. Pp. 1–69.
17. Callender G., Goddard K.F., Dix, J., Lewin P.L. A flexible model to calculate buried cable ampacity in complex environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 37. Issue 3. Pp. 2007–2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3102414>.
18. Liu G., Xu Z., Ma H., Hao Y., Wang P., Wu W., Xie Y., Guo D. An improved analytical thermal rating method for cables installed in short-conduits. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 123. Article no 106223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106223>.
19. Bustamante S., Mínguez R., Arroyo A., Manana M., Laso A., Castro P., Martinez R. Thermal behaviour of medium-voltage underground cables under high-load operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 156. Pp. 444–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.083>.
20. Rasoulpoor M., Mirzaie M., Mirimani S.M. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2017. Vol. 123. Pp. 353–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.070>.
21. Abomailek C., Capelli F., Riba J.-R., Casals-Torrens P. Transient thermal modelling of substation connectors by means of dimensionality reduction. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 111. Pp. 562–572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.110>.
22. Millar R.J. A comprehensive approach to real time power cable temperature prediction and rating in thermally unstable environments. Doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, 2006. 157 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/27516483_A_Comprehensive_Approach_to_Real_Time_Power_Cable_Temperature_Prediction_and_Rating_in_Thermally_Unstable_Environments (дата звернення 23.08.2025)
23. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. Санкт-Петербург: Политех-пресс, 2021. 696 с.
24. Aras F., Bicen Y. Thermal modelling and analysis of high-voltage insulated power cables under transient loads. *Computer Applications in Engineering Education*. 2013. Vol. 21. No 3. Pp. 516–529. DOI: <https://doi.org/10.1002/cae.20497>.

25. Enescu D., Colella P., Russo A., Porumb R.F., Seritan G.C. Concepts and methods to assess the dynamic thermal rating of underground power cables. *Energies*. 2021. No 14. P. 2591. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092591>.
26. Enescu D., Colella P., Russo A. Thermal assessment of power cables and impacts on cable current rating: An overview. *Energies*. 2020. No 13. P. 5319. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205319>.
27. Wild F., Rossum J., Anders G.J., Brijs B., Bascom R., Coelho M., Corsaro P., Falconer A., Gonzalez A., Huelsken G., Kuljaca N., Martinsson B., Nam S-H, Pilgrim J., Rakowska A., RemY C., Takahashi T., Waite F. A guide for rating calculations of insulated power cables. 9th International Conference on *Insulated Power Cables (Jicable'15)*, France, Paris, Versailles, 21–25 June, 2015 Paper E2.1. 6 p.
28. Diaz-Aguiló M., León F. Introducing mutual heating effects in the ladder-type soil model for the dynamic thermal rating of underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 4. Pp. 1958–1964. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2390072>.
29. Liu K., Zagorščak R., Sandford R.J., Cwikowski O.N., Yanushkevich A., Thomas H.R. Insights into the Thermal performance of underground high voltage electricity transmission lines through thermo-hydraulic modelling. *Energies*. 2022. Vol. 15(23). Article no 8897. 25 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238897>.
30. Кухлинг Х. Справочник по физике. М: Мир, 1985. 520 с.
31. Nadolny Z. Electric field distribution and dielectric losses in XLPE insulation and semiconductor screens of high-voltage cables. *Energies*. 2022. Vol. 15. Article no 4692. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134692>.
32. Овсиенко В.Л. Исследование нелинейных тепловых полей в высоковольтных кабелях с полимерной изоляцией. *Кабели и провода*. 2000. № 4. С. 26–29.
33. Столович Н.Н., Минацкая Н.С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. Минск: Наука и техника, 1975. 160 с.
34. Olsen R., Anders G.J., Holboell J., Gudmundsdottir U.S. Modelling of dynamic transmission cable temperature considering soil-specific heat, thermal resistivity, and precipitation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013. Vol. 28. No 3. Pp. 1909–1917. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2263300>.
35. Han Y.J., Lee H.M., Shin Y.J. Thermal aging estimation with load cycle and thermal transients for XLPE-insulated underground cable. Proceedings of the IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, TX, USA, 22–25 October 2017. Pp. 205–208. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2017.8257566>.
36. Mazzanti G. Analysis of the combined effects of load cycling, thermal transients, and electrothermal stress on life expectancy of high-voltage AC cables. *IEEE Trans. On Power Delivery*. 2007. Vol. 22. No 4. Pp. 2000–2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905547>.

THERMAL STABILITY OF UNDERGROUND HIGH-VOLTAGE CABLE LINE UNDER EMERGENCY CONDITIONS OF OVERLOAD AND SHORT CIRCUIT

A.A. Shcherba¹, O.D. Podoltsev¹, I.M. Kucheriava¹, T.Yu. Antonetz²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteyskyi, Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: podol@ied.org.ua.

² PJSC “Yuzhcable Works”,
7, Avtogenynaya Str., Kharkov, 61099, Ukraine.

The paper proposes new knowledge in cable engineering by studying the operation of up-to-date high-voltage cable line under the non-nominal and emergency conditions to ensure its reliability and service life. The temperature conditions for operation of an underground 110 kV three-phase cable line with cross-linked polyethylene insulated cables in the nominal and emergency modes of short circuit and short-term overload of cables are studied by computer finite-element method. A number of practically important problems for designing such cable lines are solved. In particular, the computation of the three-phase short-circuit mode in the line is carried out taking into account its reconnection after short circuit with certain delay time (5, 10 or 15 s) and at different loads (50% and 100% of the nominal current). The results obtained allow determining the permissible operating time for the line operation with the temperature of the cable conductor not higher than the permissible limiting value. The nature of the increase in the temperature of the cables within the time of different current overloads varying from 120% to 200% is investigated. The results give a possibility to determine the permissible operating time of the line when the temperature of the cable conductor does not exceed 130°C. In the case of the double-circuit cable line, the computational results for non-stationary thermal process under emergency condition of one circuit failure and the transmission of double power through the other circuit are presented. It is shown that the limiting conductor temperature of 130°C is reached after 1.3 hours of line operation. The problems solved in the paper answer the questions regarding the thermal stability of the high-voltage cable line in emergency modes and are of interest to designers of such lines as well as organizations responsible for their safe operation and power companies for more efficient use of cable lines. References 36, figures 5, tables 2.

Keywords: cables with cross-linked polymer insulation, cable line, emergency mode, temperature conditions, cable operation time under safe conditions.

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 of the NAS of Ukraine, 2013. 550 p. (Rus)
2. Makarov E.F. Handbook on the 4–35 kV and 110–1150 kV power networks. Ed. by I.T. Goryunov. A.A. Lyubimov. Vol. 3. Moskva: Papirus-Pro, 2004. 688 p. (Rus)
3. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. Published by Peter Peregrinus for the IEE, 1992. 601 p.
4. Zolotarev V.M. Solution to the problem of creating the domestic electrotechnological complexes for the production of power cables with voltage up to 330 kV. *Visnyk Nationalnogo Technichnogo Universitetu Kharkiv Polytechnic Institute*. 2009. No 39. Pp. 50–63. (Rus)
5. Guiding technical material on the construction, testing and operation of cable lines using cables with cross-linked polyethylene insulation for voltages from 64/110 kV. Scientific and methodological publication RTM K28–004:2006. Kharkov: Maidan, 2007. 62 p. (Rus)
6. XLPE-insulated power cables for voltage from 220 to 330 kV. PJSC Yuzhcable Works production guide. URL: <https://www.yuzhcable.info/cat/12/lang/en> (Ukr) (accessed at 23.08.2025)
7. 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)
8. IEC 60287-1-1:2023. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General. URL: <https://www.vde-verlag.de/iec-standards/251857/iec-60287-1-3-2023.html> (accessed at 23.08.2025)
9. DSTU IEC 60287-1-1:2009. Electric cables. Calculation of the current rating..Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General regulations (IEC 60287-1-1:2001, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81689 (Ukr) (accessed at 23.08.2025)
10. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiphysical modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus)
11. Kucheryava I.M. Thermal calculation of 110 kV power cable taking into account nonlinear characteristics of polymer insulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2006. No 4. Pp. 7–11. (Rus)
12. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed at 23.08.2025)
13. IEC 60287-2-1:2023. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance Calculation of thermal resistance. Edition 3.0. Publication date: 2023-05-22, 47 p. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68134> (accessed at 23.08.2025)
14. IEC 60853-1:1985. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables. Part 1: Cyclic rating factor for cables up to and including 18/30(36) kV. IEC: Geneva, Switzerland, 1985. Pp. 1–39.
15. IEC 60986:2000. Short-circuit temperature limits of electric cables with rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). IEC: Geneva, Switzerland, 2000. Pp. 1–19.
16. IEC TR 62095:2003. Electric cables-calculations for current ratings-finite element method. IEC: Geneva, Switzerland, 2003. Pp. 1–69.
17. Callender G., Goddard K.F., Dix J., Lewin P.L. A flexible model to calculate buried cable ampacity in complex environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 37. Issue 3. Pp. 2007–2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3102414>.
18. Liu G., Xu Z., Ma H., Hao Y., Wang P., Wu W., Xie Y., Guo D. An improved analytical thermal rating method for cables installed in short-conduits. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 123. Article no 106223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106223>.
19. Bustamante S., Mínguez R., Arroyo A., Manana M., Laso A., Castro P., Martinez R. Thermal behaviour of medium-voltage underground cables under high-load operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 156. Pp. 444–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.083>.
20. Rasoulpoor M., Mirzaie M., Mirimani S.M. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2017. Vol. 123. Pp. 353–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.070>.
21. Abomailek C., Capelli F., Riba J.-R., Casals-Torrens P. Transient thermal modelling of substation connectors by means of dimensionality reduction. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 111. Pp. 562–572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.110>.
22. Millar R.J. A comprehensive approach to real time power cable temperature prediction and rating in thermally unstable environments. Doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, 2006. 157 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/27516483_A_Comprehensive_Approach_to_Real_Time_Power_Cable_Temperature_Prediction_and_Rating_in_Thermally_Unstable_Environments (accessed at 23.08.2025)
23. Dmitriev M.V. High-voltage cable lines. St. Petersburg: Polytech-press, 2021. 696 p. (Rus)

24. Aras F., Bicen Y. Thermal modelling and analysis of high-voltage insulated power cables under transient loads. *Computer Applications in Engineering Education*. 2013. Vol. 21. No 3. Pp. 516–529. DOI: <https://doi.org/10.1002/cae.20497>.
25. Enescu D., Colella P., Russo A., Porumb R.F., Seritan G.C. Concepts and methods to assess the dynamic thermal rating of underground power cables. *Energies*. 2021. No 14. P. 2591. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092591>.
26. Enescu D., Colella P., Russo A. Thermal assessment of power cables and impacts on cable current rating: An overview. *Energies*. 2020. No 13. P. 5319. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205319>.
27. Wild F., Rossum J., Anders G.J., Brijs B., Bascom R., Coelho M., Corsaro P., Falconer A., Gonzalez A., Huelsken G., Kuljaca N., Martinsson B., Nam S-H, Pilgrim J., Rakowska A., RemY C., Takahashi T., Waite F. A guide for rating calculations of insulated power cables. *9th International Conference on Insulated Power Cables (Jicable'15)*, France, Paris, Versailles, 21–25 June, 2015. Paper E2.1. 6 p.
28. Diaz-Aguiló M., León F. Introducing mutual heating effects in the ladder-type soil model for the dynamic thermal rating of underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 4. Pp.1958–1964. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2390072>.
29. Liu K., Zagorščak R., Sandford R.J., Cwikowski O.N., Yanushkevich A., Thomas H.R. Insights into the Thermal performance of underground high voltage electricity transmission lines through thermo-hydraulic modelling. *Energies*. 2022. Vol. 15(23). Article no 8897. 25 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238897>.
30. Kuchling H. Handbook on physics. Moskva: Mir, 1985. 520 p. (Rus)
31. Nadolny Z. Electric field distribution and dielectric losses in XLPE insulation and semiconductor screens of high-voltage cables. *Energies*. 2022. Vol. 15. Article no 4692. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134692>.
32. Ovsienko V.L. Study of nonlinear thermal fields in high-voltage cables with polymer insulation. *Kabeli i provoda*. 2000. No 4. Pp. 26–29. (Rus)
33. Stolovich N.N., Minitskaya N.S. Temperature dependences of thermophysical properties of some metals. Minsk: Nauka i tekhnika, 1975. 160 p. (Rus)
34. Olsen R., Anders G.J., Holboell J., Gudmundsdottir U.S. Modelling of dynamic transmission cable temperature considering soil-specific heat, thermal resistivity, and precipitation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013. Vol. 28. No 3. Pp. 1909–1917. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2263300>.
35. Han Y.J., Lee H.M., Shin Y.J. Thermal aging estimation with load cycle and thermal transients for XLPE-insulated underground cable. Proceedings of the IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, TX, USA, 22–25 October 2017. Pp. 205–208. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2017.8257566>.
36. Mazzanti G. Analysis of the combined effects of load cycling, thermal transients, and electrothermal stress on life expectancy of high-voltage AC cables. *IEEE Trans. On Power Delivery*. 2007. Vol. 22. No 4. Pp. 2000–2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905547>.

Надійшла 11.09.2025
Прийнята 13.10.2025