



УДК 621.311

**THERMAL CALCULATION OF CABLE LINES LAID IN
POLYMER PIPES****ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ, ПРОКЛАДЕНИХ В ПОЛІМЕРНИХ
ТРУБАХ****Kuryk V. V. / Кирик В. В.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0003-0419-8934

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,**Kyiv, Prosp.Peremohy, 37, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м.Київ, проспект Перемоги, 37, 03056***Podoltsev O. D. / Подольцев О. Д.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-9029-9397

*National Academy of Sciences of Ukraine "Institute of Electrodynamics",**Kyiv, Prosp.Peremohy, 56, 03057**Національна академія наук України «Інститут електродинаміки»,**м.Київ, проспект Перемоги, 56, 03057***Rybka O. O. / Рыбка О. О.***Master's student / магістрант**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,**Kyiv, Prosp.Peremohy, 37, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м.Київ, проспект Перемоги, 37, 03056*

Анотація. Стаття присвячена дослідженню теплового розрахунку високовольтних кабельних ліній змінного струму, прокладених в полімерних трубах. Прокладання кабельних трас в полімерних трубах – це сучасний високотехнологічний метод побудови електричних мереж, який має переваги перед прокладанням високовольтних кабелів у відкритому ґрунті або в залізобетонних каналах. Такий метод характеризується мало-об'ємними земляними роботами в умовах міської забудови та короткими термінами будівництва. Запропонована узагальнена формалізація пропускної здатності високовольтних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Зокрема, показано, що в номінальному режимі роботи при температурі жили кабелю 90 °С, що є прийнятним для ізоляції зі зшитого поліетилену, температура оболонки кабелю може досягати 90...105 °С і тому в конструкції кабелів не можна використовувати полімерні труби для холодної води. Труби холодного водопостачання для прокладання в них кабелю, виконуються з поліетилену низького тиску і розраховані на температуру не вище 40 °С. Виконано аналіз методів прокладання кабельних ліній з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Акцентовано на основні проблемні питання теплового розрахунку кабельних мереж. Проведене моделювання в програмному середовищі COMSOL, підтвердило висновки, що питома значення температури оболонки кабелю залежить від умов прокладання кабелю, але в середньому становить близько 50 °С. Установлено, що за деяких умов прокладання кабельної мережі в трубі не зменшує допустимий струм кабельної лінії, а навпаки, збільшує його. Сформульовані аспекти підвищення ефективності прокладання трифазних груп однофазних кабелів. Запропоновано методику проведення оціночних теплових розрахунків кабельних ліній з однофазними кабелями, що враховує відразу два механізми теплопередачі: за рахунок теплопровідності та за рахунок конвекції. Розглянуто приклад теплового розрахунку високовольтної кабельної лінії по скоригованій формулі для трифазної групи однофазних кабелів XRUHAKXS-WTC



1x2000RMS в ізоляції з XPLE напругою 110 кВ з мідною жилою перерізом 2000 мм² та екраном 150 мм².

Ключові слова: тепловий розрахунок, високовольтна кабельна лінія, ізоляція, струм.

Вступ.

На теперішній час досить широкого використання для прокладання високовольтних кабелів знайшли пластмасові труби, які витіснили екологічно небезпечні азбоцементні труби. Пластмасові труби мають привабливі характеристики такі, як: тривалий термін служби, мала вага, висока корозійна стійкість, пластичність, висока механічна міцність та легке оброблення, значна будівельна довжина. Такі характеристики суттєво спрощують технологічний процес прокладання і терміни монтажу та розширюють сферу застосування кабельних ліній електропередавання з ізоляцією зі зшитого поліетилену.

Прокладання кабельних трас в полімерних трубах – це сучасний високотехнологічний метод побудови трас електричних мереж, який має переваги перед прокладанням кабелів у відкритому ґрунті або в залізобетонних каналах: незначні земляні роботи та висока швидкість будівництва [4, 5, 6].

За номінального режиму функціонування кабельної лінії при температурі жили кабелю 90 °С, що є прийнятним для ізоляції зі зшитого поліетилену, температура оболонки кабелю може досягати 75...85 °С, а при коротких замиканнях в кабелі – до 200...350 °С, і тому в конструкції високовольтних кабельних ліній проблематично використовувати полімерні безнапірні труби із поліпропілену (ПП), поліетилену (ПЕ), непластифікованого полівінілхлориду (НПВХ), які призначені для зовнішніх мереж каналізації будинків і споруд. Такі труби рекомендовано застосовувати в інтервалах температур: від 0 °С до 45 °С із ПЕ та НПВХ; від 0 °С до 95 °С із ПП (95 °С короткочасно до однієї хвилини) [7].

В сучасних умовах розширення та щільності міської забудови високовольтні кабельні мережі, зокрема напругою 110 кВ, отримали широке поширення. Досить часто виникає необхідність організації кабельних вставок в повітряні лінії електропередавання. Кабелі в таких випадках прокладаються в трубах. Тривалий допустимий струм кабельних ліній за нормального режиму роботи розраховується, згідно з рекомендаціями [8], [11], [12], за формулою:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot (0,5 \cdot T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4))}{R \cdot T_1 + n \cdot R(1 + \lambda_1)T_2 + n \cdot R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}}$$

де $\Delta\theta$ – різниця температур між струмопровідною жилою та зовнішнім середовищем, °С; W_d – діелектричні втрати на одиницю довжини, Вт/м; T_1 – тепловий опір між жилою та металевим екраном (оболонкою), К·м /Вт; T_2 – тепловий опір між металевим екраном (оболонкою) та бронею, К·м /Вт; T_3 – тепловий опір зовнішньої ізоляції кабелю, °С ·м /Вт; T_4 – тепловий опір середовища, що оточує кабель, °С ·м /Вт; R – погонний електричний опір струмопровідної жили змінному струму за максимально допустимої температури жили, Ом /м; n – кількість жил у кабелі; λ_1, λ_2 – відношення загальних втрат у металевих екранах (оболонках) і броні до суми втрат у струмопровідних жилах.



Визначений тривалий допустимий струм кабелю коригується відповідно до умов прокладання [8], з врахуванням поправкових коефіцієнтів на: спосіб прокладання кабелю; температуру середовища (повітря, ґрунту, дна водойми); глибину закладання кабелю; питомий тепловий опір середовища; переріз екрана (оболонки); відстань між кабелями та групами кабелів; кількість кабелів у траншеї; теплопровідність матеріалу і діаметри (внутрішній, зовнішній) труби; відсутність струмового навантаження екранів і оболонок. Тепловий розрахунок кабельної лінії після коригування струму як правило не проводиться.

Незважаючи на опубліковані результати досліджень теплових режимів кабельних ліній, які отримані різними способами і методами, питання практичного визначення допустимих струмів кабельних ліній за різного виконання траси з врахуванням реальних умов є актуальним. За деяких умов прокладання кабельної мережі в трубі можливі випадки, коли допустимий струм КЛ не зменшується, а навпаки навіть збільшується.

На теперішній час рівень чисельних розрахунків теплових режимів та їх візуалізації спеціалізованими програмними засобами, завдячуючи мікропроцесорним засобам, став досить високим і в той же час простим та доступним інженерними працівникам. За допомогою програмних інструментів досить точно можна оцінити температуру як жили кабелю, так і навколишнього середовища, в тому числі захисних полімерних труб.

Метою роботи є розроблення узагальненої математичної формалізації теплового розрахунку високовольтного кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену в полімерних трубах та оцінка пропускної здатності кабельної лінії.

Для спрощення визначення пропускної здатності кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену скористаємося методикою [4], відповідно до рівняння теплового балансу.

Моделювання теплових процесів виконаємо за допомогою спеціалізованого програмного середовища COMSOL.

Оціночний тепловий розрахунок кабелю.

На рис. 1 схематично показана конструкція силового однофазного кабелю і один із способів його прокладки – у полімерній трубі, розміщеній у ґрунті. Під час проведення оціночних розрахунків вважаємо, що кабель розташований в середній частині труби (насправді кабель завжди розташовується в нижній частині труби). На рис.1 зображено 1 – жила, 2 – ізоляція, 3 – екран, 4 – оболонка, 5 – труба, 6 – ґрунт, 7 – повітря, r_1 – радіус жили кабелю, r_2 – внутрішній радіус екрана кабелю, r_3 – зовнішній радіус екрана кабелю, r_4 – зовнішній радіус кабелю, r_5 – внутрішній радіус труби, r_6 – зовнішній радіус труби.

Тепловий розрахунок кабелю базується на вирішенні рівняння теплового балансу: активна потужність втрат, що виділяється в кабелі, переходить у тепло, яке через ізоляцію (I) кабелю, оболонку (O), повітря (II) у трубі і через саму трубу (T) виділяється в навколишній ґрунт (Γ), зустрічаючи на своєму шляху відповідно тепловий опір: $R_I, R_O, R_{II}, R_T, R_\Gamma$ [2].

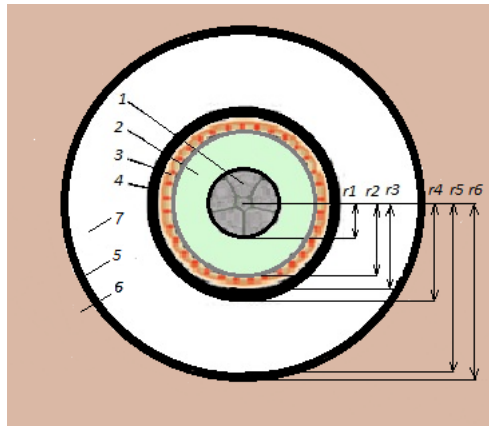


Рисунок 1 – Силовий однофазний кабель в поліетиленовій трубі, що прокладена у ґрунті

При розгляді цього рівняння та його складових вважаємо, що тепло відводиться від кабелю тільки в радіальному напрямі, а відведення тепла вздовж осі кабелю і труби, в який він прокладений, не відбувається.

У трифазних мережах прокладають трифазні групи однофазних кабелів, що для кожної із фаз погіршує умови відведення тепла до ґрунту. Це можна врахувати, вважаючи, що для кожної з фаз тепловий опір ґрунту втричі більше, ніж воно було за наявності лише однієї фази кабелю.

Для ізоляції зі зшитого поліетилену, яка найбільше часто застосовується для сучасних однофазних кабелів 6...500 кВ, у нормальному режимі роботи температура не має перевищувати 90 °С. Прийнявши температуру жили $T_{Ж} = 90$ °С, з рівняння теплового балансу знайдемо тривалий допустимий струм кабелю [4]:

$$I_{Д90} = \sqrt{\frac{T_{Ж} - T_{Г} - P_I \cdot (0,5R_I + R_O + R_B + R_T + 3R_{Г})}{K_{П} R_{Ж} (R_I + R_O + R_B + 3R_{Г}) + R_{Ж} \left(\frac{P_E}{P_{Ж}} \right) \cdot (R_O + R_B + R_T + 3R_{Г})}}$$

де $T_{Г}$ – температура ґрунту; $R_{Ж}$ – активний опір жили; $K_{П}$ – коефіцієнт, що враховує зростання втрат у жилі кабелю з допомогою поверхневого ефекту; P_I – діелектричні втрати в ізоляції кабелю;

$P_E/P_{Ж}$ – відношення, яке характеризує роль «паразитних» втрат в екранах кабелю на фоні втрат у жилах. Відомо, що $P_E/P_{Ж} = 0,1...3,0$ при простому заземленні екранів з двох сторін кабелю та $P_E/P_{Ж} = 0$ при заземленні екранів з одного боку чи їхньої транспозиції.

Із трьох відомих механізмів передачі тепла від кабелю до труби через заповнений повітрям проміжок між ними - теплопровідність, конвекція, випромінювання, в розрахунках враховуємо теплопровідність і конвекцію [3].

Потужність з розрахунку на 1 м довжини, відведена від кабелю до труби за рахунок теплопровідності повітря, що заповнює трубу, дорівнює:

$$\Delta P_{П} = \frac{\Delta T}{R_{П}} = \alpha_{П} \cdot \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)} \Delta T,$$

де $\alpha_{П}$ – питома теплопровідність повітря, Вт/(м·К); ΔT – різниця температур



поверхні кабелю та труби; r_4 – зовнішній радіус кабелю; r_5 – внутрішній радіус труби.

Потужність з розрахунку на 1 м довжини, відведена від кабелю до труби за рахунок конвекції повітря, дорівнює:

$$\Delta P_{ПК} = \alpha_{ПК} \cdot S \cdot \Delta T = \alpha_{ПК} \cdot (2\pi \cdot r_4) \cdot \Delta T,$$

де $\alpha_{ПК}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К); $S = (2\pi \cdot r_4)$ – площа бічної поверхні ділянки кабелю довжиною 1 м.

Як показують розрахунки [4], конвекція – головний механізм передачі тепла від кабелю до труби.

Сумарна передача тепла через повітря між кабелем і трубою представляється як:

$$\Delta P_{П} + \Delta P_{ПК} = \Delta P_{П} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{ПК}}{\Delta P_{П}} \right)$$

Приклад розрахунку.

Розглянемо приклад розрахунку по скоригованій формулі для трифазної групи однофазних кабелів XRUNAКXS-WTC 1x2000RMS в ізоляції з XPLE напругою 110 кВ з мідною жилою 2000 мм² та екраном 150 мм². Прийнято такі дані: $r_1=0.028$ м; $r_2=0.045$ м; ; $r_3=0.048$ м; $r_4=0.053$ м.

$$r_5 = 0,5 \cdot D_T - \frac{D_T}{SDR}, \quad r_6 = 0,5 \cdot D_T,$$

де D_T та SDR – зовнішній діаметр труби та її SDR (Standard Dimension Ratio) – відношення зовнішнього діаметра до товщини стінки. Приймаємо для кабелю класу напругою 110 кВ типове одностороннє заземлення екранів.

Питомий тепловий опір ізоляції взято на рівні $\rho_I = 3,5$ К·м/Вт, оболонки $\rho_O = 3,5$ К·м/Вт. Температура ґрунту $T_G = 15$ °С, глибина закладення кабелю $h = 1,5$ м, труба має типовий для кабельних мереж $SDR=11$. Питомий тепловий опір труби та повітря $\rho_T = 3$ К·м/Вт, $\rho_{П} = 30$ К·м/Вт, коефіцієнт конвекції повітря $\alpha_{П} = 5$ Вт/(м²·К).

В результаті розрахунку визначено значення довготривалого допустимого струму кабелю на рівні 1100 А.

Чисельний розрахунок теплового поля кабелю

Для проведення уточненого розрахунку теплового поля кабельної лінії, який дозволяє враховувати такі фактори як неоднорідність ґрунту, розташування кабелю не в центрі труби, а в її нижній частині тощо, доцільно використовувати чисельний метод. В роботі використовується метод скінчених елементів, реалізований в пакеті програм Comsol.

Результати розрахунку температурного поля в трифазній кабельній лінії зі струмовим навантаженням 1100 А, кабелі якої прокладені безпосередньо в ґрунті наведені на рис. 1. Кабелі розташовані у трикутник, температура навколишнього середовища – 15 °С, а теплопровідність ґрунту прийнята $\lambda = 1/\rho_T = 1$ Вт/(м·К). Результати розрахунку (рис.2, а, б) показали, що максимальна температура при вказаних умовах досягається на жилі верхнього кабелю і дорівнює 46,4 °С.

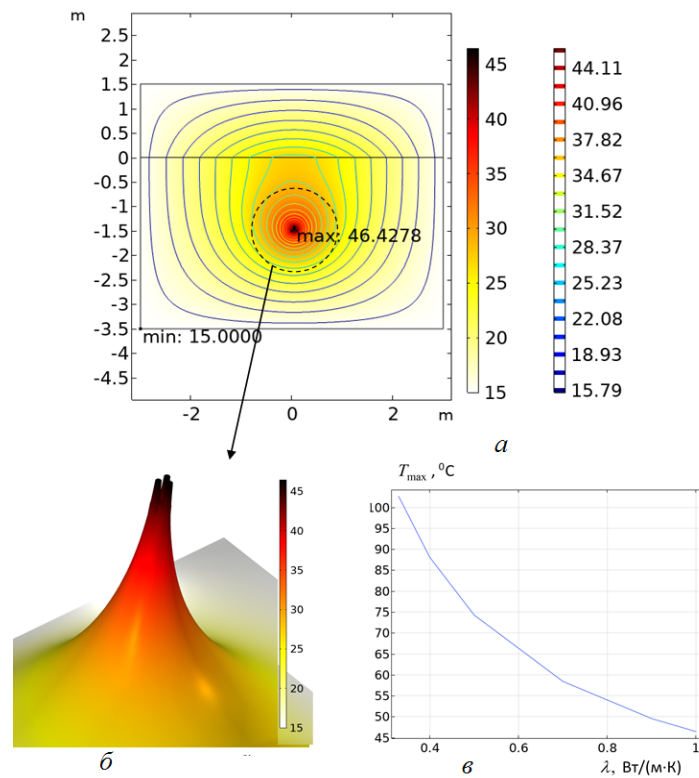


Рисунок 2 – Просторове розподілення температури (°C) в перерізі кабельної лінії: а – при прокладенні трьох однофазних кабелів у ґрунті; б – в збільшеному масштабі; в – залежність максимальної температури кабелю від теплопровідності ґрунту λ

Авторська розробка

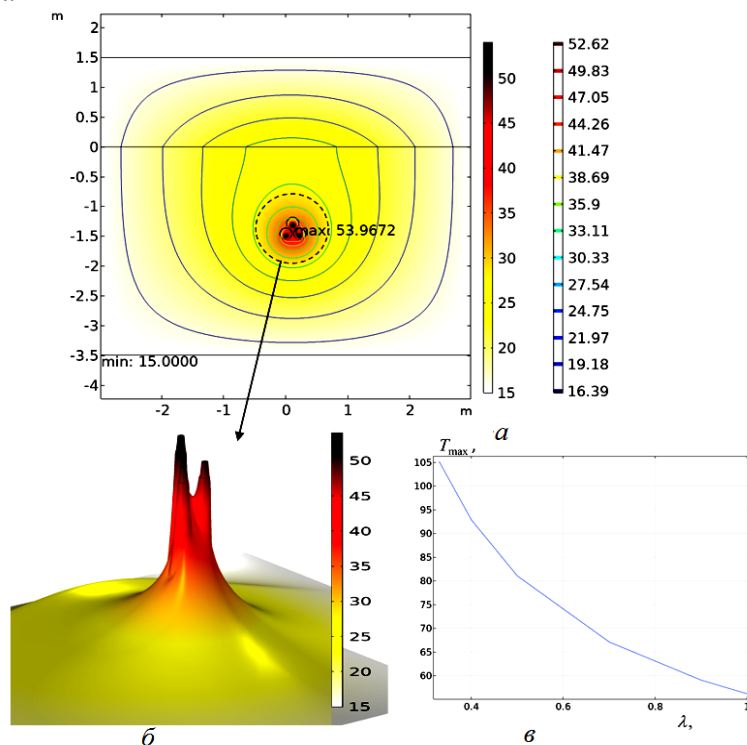


Рисунок 3 – Просторове розподілення температури (°C) в перерізі кабельної лінії: а – при прокладенні трьох однофазних кабелів у ґрунті; б – в збільшеному масштабі; в – залежність максимальної температури кабелю від теплопровідності ґрунту λ

Авторська розробка



Залежність температури від теплопровідності ґрунту λ показана на рис. 2, в. В разі ґрунту із малим значенням $\lambda < 0,4$ це значення може перевищувати допустиме - 90 °С.

Результати розрахунку температурного поля в трифазній кабельній лінії, кабелі якої прокладені в полімерній трубі діаметром 160 мм, наведені на рис.2. Результати розрахунку (рис.3, а, б) показали, що величина максимальної температури верхнього кабелю збільшується до $T_{\max} = 53,9$ °С (при $\lambda = 1$ Вт/(м·К)). Залежність цієї температури від теплопровідності ґрунту λ показана на рис. 3, в. В разі наявності ґрунту із низьким значенням теплопровідності $\lambda < 0,4$ максимальна температура верхнього кабелю може перевищувати – 100 °С.

Висновки.

Розроблено комп'ютерну модель розрахунку теплових процесів підземної кабельної лінії із використанням пакету програм Comsol, яка дозволяє визначити тепловий режим роботи кабелів при наявності таких ускладнюючих факторів, як неоднорідність параметрів ґрунту по висоті, різного розміщення кабелів та наявності поряд паралельних ліній тощо.

На основі проведеного чисельного розрахунку та моделювання теплових процесів в кабельній лінії визначено значення довготривалого допустимого струму кабельної лінії з трифазною групою однофазних кабелів XRUNAKXS-WTC 1x2000RMS в ізоляції з XPLE напругою 110 кВ з мідною жилою 2000 мм² та екраном 150 мм².

Використання методу скінчених елементів, який реалізований в пакеті програм Comsol, дозволило отримати розподіл теплового поля кабельної лінії прокладеної в ґрунті та в полімерній трубі за різного розміщення кабелів фаз відносно один одного.

В результаті досліджень встановлено, що спрощена формула визначення тривало допустимого струму навантаження нормального режиму відповідно до методики СОУ-Н-МЕВ-40.1-37471933-49-2011 дає завищені значення струму. Температура жили кабелю за нормального режиму може перевищувати 100 °С. Тому при визначенні тривало допустимого струму навантаження нормального режиму кабельної лінії необхідно виконувати уточнюючий розрахунок теплового поля кабельної лінії на моделі.

Література:

- 1) Дмитриев М. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Новости электротехники. 2013, № 4, (82), с. 2-6.
- 2) Distributed fiber optic sensing and dynamic rating of power cables by Anders, George J. Cherukupalli. IEEE Press, 2020, 243 pp.
- 3) ГБН В.2.5-00013741-72:2013 Кабельні лінії напругою до 10000 в з використанням гнучких гофрованих двохшарових труб із поліетилену. Київ Міністерство енергетики та вугільної промисловості України 2013, с.24
- 4) ДСТУ Б В.2.5-32:2007 Труби безнапірні з поліпропілену, поліетилену, непластифікованого полівінілхлориду та фасонні вироби до них для зовнішніх мереж каналізації будинків і споруд та кабельної каналізації. Технічні умови.



Київ. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України 2007 с.112

5) СОУ-Н-МЕВ-40.1-37471933-49-2011 Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України с.190

6) Standart IEC 60287-1-1:2001. Electric cables - Calculation of the current rating. Part 1-1. Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses general

7) Standart IEC 60287-2-1:2001. Electric cables – Calculation of the current rating. Part 2-1. Thermal resistance – calculation of thermal resistance.

8) Уїді Б. Кабельні лінії високої напруги / Уїді Б. -М.: Енергоатоміздат, 1983.-232с.

9) Біткін С. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ / Біткін С., Бовкун Я., Болдирєв О., -Київ: Міненерговугілля, 2011. –190с.

Abstract. *The article is devoted to the study of thermal calculation of high - voltage AC cable lines laid in polymer pipes. Laying cable routes in polymer pipes is a modern high-tech method of building electrical networks, which has advantages over laying high-voltage cables in the open ground or in reinforced concrete channels. This method is characterized by low-volume earthworks in urban areas and short construction times. The generalized formalization of throughput of high-voltage cables with cross-linked polyethylene insulation is offered. In particular, it is shown that in the nominal mode of operation at a cable core temperature of 90 ° C, which is acceptable for cross-linked polyethylene insulation, the cable sheath temperature can reach 75... 85 ° C and therefore polymer pipes for cold water can not be used in cable construction. Cold water supply pipes for laying cables in them are made of low pressure polyethylene and are designed for a temperature not exceeding 40 ° C. The analysis of methods of laying cable lines with cross-linked polyethylene insulation is performed. Emphasis is placed on the main problematic issues of thermal calculation of cable networks. The simulation performed in the COMSOL software environment confirmed the conclusions that the specific value of the cable sheath temperature depends on the cable laying conditions, but averages about 50 ° C. It is established that under some conditions laying of a cable network in a pipe does not reduce admissible current of a cable line, and on the contrary, increases it. Aspects of increase of efficiency of laying of three-phase groups of single-phase cables are formulated. A method for estimating thermal calculations of cable lines with single-phase cables is proposed, which takes into account two mechanisms of heat transfer: due to thermal conductivity and due to convection. An example of thermal calculation of high-voltage cable line according to the adjusted formula for three-phase group of single-phase cables XRУHAKXS-WTC 1x2000RMS in insulation with XPLE voltage 110 kV with copper core cross section 2000 mm² and screen 150 mm² is considered.*

Keywords: *thermal calculation, cable line, insulation, current.*

*Науковий керівник: д.т.н., проф. Кирик В.В.
д.т.н., проф. Подольцев О.Д.*

Стаття відправлена: 20.12.2021 р.
© Рибка О.О.