

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ**

**ХАРАКТЕРИСТИК ПІДЗЕМНИХ**

**КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ЕТмз-61

спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка

та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Федірко Ю. А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Наконечний М. С.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Вакуленко О. О.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М. Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Габрусев Г.В.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)                      \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)  
«    »                      20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Федіркові Юрію Андрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання електричних та теплових характеристик підземних кабельних ліній електропередач

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «1» вересня 2020 року № 4/7-619

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2020 року

3. Вихідні дані до роботи Струмове навантаження кабельних ліній електропередач

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Розрахунково-дослідницький розділ

3 Проектно-конструкторський розділ

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1 Моделювання електричних та теплових характеристик підземних кабельних ліній електропередач

2 Розрахунок заземлення екранів

3 Електричний та тепловий розрахунок

4 Температурний розрахунок в колекторі

5 Розрахунок струмового навантаження

6 Загальні висновки



## РЕФЕРАТ

Федірко Ю. А. Моделювання електричних та теплових характеристик підземних кабельних ліній електропередач 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕмз-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2020

Стор. - 65; рис. - 30; табл. - 2; плакатів - 6; джерел – 26.

У роботі розроблено математичну модель для розрахунку електромагнітних та температурних характеристик кабельних ліній електропередачі. Розроблена модель дає можливість оцінити їх навантажувальну здатність при різних варіантах укладання в траншею, враховуючи залежність їх параметрів від температури.

**Ключові слова:** математична модель, кабельна лінія електропередачі, температура, потужність, електричні втрати, кабелі з зшитого поліетилену.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	9
1.1 Загальні положення і стан проблеми прокладання силових кабелі.....	9
1.2 Теплофізичні характеристики матеріалів.....	13
1.3 Електричні характеристики кабелів.....	15
1.4 Джерела втрат енергії в кабельних лініях .....	17
1.5 Висновки до розділу. ....	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	20
2.1 Розрахунок параметрів кабелю.....	20
2.2 Двостороннє заземлення екранів.....	24
2.3 Одностороннє заземлення екранів .....	26
2.4 Транспозиція екранів .....	31
2.5 Висновки до розділу .....	34
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	35
3.1 Постановка задачі для розрахунку навантажувальної здатності кабельних ліній .....	35
3.2 Математична модель електромагнітних процесів .....	37
3.3 Розрахунок електромагнітних характеристик.....	39
3.4 Математична модель теплових процесів в підземних кабельних лініях .....	41
3.5 Чисельне дослідження впливу різних умов теплообміну на температурне поле в кабельному каналі .....	43
3.6 Дослідження температурного поля в кабельному колекторі .....	48
3.7 Висновки до розділу .....	55

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	56
4.1 Заходи електробезпеки при роботі з електрообладнанням. ....	56
4.2 Норми проектування інженерно-технічних об'єктів господарювання.	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	63

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Розвиток економічного потенціалу країни вимагає активної модернізації і будівництва нових магістральних і розподільних мереж, основу яких складають повітряні лінії електропередачі і високовольтні кабельні лінії. Будівництво нових ліній електропередач пов'язано зі збільшенням площ, які займають електричні мережі. Дана проблема стає критичною через зростання вартості землі, значних обмежень при прокладанні повітряних ліній в районах житлової забудови, в заповідниках і природних парках. Створення електромережних об'єктів пов'язано з відчуженням земель і виведенням їх з сільськогосподарського обороту або зон під міське будівництво. Особливо гостро ця проблема стоїть у великих містах.

Одним з варіантів розв'язання проблеми є використання в магістральних і розподільних мережах кабельних ліній, із застосуванням сучасних високовольтних силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену. Прокладання таких кабелів здійснюється різними способами, але для територій з щільною інфраструктурою в обмежених міських умовах, найчастіше, єдиною альтернативою передачі великих потужностей електричної енергії є лінії, прокладені в підземному каналі. Однак при розподілі електричної енергії в більшості випадків внутрішній простір підземних мереж використовується неефективно і в ряді випадків не відповідає правилам безпеки при експлуатації.

У зв'язку з цим, практичний інтерес представляють собою завдання підвищення енергоефективності існуючих і проєктованих систем передачі електричної енергії з урахуванням безпечних умов експлуатації.

Величина номінальної струмового навантаження силових кабелів в кожному конкретному випадку залежить від ряду факторів: геометричних параметрів кабельних ліній і підземного каналу, теплофізичних характеристик

конструктивних елементів кабелів і навколишнього середовища, умов теплообміну, індукованих струмів в металевих екранах кабелів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка нестационарних математичних моделей процесів теплообміну, електро - магнітодинаміки, що протікають в кабельних каналах, для визначення раціональної величини струмового навантаження і забезпечення безпечної експлуатації силових кабелів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробка теоретичних положень щодо розрахунку перерізу струмопровідної жили з урахуванням режиму роботи екрану і створення методики вибору енергоефективної системи заземлення екранів одножильних кабелів
2. Розроблена математична модель для дослідження електричних та температурних характеристик кабельних ліній, що дозволило визначити їх навантажувальну здатність.
3. Оцінка впливу залежності теплофізичних характеристик ізоляційних матеріалів, що застосовуються при виробництві кабелів, на результати розрахунку електричного навантаження на високовольтних кабелів.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні та температурні процеси в кабельних лініях, зумовлені особливостями їх будови та матеріалами виготовлення.

**Предмет дослідження** – високовольтні кабельні лінії.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в можливості впровадження запропонованої в роботі математичної моделі, процедури визначення навантажувальної здатності кабельних ліній, яка підтверджена в роботі результатами моделювання.



**Практичне значення отриманих результатів** Практична цінність роботи полягає в можливості для підприємств енергопостачання, які розподіляють електричну енергію для оцінки пропускної здатності кабельних ліній, в залежності від реальних потреб.

**Апробація результатів магістерської роботи.**

Основні положення роботи і її результати доповідалися на ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 25-26 листопада 2020 (Тернопіль 2020 р.)

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «підходи щодо забезпечення оптимального способу укладання кабелів ліній електропередачі». Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 25–26 листопада. 2020.) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль: ТНТУ, 2017. – , Т 2, С. 132.

**Структура роботи.**

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (30 найменування).

Загальний обсяг текстової частини: 65 сторінки, 2 таблиці, 30 рисунків.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Загальні положення і стан проблеми прокладання силових кабелів

Кабельні лінії з силовими кабелями з ізоляцією із зшитого поліетилену знаходять широке застосування в електричних мережах всіх класів напруги[1-2]. Монтаж силових кабелів може здійснюватися на повітрі, або в землі.

Прокладання кабелів у землі має ряд переваг. На відміну від повітряних ліній, монтаж силового кабелю в землі не піддається несприятливим факторам кліматичних змін, таких як рясні снігопади, штормові вітри. Кабельні лінії в меншій мірі, ніж повітряні, схильні до небезпечним електромагнітних впливів, спричинених різними лініями електропередачі та контактними мережами електричних залізниць.

Але при прокладанні і експлуатації кабельних ліній під землею виникають такі проблеми, як неефективне використання простору кабельних споруд, необхідність визначення відпрацьованого ресурсу кабелів з урахуванням дії експлуатаційних факторів. Ресурс кабельних ліній згідно [3-5] визначається тепловими режимами їх роботи. Теплові режими роботи залежать від таких факторів, як конструкційне виконання кабельних ліній і кабельних споруд, умов теплообміну, теплофізичних характеристик використаних матеріалів, а також від значення номінального струму. На довговічність і надійність кабельної лінії впливає також спосіб прокладки кабелю під землею, що визначається проектом кабельної лінії.

Способи прокладки кабельних ліній під землею вибирають в залежності від величини і розміщення електричних навантажень, щільності забудови, компонування електротехнічних приміщень, наявності технологічних та транспортних комунікацій, параметрів і розташування джерел живлення,

наявності ґрунтових вод, ступеня агресивності ґрунтів, забруднення навколишнього середовища [6].

При монтажі кабельних ліній під землею використовують траншеї і кабельні споруди, такі як колектори, тунелі, канали та ін. Одним з поширених і простих способів прокладання кабельної лінії є прокладка в траншеї. На рис. 1.1 представлений приклад конструкції траншеї для прокладки силового кабелю.

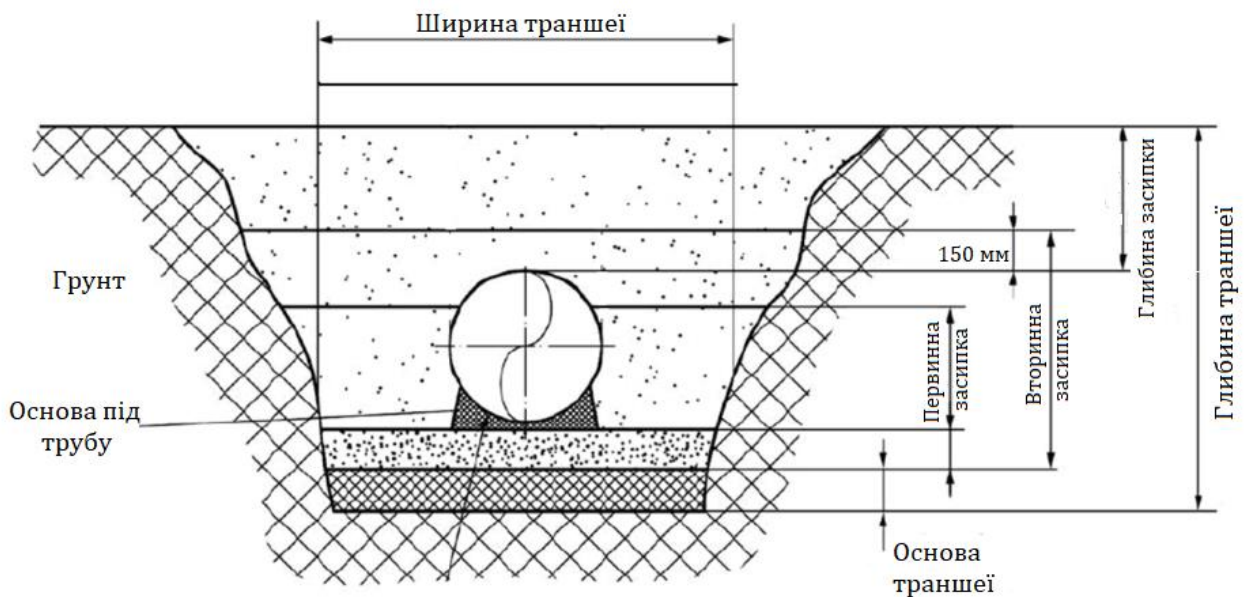


Рисунок 1.1. – Конструкція траншеї для прокладки силового кабелю

Для силових кабелів напругою до 20 кВ глибина залягання кабельної лінії від поверхні землі повинна бути не менше 0,7 м, а для силових кабелів напругою понад 20 кВ глибина вже повинна становити не менше 1 м [7].

При експлуатації кабельних ліній, прокладених у траншеї, відбувається значне число відмов - повне припинення подачі електричної енергії по лінії. Можливі причини: механічні пошкодження, корозія, опади, зсуви та інші деформації ґрунту. Тому прокладку кабелів в траншеях, незважаючи на найнижчу вартість споруди, застосовують рідко.

У міських умовах для прокладки міських комунікацій часто використовують кабельні споруди.

Для спільної прокладки і експлуатації різних підземних комунікацій, таких як кабелі зв'язку, силові кабелі, водопроводи, теплопроводи, повітроводи, труби міської каналізації та ін. використовуються колектори (рис.1.2).

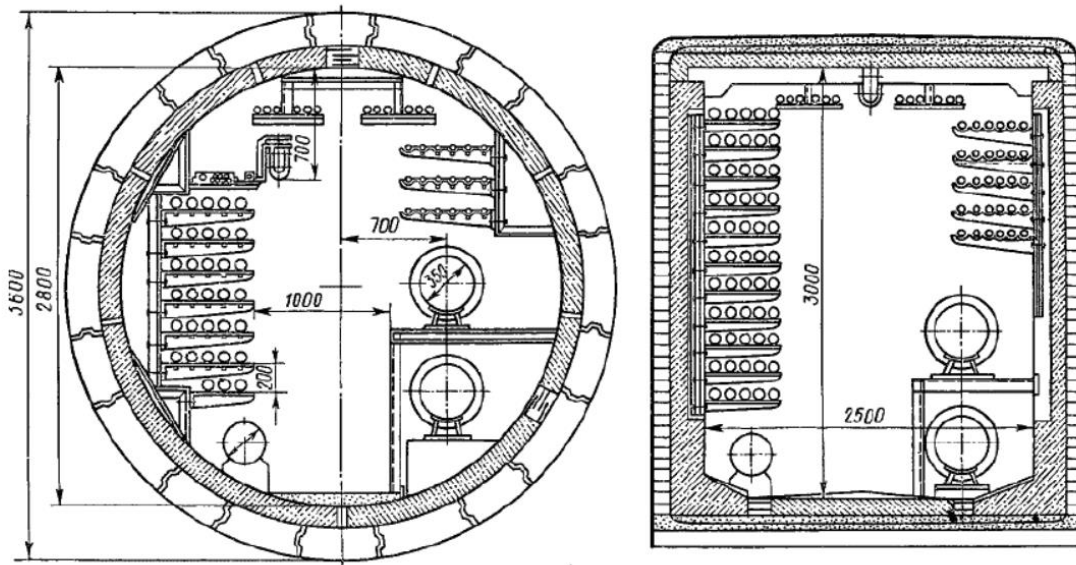


Рисунок 1.2 – Конструкції колекторів для прокладки підземних комунікацій

Колектори являють собою підземні тунелі, які мають круглу або прямокутну форму. При проектуванні колектора прямокутної форми використовуються готові залізобетонні блоки, а для круглої форми - збірні секційні елементи.

У міських умовах на площах міста колектори споруджують на великих глибинах і зазвичай вони мають круглий переріз. Розміри колектора визначають залежно від числа і виду розміщених в ньому комунікацій [8].

До кабельних спорудах відносяться кабельні тунелі і кабельні канали. При використанні кабельного тунелю прокладка силових кабелів, ремонти та огляди кабельних ліній виробляються з вільним проходом по всій довжині. Кабельний тунель являє собою закрите підземне спорудження з розташованими в ньому опорними конструкціями для розміщення на них кабелів і кабельних муфт (рис.1.3). Кабельний тунель споруджують із збірних залізобетонних елементів.

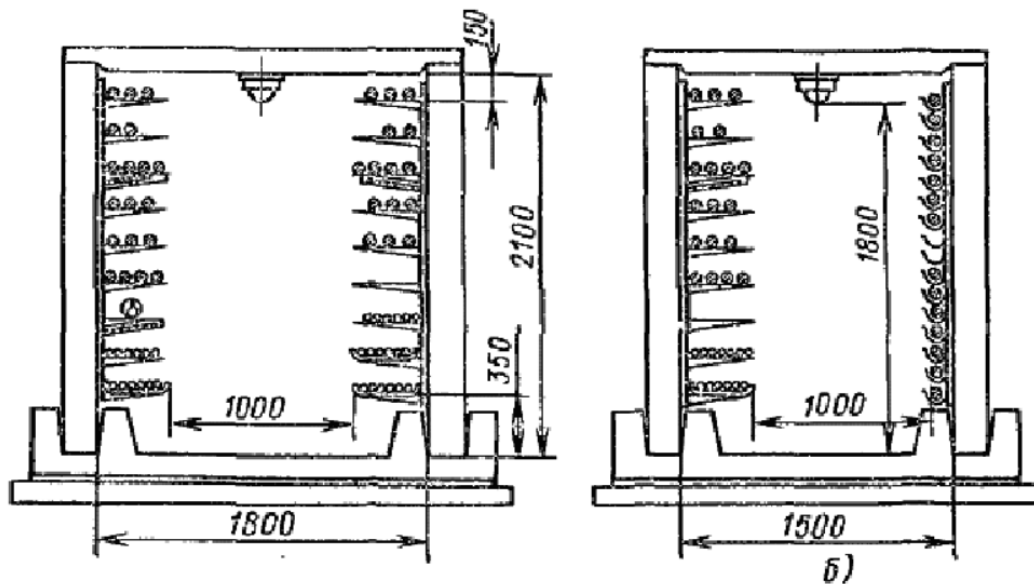


Рисунок 1.3 – Конструкція кабельного тунелю

Кабельний канал, як і кабельний тунель, споруджують із збірних залізобетонних елементів, або монолітного залізобетону, який являє собою закриту в ґрунті непрохідну споруду, призначену для розміщення силових кабелів. Укладання, ремонт та огляд кабельних ліній проводиться тільки при знятому перекритті.

Прокладка кабелів у тунелях, каналах і колекторах вважається найбільш надійною системою підземної каналізації. Такий вид прокладки доцільний тільки при великому числі кабельних ліній, що прокладаються в одному напрямку через значну вартості споруд у порівнянні з прокладкою в траншеях.

Однак цей спосіб дозволяє прокласти новий або замінити діючий кабель без земляних робіт, забезпечує можливість оглядів і ремонту ліній в процесі експлуатації, а також надійний захист кабелів від механічних пошкоджень.

Від вибору конструкційного виконання кабельної споруди, кількості кабельних ліній в ньому, умов експлуатації залежать теплові режими роботи силових кабелів, які в свою чергу будуть впливати на пропускну здатність всіх кабельних ліній.

## **1.2. Теплофізичні характеристики матеріалів**

Математичне моделювання та аналіз температурних полів в кабельному каналі не можливе без визначення теплофізичних характеристик елементів конструкції кабелю.

На сьогоднішній день найбільш повно досліджені теплофізичні властивості провідникових матеріалів, що використовуються для струмопровідних жил, металевих екранів кабелів. Необхідні відомості містяться в довідкових матеріалах [10].

В якості ізоляційного матеріалу в роботі розглянуто зшитий поліетилен, який є високомолекулярним термопластичним поліолефіном, та володіє рядом властивостей - винятковими діелектричними властивостями, високою міцністю, стійкістю до дії агресивних середовищ [11]. Поліетилен не вбирає воду і не пропускає її.

Для полімерів характерна сильна температурна залежність властивостей навіть в невеликих температурних діапазонах.

Слід зазначити, що в доступній літературі мало представлено інформації про температурні залежності теплофізичних властивостей зшитого поліетилену.

Робота [12] присвячена аналізу залежностей питомого теплового опору і питомої теплоємності від температури для зшитого поліетилену. Стверджується, що ця залежність істотна і обов'язково повинна бути врахована в розрахунках теплових процесів в кабелів. Наводяться експериментальні графіки цих залежностей.

На рис. 1.5 - 1.7 представлені залежності коефіцієнта теплопровідності, питомої теплоємності і густини для поліетилену високої щільності (ПВШ) і поліетилену низької густини (ПНГ) [13-15].

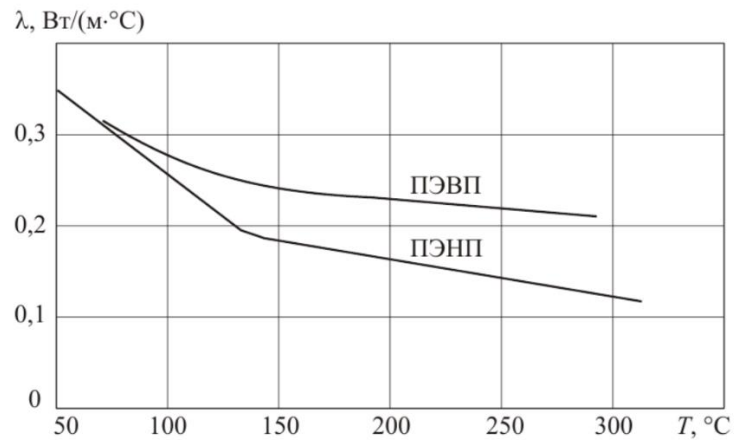


Рисунок 1.5 – Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури

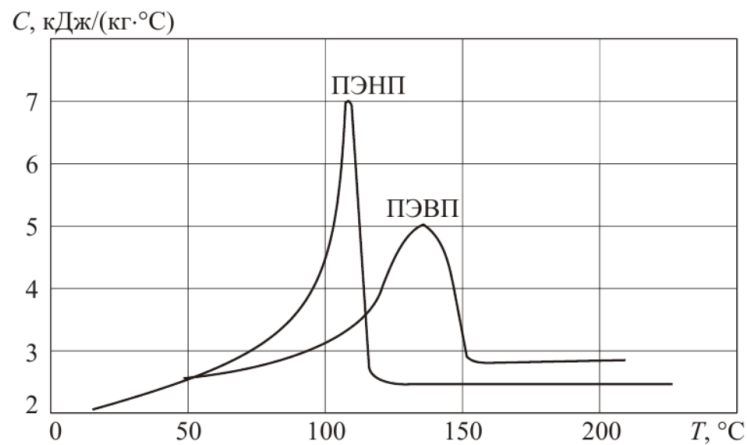


Рисунок 1.6 – Залежність питомої теплоємності від температури

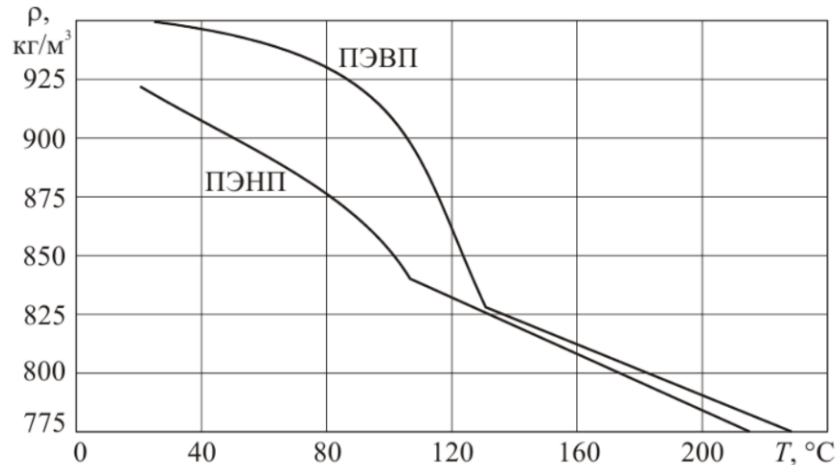


Рисунок 1.7 – Залежність щільності від температури

З представлених залежностей видно, що навіть для ізолюючих матеріалів, що мають однакову полімерну основу, теплофізичні параметри можуть значно відрізнятися, в діапазоні температур 20 - 90 °С. Очевидно, що результати розрахунків температурного поля в кабельному каналі, температура ізоляції і величина допустимого струмового навантаження силових кабелів істотно залежатимуть від заданих величин характеристик досліджуваних матеріалів.

Таким чином, для розробки повної математичної моделі досліджуваних процесів необхідне знання залежностей теплофізичних характеристик ізоляційних матеріалів силового кабелю від температури.

### 1.3. Електричні характеристики кабелів.

При проектуванні, виготовленні, випробуваннях, монтажі та подальшої експлуатації силових кабелів слід враховувати їх характеристики [16].

З урахуванням впливу температури електричний опір можна визначити за формулою:

$$R = R(1 + aT) \quad (1.1)$$



в перерахунку на довжину 1 км і перетин 1 мм<sup>2</sup>, де  $\alpha$  - температурний коефіцієнт питомого опору при температурі 20°C.

Значенням опору ізоляції встановлюються правильність процесу сушіння і просочення паперової ізоляції, а також ступінь її вологості.

Вимірювання опору ізоляції кабелю - обов'язковий етап при пуско-налагодженні змонтованої кабельної лінії. Опір ізоляції кабелю являє собою частку від ділення прикладеної постійної напруги  $U$  на струм, що проходить через хвилину після включення напруги:

$$R_{iz} = \frac{U}{I_{\min}} \quad (1.2)$$

Кабель вважається таким, що витримав випробування, якщо не відбулося пробою, не було ковзають розрядів і поштовхів струму, витоку його наростання після того, як він досяг сталого значення.

Значення ємності не регламентується стандартами, але величина ємнісного струму необхідна для правильного налаштування пристроїв мережі.

Значення ємнісного струму знаходиться за емпіричною формулою,

$$I_c = 0.1 \cdot U \cdot l \quad (1.3)$$

де напруга  $U$  задається в кіловольт, а довжина  $l$  - в кілометрах.

Надійність роботи ізоляції кабелю при експлуатації визначається її електричної міцність і відповідність прийнятого значення напруженості електричного поля максимально допустимої її величині. Напруженість електричного поля  $E$  в будь-якій точці ізоляції, розташованої на відстані  $r_x$  від осі жили, що знаходиться під напругою  $U$  визначається рівнянням,

$$E = \frac{U}{r_x \ln \frac{R}{r}} \quad (1.4)$$

де,  $U$  - робоча напруга між жилою і металевією оболонкою кабелю, кВ;

$R$  - зовнішній радіус ізоляції, мм;

$r$  - внутрішній радіус ізоляції, мм.

Для вирівнювання електричного поля і кращого застосування ізоляційного матеріалу ізоляційний шар з більшою діелектричної проникністю розташовують ближче до жили, так як значення максимальних напруженостей електричного поля в різних шарах ізоляції обернено пропорційно їх діелектричної проникності.

#### **1.4 Джерела втрат енергії в кабельних лініях**

При передачі електричної енергії в кожному елементі електричної мережі виникають втрати. Для вивчення складових втрат у різних елементах мережі та оцінки необхідності проведення того чи іншого заходу, спрямованого на зниження втрат, виконується аналіз структури втрат електроенергії[20]. Фактичні (звітні) втрати електроенергії визначають як різницю електроенергії, що надійшла в мережу, і електроенергії, відпущеної з мережі споживачам. Ці втрати включають в себе складові різної природи: втрати в елементах мережі, що мають чисто фізичний характер, витрата електроємкого обладнання, встановленого на підстанціях і забезпечує передачу електроенергії, похибки фіксації електроенергії приладами її обліку і, нарешті, розкрадання електроенергії, несплату або неповну оплату показань лічильників і т.п. Поділ втрат на складові може проводитися за різними критеріями: характером втрат (постійні, змінні), класами напруги, групами елементів, виробничим підрозділами і т.д. Враховуючи фізичну природу і специфіку методів визначення кількісних значень фактичних втрат, вони можуть бути розділені на чотири складові:

1) технічні втрати електроенергії, зумовлені фізичними процесами в проводах і електрообладнанні, що відбуваються при передачі електроенергії по електричних мережах;

2) витрата електроенергії на власні потреби підстанцій, необхідний для забезпечення роботи технологічного обладнання підстанцій та життєдіяльності обслуговуючого персоналу, який визначається за показаннями лічильників, встановлених на трансформаторах власних потреб підстанцій;

3) втрати електроенергії, зумовлені інструментальними похибками їх вимірювання (інструментальні втрати);

4) комерційні втрати, зумовлені розкраданнями електроенергії, невідповідністю показань лічильників оплаті за електроенергію побутовими споживачами та іншими причинами в сфері організації контролю за споживанням енергії.

Три перші складові структури втрат обумовлені технологічними потребами процесу передачі електроенергії по мережах і інструментального обліку її надходження та відпуску. Сума цих складових добре описується терміном технологічні втрати. Четверта складова -комерційні втрат представляє собою вплив "людського фактора" і включає в себе всі його прояви: свідомі розкрадання електроенергії деякими абонентами за допомогою зміни показань лічильників, несплату або неповну оплату показань лічильників і т.п. В роботі будуть розглядатися технічні втрати електроенергії, а саме втрати в елементах кабелю.

### **1.5 Висновки до розділу.**

1. Показано, що для зменшення втрат електроенергії в кабельних лініях електропередачі, можна досягнути шляхом, прокладання більш досконалі сучасні кабелі, які за рахунок вдалих конструктивних рішень, забезпечують менший рівень втрат енергії.

2. Класичні методики розрахунку втрат енергії в розподільних мережах не враховують конструктивні особливості (тип ізоляції, захист від впливу

навколишнього середовища) та способи розташування жил при прокладанні кабелю. Вони враховують лише основні параметри: матеріал жили, напругу мережі, протяжність лінії, потужність споживача. Встановлення та оцінка ступеня впливу цих факторів дозволяє виявити причини нераціонального використання енергії та запропонувати шляхи підвищення енергоефективності системи в цілому.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Розрахунок параметрів кабелю

#### Equation Section (Next)

Значення параметрів кабелю проводяться для розрахунку струмів і напруг в кабельній лінії. Введемо основні позначення конструкції кабелю і кабельних ліній. Розглянемо одножильний кабель (рис. 2.1).

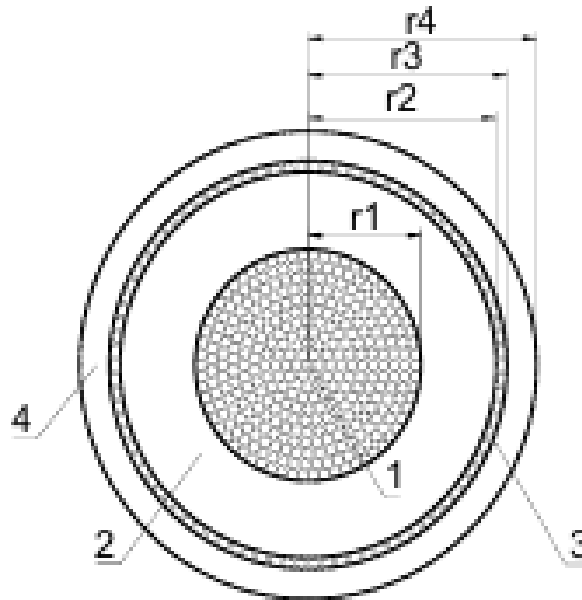


Рисунок 2.1 – Ескіз перетину кабелю з ізоляцією із зшитого поліетилену: 1 - струмопровідна жила, 2 - ізоляція, 3 - екран кабелю, 4 - оболонка

Для подальшого розрахунку скористаємося наступними позначеннями радіусу жили -  $r_1$  , діаметра -  $d_{жс}$  . Для екрану внутрішній радіус позначимо  $r_2$  , зовнішній -  $r_3$  , а діаметр екрану -  $d_e$  . зовнішній радіус кабелю -  $r_4$  , зовнішній діаметр кабелю -  $D$  .

Розглянемо розташування трифазної групи одножильних кабелів (рисунок 2.2) при прокладці кабельних ліній.

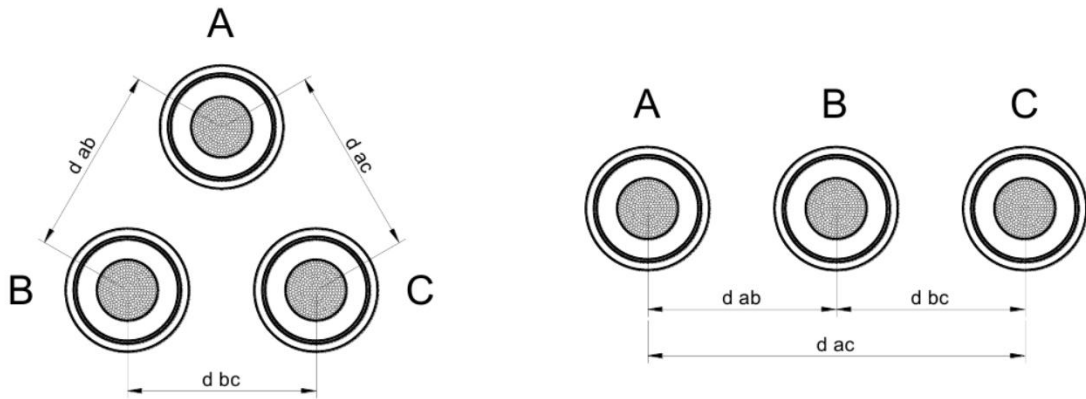


Рисунок 2.2 – Способи прокладання кабелю: трикутником – зліва, в площині - справа

Для позначення середнього геометричної відстані між фазами введемо параметр  $s$ .

При прокладанні трикутником відстань між кожною парою фаз однакова і дорівнює зовнішньому діаметру кабелю:

$$s = d_{ab} = d_{bc} = d_{ac} = D, \quad (2.1)$$

де  $d_{ij}$  - відстань між осями  $i$  і  $j$  фазних кабелів,

$D$  - зовнішній діаметр кабелю.

При прокладанні в площині відстань між крайніми кабелями в два рази більша, ніж між крайнім і центральним, тому середня відстань визначається як:

$$s = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{bc} \cdot d_{ac}} = \sqrt[3]{2d_{ab}^3} = 1.26d_{ab}. \quad (2.2)$$

Розглянемо схему протікання струму по кабельних лініях. У мережах на напругу 6-500 кВ застосовуються схеми з глухозаземленою, ізольованою і резистивної-заземленою нейтраллю, в якій роль нейтрального проводу грає земля. Струм в землі зазвичай враховують струмами в трьох фіктивних проводах,

осі яких знаходяться на відстані  $D_3$  від осей фазних провідників. Це відстань називають еквівалентною глибиною протікання зворотного струму, вона залежить від частоти змінного струму і питомої провідності ґрунту:

$$D_3 = 2.24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \mu_0}} D_3, \quad (2.3)$$

де  $\rho_3$  - питома провідність ґрунту.

Дане поняття взято з теорії повітряних ліній, що застосовуються в основному за межами забудованих територій. По всій довжині траси повітряної лінії практично не зустрічаються природні заземлювачі, тому еквівалентна глибина протікання зворотного струму визначається лише властивостями ґрунту.

Кабельні лінії прокладаються в містах на забудованій території з великою кількістю природних заземлювачів. на територіях електромережних об'єктів влаштовані штучні контури заземлення, тому еквівалентну глибину протікання зворотного струму приймають рівною глибині залягання контуру заземлення. До того ж довжини повітряних ліній набагато перевершують кабельні, і нехтувати кінцевими ефектами при розрахунку  $D_3$  не зовсім правильно.

Для вирішення системи рівнянь (2.3) необхідно визначити погонні параметри кабелів. Якщо прийняти що параметри не залежать від частоти і взаємо впливають один на одного, а відстанями всередині кабелю по відношенню до міжкабельних при розгляді їх розташування в трифазній системі можна знехтувати, то математична модель розрахунку опорів матиме вигляд.

Опір жили складається з активного опору жили, індуктивного опору жили, активного опору землі.

$$\dot{Z}_{жс} = R_3 + R_{жс} + j\omega L_{жс}, \quad (2.4)$$

де,  $R_3$  - активний опір землі,

$R_{жс}$  - активний опір жили,

$L_{жс}$  - індуктивність жили,

$$R_3 = (\pi / 4) \mu_0 f, \quad (2.5)$$

$$R_{жс} = \rho_{жс} / F_{жс}. \quad (2.6)$$

Індуктивність жили визначається по формулі:

$$L_{жс} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{D_3}{r_1} \right), \quad (2.7)$$

де ближньою стороною контуру є поверхню жили, що знаходиться на відстані  $r_1$ , а дальній - фіктивний провідник на відстані  $D_3$ .

Опір екрану складається з активного опору екрану, індуктивного опору екрану, активного опору землі.

$$\dot{Z}_e = R_3 + R_e + j\omega L_e, \quad (2.8)$$

де  $R_e$  - активний опір екрану,

$L_e$  - індуктивність екрану.

$$R_e = \rho_e / F_e. \quad (2.9)$$

Індуктивність екрану визначається з

$$L_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{D_3}{r_2} \right), \quad (2.10)$$

де ближній стороною контуру є поверхня екрану, що знаходиться на відстані  $r_2$ , а дальній - фіктивний провідник на відстані  $D_3$ .

Взаємний опір між житловою і екраном кабелю пояснюється впливом протікання струму в сусідньому контурі кабелю: для жили в екранному, а для екранного - в жилі. Він складається з активного опору землі і взаємного індуктивного опору між житловою і екраном в кабелі.

$$\dot{Z}_{жсе} = R_3 + j\omega M_{жсе}, \quad (2.11)$$

де  $M_{жсе}$  - взаємна індуктивність жили і екрану кабелю.



Взаємна індуктивність між кабелями визначається з

$$M_k = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{s}\right), \quad (2.12)$$

де ближній стороною контуру є поверхню жили (екрану) сусіднього кабелю, що знаходиться на відстані  $s$ , а дальній - фіктивний провідник на відстані  $D_3$ .

## 2.2 Двостороннє заземлення екранів

Згідно з вимогами [12] металеві оболонки кабелів повинні бути заземлені з двох сторін (рис.2.3) кабельної лінії.

В конструкції кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену металевий екран є контуром заземлення для відводу струмів короткого замикання з струмопровідної жили в заземлюючих пристроїв, приєднання до якого простіше виконати на кінцях лінії.

Виконання двостороннього заземлення не вимагає великих трудовитрат, монтаж полягає лише у виводі екрану кабелю перед кінцевою муфтою і приєднання його до існуючого контуру заземлення.

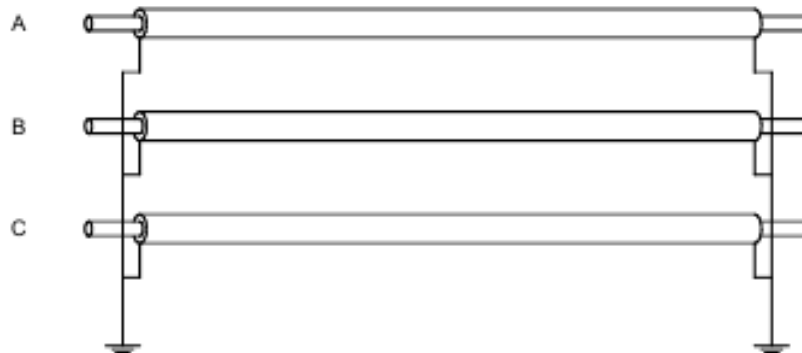


Рисунок. 2.3 – Схема двостороннього заземлення екранів

При такій схемі з'єднання екрани всіх кабелів мають потенціал землі, але в їх замкнутих контурах починають протікати струми, що викликають додаткові втрати потужності і погіршують температурний режим кабелю, що негативно впливає на його пропускну здатність і термін служби.

При заземленні екранів кабелів з двох сторін умова схеми з'єднання:

$$\Delta \dot{U}_{eA} = \Delta \dot{U}_{eB} = \Delta \dot{U}_{eC} = 0. \quad (2.13)$$

Опір прямої послідовності трифазної групи однофазних кабелів:

$$\dot{Z}_1 = (\dot{Z}_{жк} - \dot{Z}_{к}) - \frac{(\dot{Z}_{жкe} - \dot{Z}_{к})^2}{\dot{Z}_{e} - \dot{Z}_{к}}. \quad (2.14)$$

Опір нульової послідовності трифазної групи однофазних кабелів:

$$\dot{Z}_0 = (\dot{Z}_{жк} + 2\dot{Z}_{к}) - \frac{(\dot{Z}_{жкe} + 2\dot{Z}_{к})^2}{\dot{Z}_{e} + 2\dot{Z}_{к}}. \quad (2.15)$$

Враховуючи (2.14) при вирішенні системи рівнянь (2.12), отримаємо струми в екранах кабелів в нормальному режимі:

$$\dot{I}_{eA} = -\frac{\dot{Z}_{жкe} - \dot{Z}_{к}}{\dot{Z}_{e} - \dot{Z}_{к}} \dot{I}_{жкA}, \quad (2.16)$$

$$\dot{I}_{eB} = -\frac{\dot{Z}_{жкe} - \dot{Z}_{к}}{\dot{Z}_{e} - \dot{Z}_{к}} \dot{I}_{жкB}, \quad (2.17)$$

$$\dot{I}_{eC} = -\frac{\dot{Z}_{жкe} - \dot{Z}_{к}}{\dot{Z}_{e} - \dot{Z}_{к}} \dot{I}_{жкC}. \quad (2.18)$$

Таким чином, враховуючи (2.16), (2.17) і (2.18) отримаємо:

$$I_e = -\frac{I_{жк}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_e}{X}\right)^2}}, \quad (2.19)$$

$$\text{де, } X = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{d_e}\right).$$

Вираз (2.19) визначає величину струму в екрані системи з двостороннім заземленням екранів, яка залежить від:

- струму в жилі  $I_{ж}$ ,
- активного опору екрану  $R_e$  (тобто від матеріалу і перерізу екрану  $F_e$ ),
- діаметра кабелю по екрану  $d_e$ ,
- відстані між фазними кабелями  $s$

Частка струму в екрані від струму в жилі становить:

$$\frac{I_e}{I_{ж}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_e}{X}\right)^2}}. \quad (2.20)$$

Перевагами двостороннього заземлення екранів є відсутність напруги на екрані, простота монтажу, низька вартість виконання. До недоліків системи необхідно віднести протікання струмів в екранах, що є додатковим джерелом тепловиділення, додаткові втрати потужності, скорочення терміну служби кабелів.

### 2.3 Одностороннє заземлення екранів

При заземленні екранів на одному кінці кабельної лінії металеві екрани трьох фаз з'єднуються між собою і заземлені на загальному пристрої з нормованим опором. При односторонньому заземленні екрану шлях для протікання в ньому поздовжніх струмів розірваний. Відносно невеликі втрати в екрані обумовлені лише вихровими струмами, які не визначають тепловий режим експлуатації кабелю.

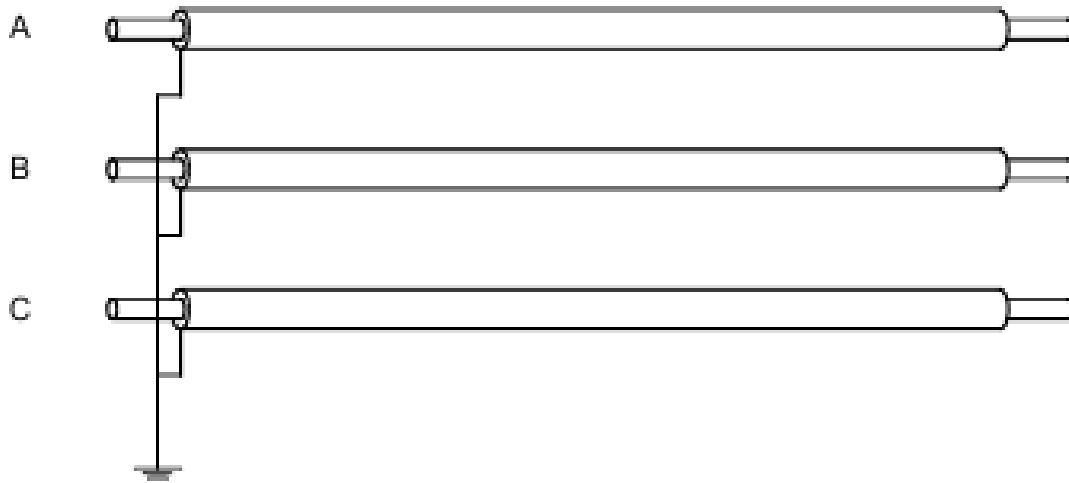


Рисунок 2.4 – Схема однобічного заземлення екранів

Однак при такому режимі експлуатації екранів необхідно врахувати наступні фактори:

1. Поява небезпечних для захисної оболонки імпульсних перенапруг, величина яких може перевищити електричну міцність ізоляційної оболонки, що, може привести до проникнення в ізоляційну конструкцію кабелю вологи (при підземному прокладанні та застосуванні кабелю без герметизації).

2. Встановлення додаткового обладнання: кінцевих муфт з ізольованими екранами, захисних апаратів на незаземлені кінці екрану. Вимагає певних додаткових витрат при будівництві системи заземлення екранів.

3. Наведений потенціал на незаземлені кінці екрану, величина якого пропорційна робочому струму в жилі та довжині кабелю, може бути небезпечний для обслуговуючого ремонтного персоналу, а також може стати причиною корозійного пошкодження при порушенні цілісності оболонки кабелю.

Наведений потенціал виникає як в нормальному режимі роботи кабелю, так і в аварійному при короткому замиканні в мережі. У цьому випадку струм

короткого замикання повністю проходить по жилі, не переходячи в екран, хоча пробою ізоляції не відбувається.

Якщо коротке замикання відбувається безпосередньо в кабелі при пробі ізоляції, то потенціал не наводиться, а відбувається стікання струму короткого замикання в заземлюючих пристроїв по контуру «жила - місце короткого замикання - екран - заземлювач».

Якщо контакт людини та екрану при обслуговуванні кабельної лінії виключено, то наведений потенціал не повинен перевищувати значення напруги, що визначає міцність ізоляції екрану, тобто оболонки кабелю. При механічному пошкодженні оболонки кабелю потенціал екрану не повинен створювати небезпечної для людей і тварин крокової напруги або напруги дотику.

При реалізації одностороннього заземлення рекомендується приймати допустиму величину наведеної на екрані напруги не більше 100 В в нормальному режимі. При короткому замиканні максимальна величина наведеної напруги на екрані не повинна перевищувати 5 кВ, що може призвести до порушення електричної міцності ізоляційної оболонки і проникненню вологи в конструкцію кабелю.

Згідно вимогами електробезпеки напруга на розімкнутому кінці екрану щодо землі у всіх режимах не повинно перевищувати 25 В [22]. В іншому випадку повинні бути встановлені спеціальні кінцеві коробки, що обмежують доступ до екрану кабелю, а всі роботи, пов'язані з дотиком до оболонок кабелів, повинні виконуватися тільки при відключеному кабелі. Кінцеві коробки бувають як однофазного, так і трифазного виконання. Встановлюються на розімкнутому кінці екрану.

Вибір захисних характеристик ОПН необхідно вибирати виходячи з максимально можливої імпульсної напруги, яке прикладається до ОПН, і максимальної тривалості КЗ на землю в схемі застосування КЛ.

Для захисту оболонки від імпульсних перенапруг необхідно встановлювати ОПН з найбільшою робочою напругою 6 кВ і питомою енергією поглинання 2-3 кДж/кВ. Конкретне значення найбільшої робочої напруги ОПН визначається як напруга в місці його установки при зовнішньому короткому замиканні кабелю, поділене на 1,25.

При розриві контуру протікання струму в екранах при даній схемі з'єднання:

$$\dot{I}_{eA} = \dot{I}_{eB} = \dot{I}_{eC} = 0. \Delta \dot{U}_e = \frac{1}{K} (\dot{Z}_{\text{жсe}} - \dot{Z}_k) \dot{I}_{\text{жс}} L_k \Delta U_e = \frac{1}{K} j I_{\text{жс}} L_{\text{жс}} \quad (2.21)$$

Опір прямої послідовності трифазної групи однофазних кабелів:

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_{\text{жс}} + 2\dot{Z}_k. \quad (2.22)$$

Враховуючи (3.22) при вирішенні системи рівнянь (2.12) отримаємо напругу на екранах різних фаз:

$$\Delta \dot{U}_{eA} = Z_{\text{жсe}} \dot{I}_{\text{жсA}} + Z_k \dot{I}_{\text{жсB}} + Z_k \dot{I}_{\text{жсC}}, \quad (2.23)$$

$$\Delta \dot{U}_{eB} = Z_{\text{жсe}} \dot{I}_{\text{жсB}} + Z_k \dot{I}_{\text{жсA}} + Z_k \dot{I}_{\text{жсC}}, \quad (2.24)$$

$$\Delta \dot{U}_{eC} = Z_{\text{жсe}} \dot{I}_{\text{жсC}} + Z_k \dot{I}_{\text{жсA}} + Z_k \dot{I}_{\text{жсB}}. \quad (2.25)$$

Розглянемо випадки для різних режимів роботи кабелю і визначимо напруги на екрані відносно землі в нормальному режимі роботи і при різних симетричних і несиметричних коротких замиканнях в мережі.

В нормальному режимі роботи і при трифазному короткому замиканні сума струмів трьох фаз дорівнює нулю:

$$\dot{I}_{\text{жсA}} = \dot{I}_{\text{жсB}} = \dot{I}_{\text{жсC}} = 0. \quad (2.26)$$

Тоді напруги на екрані згідно (2.25):

$$\Delta \dot{U}_{eA} = (\dot{Z}_{\text{жсe}} - \dot{Z}_k) \dot{I}_{\text{жсA}}, \quad (2.27)$$

$$\Delta \dot{U}_{eB} = (\dot{Z}_{\text{жсe}} - \dot{Z}_k) \dot{I}_{\text{жсB}}, \quad (2.28)$$

$$\Delta \dot{U}_{eC} = (\dot{Z}_{\text{жсe}} - \dot{Z}_k) \dot{I}_{\text{жсC}}. \quad (2.29)$$

Для зниження напруги на екрані кабелю одностороннє заземлення на кабельної лінії можна виконати кілька разів. Для цього лінію розділяють на відрізки рівної довжини (секції), в кожному з яких вини заземлюється лише один раз.

Тоді формула для розрахунку напруги на екрані кабелю при односторонньому заземленні екранів в симетричному режимі з використанням погонних параметрів має вигляд:

$$\Delta \dot{U}_e = \frac{1}{K} (\dot{Z}_{\text{жсe}} - \dot{Z}_k) \dot{I}_{\text{жс}} L_k, \quad (2.30)$$

де  $K$  - кількість секцій одностороннього заземлення екранів

З врахуванням (2.28) і (2.29) остаточно отримаємо:

$$\Delta U_e = \frac{1}{K} j I_{\text{жс}} L_{\text{жс}}, \quad (2.31)$$

де, 
$$X = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2s}{d_e} \right).$$

Вираз (2.31) визначає величину напруги яка наводиться на екрані системи з одностороннім заземленням екранів яка залежать від:

- струму в жилі  $I_{\text{жс}}$ ,
- довжини кабельної лінії  $L_{\text{жс}}$ ,
- діаметра кабелю по екрану  $d_e$ ,
- відстані між фазними кабелями  $s$ ,
- глибини протікання зворотного струму в землі  $D_3$ .

У загальному випадку графік залежності напруги на екрані від довжини кабелю (рис. 2.5) має лінійну характеристику, тому максимальний потенціал буде наводитися на розімкнутому кінці екрану.

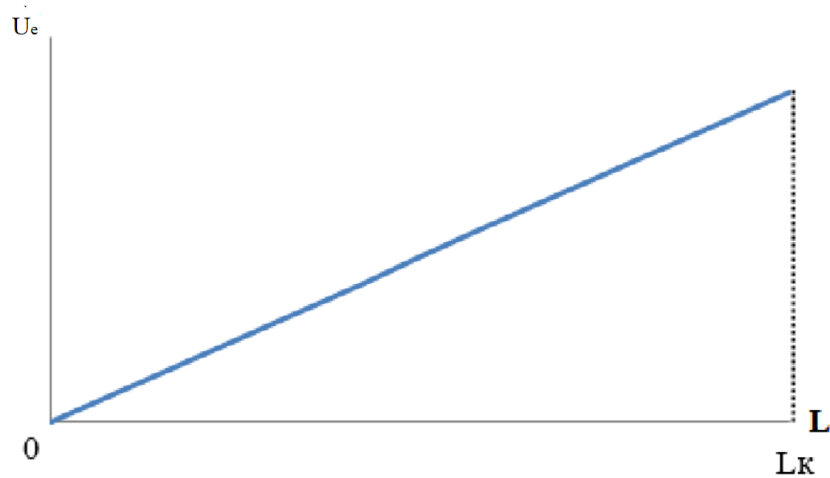


Рисунок 2.5 – Графік залежності  $U_e(L)$  при односторонньому заземленні екранів

Перевагами одностороннього заземлення екранів є відсутність струмів і додаткових втрат потужності в екрані та додаткове нагріву кабелю. До недоліків системи відносяться наявність наведеного потенціалу на екрані, необхідність монтажу захисних апаратів від перенапруг, додаткові витрати при будівництві.

## 2.4 Транспозиція екранів

Транспозиція екрану (рис. 3.6) виконується таким чином, щоб на всій протяжності кабельної лінії екран проходив по трьох ділянках уздовж кожної з фаз, що становлять повний цикл транспозиції.

Так як на різних ділянках однакової довжини ЕРС на екрані наводиться від різних фаз, то сумарна ЕРС контуру дорівнює нулю. В результаті поздовжні струми відсутні, а наводяться лише вихрові, як і у випадку одностороннього заземлення.



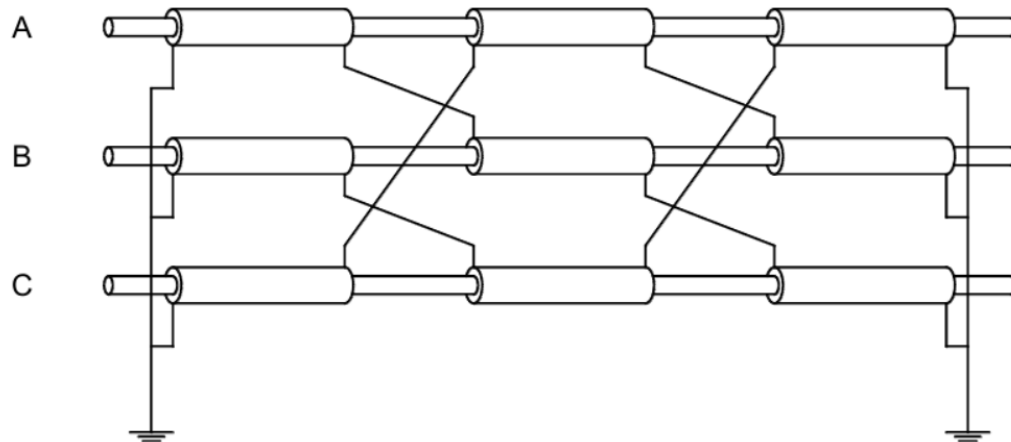


Рисунок 2.6 – Схема транспозиції екранів

При транспозиції екранів необхідно враховувати:

1. Поява небезпечних для захисної оболонки імпульсних перенапруг в вузлах транспозиції;

2. Установку додаткового обладнання: екранно-розділових з'єднувальних муфт, коробок транспозиції з захисними апаратами в вузлах транспозиції екранів.

У разі прокладання кабелю в землі необхідно передбачати будівництво спеціальних транспозиційних камер з заземлювальним пристроєм для установки коробок транспозиції екранів. Це збільшує вартість системи заземлення екранів. Вузли транспозиції можна облаштовувати в камерах установки з'єднувальних муфт, якщо вони розташовуються в потрібних для цього місцях по трасі кабельної лінії. В цьому випадку додаткові витрати складуть лише різниця у вартості з'єднувальних муфт і оплата праці монтажників по установці пристрою транспозиції.

При повному циклі транспозиції екран стає загальним для всіх трьох фаз. На першій і третій ділянках напруга екрану щодо землі дорівнює відповідному наведеному потенціалу з лінійною залежністю від довжини. Для середньої

ділянки наведений потенціал визначає як ЕРС першої ділянки так і ЕРС третьої ділянки, для яких визначальними є струми різних жил. Невеликий потенціал наводиться і в вузлах транспозиції (рисунок 2.7).

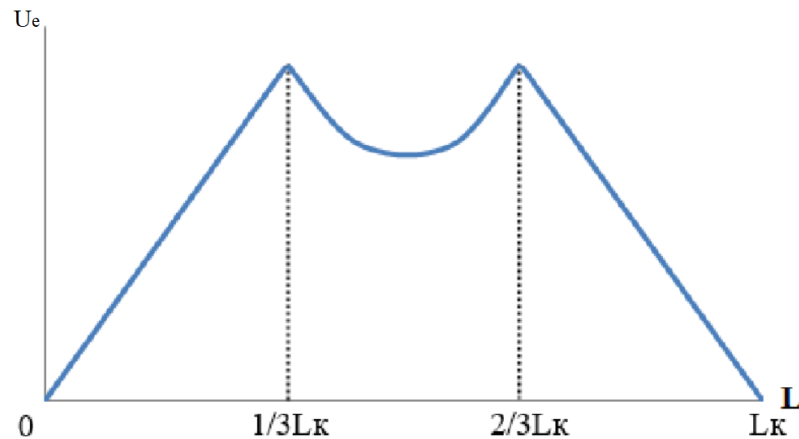


Рисунок 2.7 – Графік залежності  $U_e(L)$  при транспозиції екранів

Допустимі напруги на екрані, вибір характеристик захисних апаратів від перенапруг збігаються з рішеннями для одностороннього заземлення екранів.

Система заземлення з транспозицією екранів є найдорожчою з точки зору будівництва, тому що вимагає двох з'єднувальних муфт, можливо, кабельних колодязів з наявністю пристрою заземлення для установки коробок з захисними апаратами.

Провівши аналогічні міркування як і для попередніх випадків значення наведеної напруги  $U_e$  у випадку застосування транспозиції екранів буде визначатися з виразу,

$$\Delta U_e = \frac{1}{3N} jXI_{жс}L_{жс}, \quad (2.32)$$

де, 
$$X = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2s}{d_e} \right).$$

Перевагами системи з транспозицією екранів є відсутність струмів і додаткових втрат потужності в екрані, відсутність додаткового джерела нагріву кабелю, заземлення екранів з обох кінців кабельної лінії.

До недоліків відносяться необхідність встановлення захисних апаратів від перенапруг, можливе додаткове будівництво камер для встановлення обладнання в вузлах транспозиції (мінімум в двох точках), найбільша вартість будівництва схеми заземлення.

## **2.5 Висновки до розділу**

1. Визначено математичну модель, що дає можливість розрахувати системи заземлення.
2. При двосторонньому заземленні екранів необхідно розраховувати струми і втрати потужності в екранах, які залежать від величини струму в жилі, перетину екрана, діаметра кабелю і відстані між кабелями.
3. Для одностороннього заземлення екранів необхідно розраховувати наведений потенціал на розімкнутому кінці екрану, який залежить від струму в жилі, довжини кабельної лінії, діаметра кабелю, відстані між кабелями і глибини протікання зворотного струму в землі.
4. Для транспозиції екранів необхідно розраховувати наведений потенціал в вузлах транспозиції, який залежить від струму в жилі, довжини кабельної лінії, діаметра кабелю, відстані між кабелями.

### 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Постановка задачі для розрахунку навантажувальної здатності кабельних ліній

Велика роль в досягненні надійного і стабільного функціонування електричних кабелів відводиться вдосконаленню способів їх прокладання, забезпечення оптимальних режимів роботи з урахуванням умов навколишнього середовища, в тому числі встановлення допустимого електричного навантаження на кабелів по струму, яка визначається по допустимій температурі струмопровідних жил. Допустима температура нагріву жил залежить від типу кабелів, номінальної напруги, способу і схеми прокладки кабелів в лінії. Для визначення гранично допустимого струму навантаження кабельних ліній поряд з їх електромагнітним розрахунком важливу роль відіграє уточнений тепловий розрахунок.

В даному розділі з метою визначення здатності навантаження кабельних ліній з ізоляцією із зшитого поліетилену описується і реалізується математична модель пов'язаних електромагнітних і теплових процесів при з врахуванням схеми заземлення екранів кабелів і для різних способів прокладки ліній - підземних кабельних ліній і ліній, прокладених в повітряних спорудах (тунелях, каналах).

Представлена в даному розділі математична модель вперше описана в [6], де розроблена на її основі чисельна методика використана для розрахунків підземної дволанцюгової кабельної лінії з розташуванням кабелів трикутником. Далі для горизонтального розташування кабелів в підземних лініях проводиться розв'язок, фізично зв'язаної електромагнітної і теплової задачі. Рішення проводиться послідовно: спочатку електромагнітна задача вирішується в плоскій

постановці, потім стаціонарна теплова задача - з метою врахування можливих неоднорідних умов прокладки лінії на трасі. Структура мультифізичної завдання і функціональні зв'язки між окремими задачами при розрахунку електротеплових процесів в підземній кабельній лінії наведені на рис. 3.1.

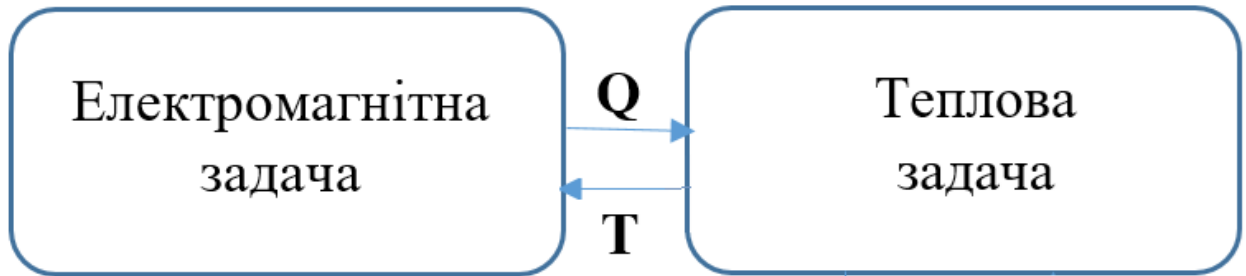


Рисунок 3.1 – Структура задачі при розрахунку навантажувальної здатності кабельних ліній

Комп'ютерні розрахунки проведені з використанням методу скінченних елементів в пакеті програм Comsol Multiphysics[23].

Змінний струм, що проходить через кабель, створює змінне магнітне поле, яке індукує струми в жилах, в металевому кожусі і фользі. Вихрові струми приводять до комбінованого нагріву: джоулевого і індукційного. Кабель починає нагріватися, що може призвести до виходу з ладу, тому в наших інтересах побудувати розрахункову модель.

При постановці задачі були зроблені наступні припущення:

- кабель нескінченно довгий;
- електродинамічні характеристики матеріалів постійні та ізотропні;
- всі величини поля змінюються синусоїдально в часі;
- електромагнітне поле є квазістаціонарним

- кабельні лінії вважаються нескінченно довгими, що дозволяє розглядати процес в двовимірній постановці і не враховувати дифузійні потоки в поздовжньому напрямку;
- в трубі реалізується ламінарний режим руху повітря;
- теплофізичні характеристики масиву землі, бетону, поліетиленової труби, залізобетонної плити і піщаної підсипки постійні

### 3.2 Математична модель електромагнітних процесів

Область включає в себе кабельну лінію, яка складається з кабелів однофазного виконання з ізоляцією із зшитого поліетилену. Елементами конструкції кабелів в лінії, що враховується при розрахунку, є алюмінієві струмопровідні жили, кожна з яких оточена ізоляційним шаром із зшитого поліетилену, потім екраном з мідних дротів та поверх всього герметичною зовнішньої поліетиленовою оболонкою.

- досліджувані кабельні лінії досить довгі і горизонтально прокладені паралельно поверхні землі на певній глибині;

- екрани кабелів заземлені по кінцях.

Електромагнітна задача вирішується в двовимірній постановці, в поперечному перерізі кабельної лінії, в декартовій системі координат щодо комплексного векторного магнітного потенціалу  $\dot{A} = (0, 0, \dot{A}_z)$ , що характеризується єдиною z-складовою  $\dot{A}_z = (x, y)$ .

Джерелами змінного магнітного поля в розглянутих областях є трифазні струми, що протікають в жилах і екранах кабелів.

Розподіл векторного потенціалу визначається наступною системою рівнянь:

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma\Delta\dot{U}_i; \quad (3.1)$$

$$\int_{\sum_i S_i} \dot{J}_z dS = \int_{\sum_i S_i} (-j\omega\sigma\dot{A}_z + \sigma\Delta\dot{U}_i) dS = 0; \quad (3.2)$$

$$\Delta\dot{U}_e = \Delta\dot{U} - 2R_3(I_{eA} + I_{eB} + I_{eC}). \quad (3.3)$$

де.  $\sigma$ ,  $\mu_0$  – електропровідність і магнітна проникність вакууму;

$\omega$  – циклічна частота зміни струму;

$\dot{J}_z$  – густина струму;

$dS$  – площа поперечного перерізу  $i$ -го провідного середовища в рамках розрахункової області

$\Delta\dot{U}_i$  – падіння напруги в провідному середовищі на ділянці одиничної довжини;

$R_3$  – опір землі;

$I_{eA}$ ,  $I_{eB}$ ,  $I_{eC}$  – струми в екранах фаз кабелів А, В, С відповідно;

$\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{ж}$  – в області жил (вважається відомою величиною);

$\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_e$  – в області екрану;

$\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}$  – в області ґрунту.

Система рівнянь (3.1) - (3.3) містить три рівняння і три невідомі величини  $\dot{A}_z, \Delta\dot{U}_e, \Delta\dot{U}$  і є основою математичної моделі задачі в замкнутому вигляді. В якості граничних умов на зовнішніх границях розрахункової області задається умова магнітної ізоляції:  $\dot{A}_z = 0$ .

### 3.3 Розрахунок електромагнітних характеристик

Вважалося, що кабель знаходиться в масі землі на глибині  $H = 0.7$  м. Електричні властивості конструктивних елементів силового кабелю та моделі в цілому зведено в таблицю 3.1.

Таблиця. 3.1 – Електричні властивості конструктивних елементів силового кабелю, кабельного каналу і масиву землі

Елемент	Матеріал	Відносна магнітна проникність $\mu_0$	Відносна діелектрична проникність $\epsilon_0$	Питома електрична Провідність $\sigma$ (См/м)
Конструкція силового кабелю				
Жила	Алюміній	1,000021	1	$38 \cdot 10^6$
Ізоляція	Зшитий поліетилен	1	2,3	0
Екран	мідь	0,99999	1	$58 \cdot 10^6$
Оболонка	ПВХ	1	3,1	0
Конструкція кабельного каналу				
Масив землі	Ґрунт	1	5,7	$10^{-5}$
Бетонний моноліт	Бетон В15	1	4,8	$10^{-30}$
Труба	Поліетилен	1	2,25	0
Залізобетонна плита	Залізобетон марки ПД 30- 12	1	4,8	0,31



Задаємо довжину кабельної лінії рівну 1 км. Завдання полягає в обчисленні наведених струмів в екранах, а також втрат від них. Прийmemo як допущення симетричний характер навантаження і симетричність системи струмів жил з діючим значенням струму одної фази 110 А. Припущення симетрії струмів жил є спрощуючим припущенням, оскільки через особливості розташування кабелів магнітні умови взаємодії різних фаз злегка різні. Однак це припущення є звичайним для практики розрахунків. Важливо відзначити, що відносно екранів ніяких припущень про симетрії струмів не робиться.

Результатом моделювання процесів електро - і магнітодинаміки в кабельній лінії є розподіл густини струму. На рис. 3.2 наведені розрахункові дані розподілу густини електричного струму, отримані в результаті рішення за запропонованою математичною моделлю.

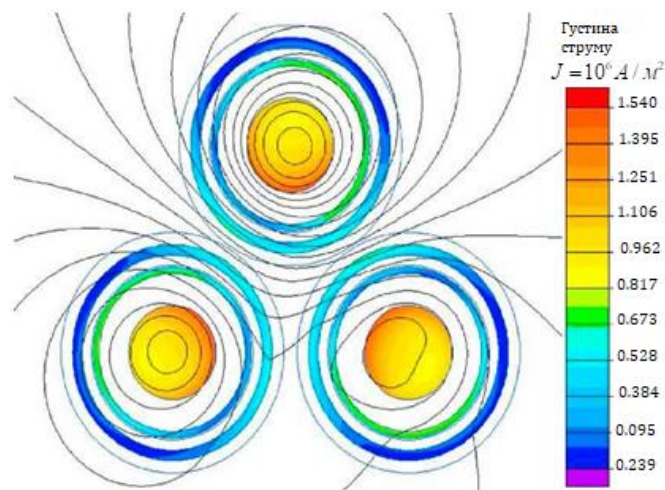


Рисунок 3.2 – Розподіл густини електричного струму в кабельних лініях.

На рис. 3.2 показано взаємний вплив провідників (жил і екранів) кабелів, що проявляється у витісненні струму на поверхню, Картини розподілу густини струму окремо в жилах і екранах кабелів відображають результат спільного прояву ефекту близькості і скін ефекту. Має місце несиметрія струмів в жилах і

екранах. Це пояснюється складним взаємним впливом провідних частин кожного кабелю і впливом кабельних ліній між собою.

### 3.4 Математична модель теплових процесів в підземних кабельних лініях

Далі розробимо модель розрахунку теплового поля кабельних ліній. Вважається, що ґрунт навколо підземних кабелів однорідний і має одні і ті ж властивості по глибині; відзначимо, що в загальному випадку властивості землі зазнають змін в результаті функціонування кабельних ліній, а також під дією метеорологічних чинників внаслідок всідання, зволоження або висихання.

Теплова задача для підземних кабельних ліній формується в тривимірній постановці з урахуванням неоднорідної ділянки ґрунту на трасі прокладки щодо температури  $T = T(x, y, z)$ .

Розподіл стаціонарного температурного поля описується диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (3.4)$$

де  $\lambda(x, y, z)$  - теплопровідність відповідного матеріалу в розглянутому неоднорідному середовищі;

$Q$  - питома потужність теплових джерел, до яких відносяться джоулево тепло, що виділяється в провідниках жил кабелів;

$-|J_{жс}|^2 / \sigma_{жс}$ , і  $-|J_e|^2 / \sigma_e$  - втрати електричного струму, що протікає в мідному екрані кожного кабелю. У наведених формулах:  $J_{жс}$ ,  $J_e$  - діюче значення густини струму в жилах і наведеного струму в екранах кабелів;

$\sigma_{жс}$ ,  $\sigma_e$  - електропровідність жили і екрану.

Рівняння (3.4) доповнюється граничними умовами

$T = T_0$  на зовнішніх границях,

$-\lambda \partial T / \partial n = k(T - T_{нов})$  на всіх інших.

В таблиці 3.2 зведені теплофізичні властивості конструктивних елементів силового кабелю, кабельного каналу і масиву землі.

Таблиця 3.2 – Теплофізичні властивості конструктивних елементів силового кабелю, кабельного каналу і масиву землі

Елемент	Матеріал	Густина $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	Коефіцієнт питомої теплоємності $C$ (Дж/кг·°С)	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ (Вт/м·°С)
Конструкція силового кабелю				
Жила	Алюміній	2698	930	237
Ізоляція	Зшитий поліетилен	942	2300	0,35
Екран	мідь	8920	385	401
Оболонка	ПВХ	1620	1000	0,17
Конструкція кабельного каналу				
Масив землі	Грунт	2000	2500	0,83
Бетонний моноліт	Бетон В15	1400	750	0,6
Труба	Поліетилен	930	2600	0,4
Залізобетонна плита	Залізобетон марки ПД 30-12	2500	840	1,55

### **3.5 Чисельне дослідження впливу різних умов теплообміну на температурне поле в кабельному каналі**

Особливий інтерес представляє аналіз розподілу температурних полів в кабельному каналі при різному навантаженні кабельних ліній в номінальному режимі роботи.

Оскільки критерієм обмеження по переданої потужності було значення температури на поверхні жили кабелю, яка не повинна перевищувати граничної температури для матеріалу ізоляції ( $T = 90^{\circ}\text{C}$ ), то за допомогою ітераційної процедури в разі завантаження всіх кабельних ліній було визначено таке значення максимального струму кабельних ліній, при якому ця умова виконувалася.

На рис. 3.3 представлена картина розподілу температурного поля в кабельному каналі і масиві землі при загальному рівномірному навантаженні кабельних ліній струмом рівним 115,6А.

Температурне поле в кабельному каналі неоднорідне. За отриманим температурним полем в кабельному каналі можна визначити кабельні лінії, які знаходяться в більш жорстких температурних умовах.

Максимальне значення температури при повному рівномірному навантаження всіх ліній реалізується на поверхні жил центральних кабельних ліній нижнього ряду і досягає граничного значення  $90^{\circ}\text{C}$ .

Потрібно відзначити, що масив землі, що оточує кабельний канал, досить добре прогрівається до температур в діапазоні  $50\text{--}70^{\circ}\text{C}$ , при цьому температурне поле за межами кабельного каналу поширюється досить далеко, що в свою чергу може впливати на роботу інших комунікацій, розташованих поблизу кабельного каналу.

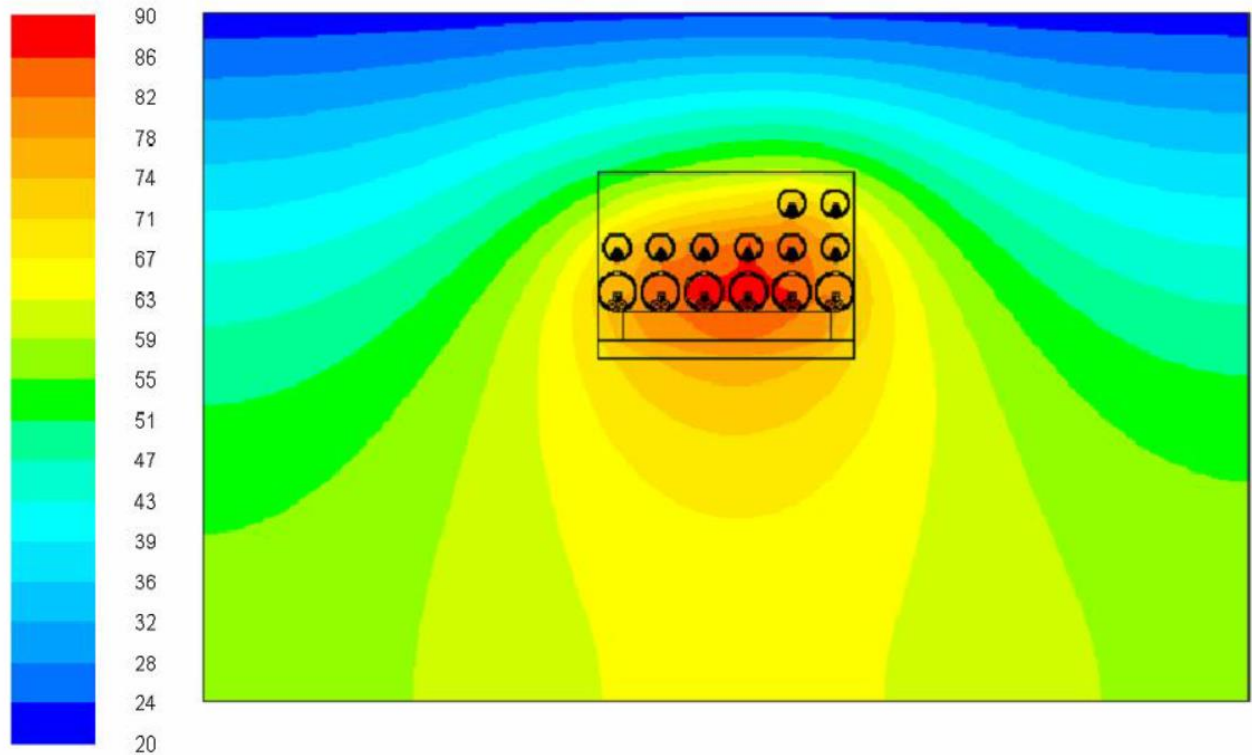


Рисунок 3.3 – Температурне поле в кабельному каналі і масиві землі при роботі всіх кабельних ліній

Оскільки при реальній експлуатації кабельного каналу, можливе навантаження тільки частини кабельних ліній, то виникає питання про вибір раціонального навантаження на працюючому кабелі.

Ряд чисельних досліджень дозволив визначити раціональні величини переданої потужності при різних режимах роботи кабельних ліній. На рис. 3.4 приведено температурне поле в кабельному каналі при роботі тільки нижнього ряду кабельних ліній. При цьому з'явилася можливість збільшити навантаження на працюючі кабелі, при цьому значення робочого струму складе 134,4 А, який на 16% більше ніж в разі роботи всіх кабельних ліній.

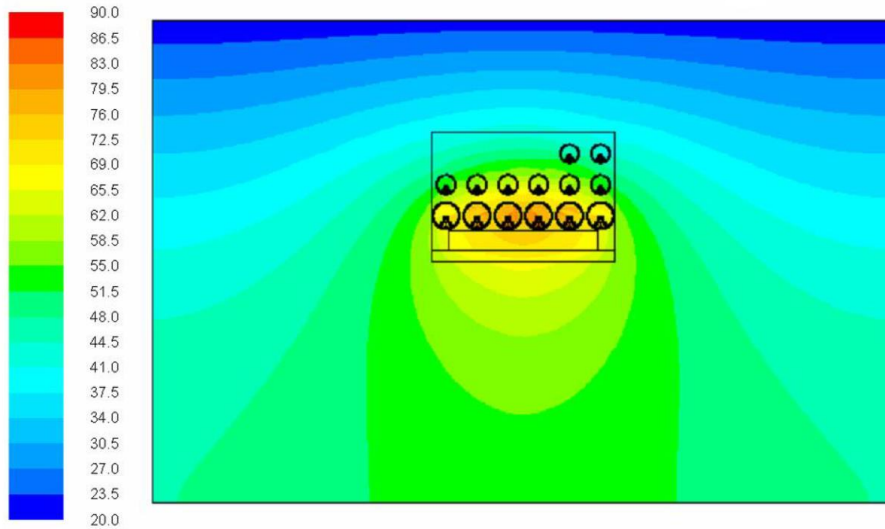


Рисунок 3.4 – Температурне поле в кабельному каналі і масиві землі при роботі нижніх кабельних ліній

На рис.3.5 зведені отримані чисельні результати при різних режимах навантаження кабельного каналу.

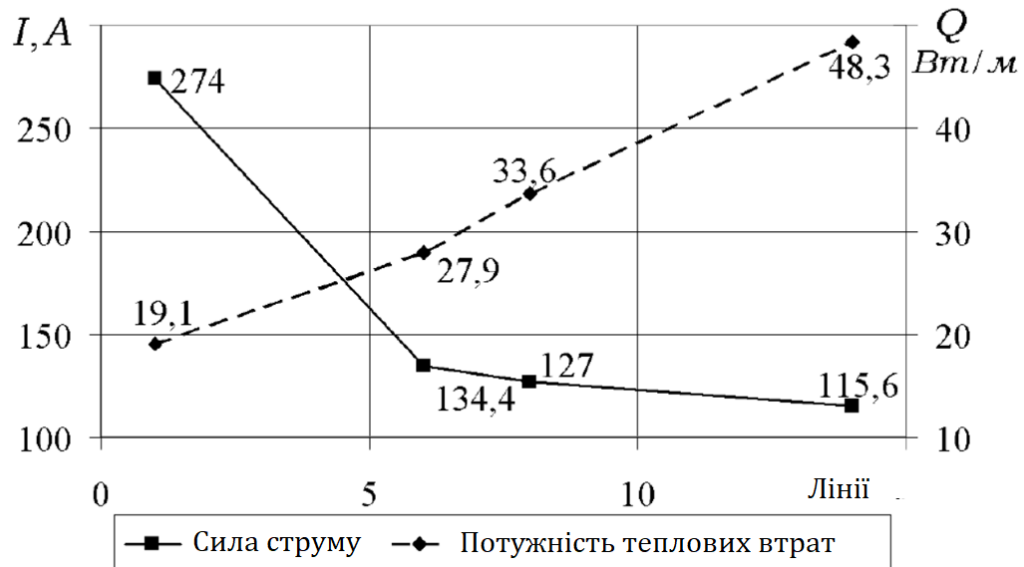


Рисунок 3.5 – Залежність робочого струму і сумарної потужності теплових втрат в кабельному каналі від кількості працюючих ліній

З аналізу отриманих залежностей (рис. 3.5) видно, що зі збільшенням кількості працюючих кабельних ліній, значення сумарної потужності теплових втрат в кабельних лініях зростає, що в свою чергу призводить до збільшення максимальної температури в кабельному каналі і, як наслідок, зниження значення номінального струму.

Таким чином, з'являється можливість оптимізувати передачу потужності в залежності від реальних потреб. У разі якщо необхідно передавати максимальну потужність по восьми кабельних лініях, то значення максимального струму не повинно перевищувати 127А. Результати чисельних розрахунків, представлених вище, є правомірними для літнього періоду часу при температурі навколишнього середовища 20<sup>0</sup>С.

У зимову пору року з'являється можливість збільшення переданої потужності по кабельній лінії, величину якої можна обґрунтувати, провівши чисельні дослідження впливу кліматичних умов на температурне поле в кабельному каналі.

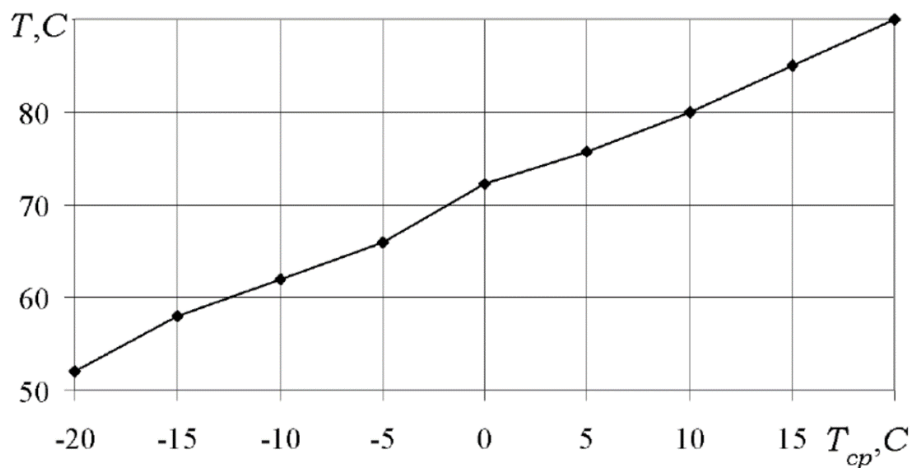


Рисунок 3.6 – Залежність максимальної температури в кабельному каналі від температури навколишнього масиву землі

На рис. 3.6 приведена отримана залежність максимальної температури поверхні жили центральних кабельних ліній, прокладених в нижньому ряду кабельного каналу, від температури масиву землі при загальному навантаженні кабельних ліній.

З рис. 3.6 видно, що при охолодженні ґрунту до негативних температур (зимової пори року), температура кабельних ліній, що знаходяться в жорстких температурних умовах, істотно падає при сталості інших параметрів (заданий струм, конструкція кабелів) майже в два рази (42%), тим самим з'являється можливість збільшити навантаження на кабельні лінії.

Отримані в результаті чисельних розрахунків розподілу робочого струму і сумарної переданої потужності кабельних ліній в залежності від температури масиву землі представлені на рис. 3.7.

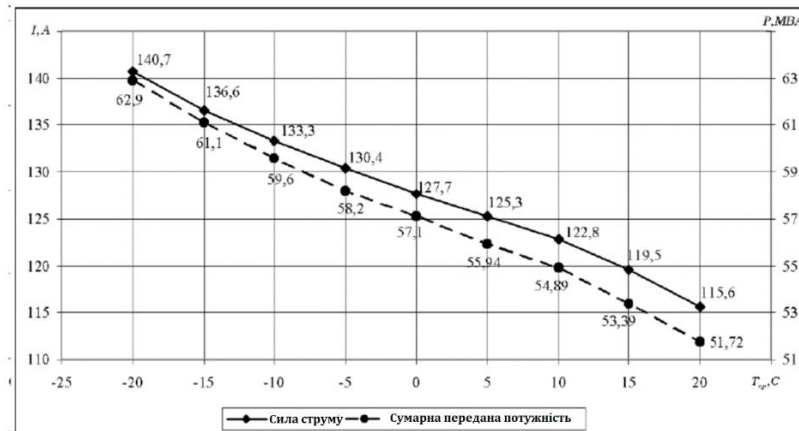


Рисунок 3.7 – Залежність робочого струму і сумарної переданої потужності в кабельному каналі від температури навколишнього масиву землі

Результати дослідження впливу кліматичних умов на температурне поле в кабельному каналі показали, що при охолодженні ґрунту до негативних температур робочий струм кабельних ліній і, отже, передана потужність може бути збільшено на 20% без перевищення допустимих температур в кабельному каналі.



Виходячи з цього, в залежності від погодних умов, зокрема в весняний і осінній час року, можна враховувати зміну теплопровідності ґрунту в залежності від кліматичних умов (вологості ґрунту) і змінювати навантаження на кабельні лінії, зберігаючи при цьому безпечну експлуатацію кабельної лінії.

### 3. 6 Дослідження температурного поля в кабельному колекторі

Розроблена математична модель процесів теплообміну, електро - і магнітодинаміки, дозволяє моделювати процеси, що відбуваються в будь-яких кабельних спорудах з різними геометричними параметрами силових кабелів, теплофізичними характеристиками використовуваних матеріалів, умовами теплообміну і визначати теплові режими при різних умовах експлуатації кабельних ліній.

В роботі проведено чисельне дослідження температурного поля в кабельному колекторі, схематичне зображення якого з позначенням геометричних параметрів представлено на рис. 3.8.

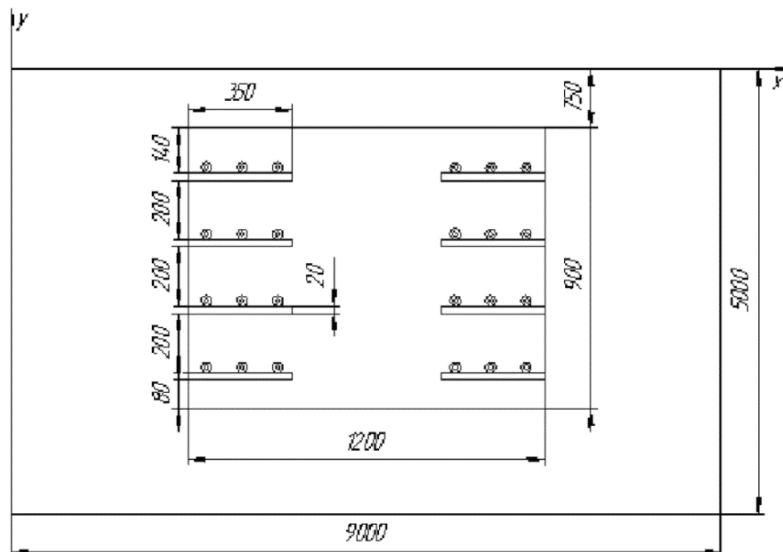


Рисунок 3.8 – Схематичне зображення кабельного колектора, прокладеного в масиві землі

За існуючим проектним рішенням в стандартному підземному колекторі розміщено 8 трифазних кабельних ліній. Силові кабелі розташовані лінійно з відстанню 70мм між ними. Усередині кабельного колектора циркулює повітря.

При постановці завдання процесів тепломасопереносу і електро - і магнітодінаміки, що протікають в кабельному колекторі, застосовувалася математична модель, що описується системою диференціальних рівнянь з відповідними припущеннями і умовами однозначності. У результаті вирішення поставленого завдання отримано розподіл температури в підземному колекторі (рис. 3.9, рис 3.10) при допустимому навантаженні всіх кабельних ліній. На рис. 3.9 показано температурне поле, всередині колектора.

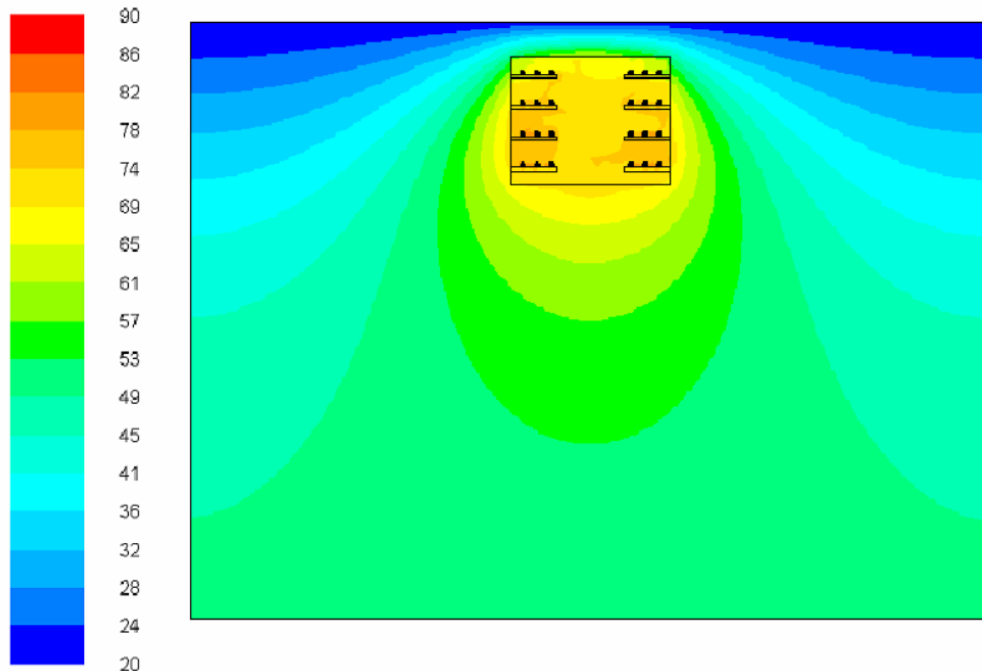


Рисунок 3.9 – Температурний розподіл в колекторі та масі землі

З аналізу отриманих температурних полів, видно, що максимальна температура досягається на поверхні жили центральних кабельних ліній, що знаходяться на першому і другому нижніх рядах ( $T=90^{\circ}\text{C}$ ) яка не перевищує

допустиму температуру для даних умов прокладки і експлуатації кабельного колектора. Масив землі близько кабельної споруди досить добре прогривається до 60°C.

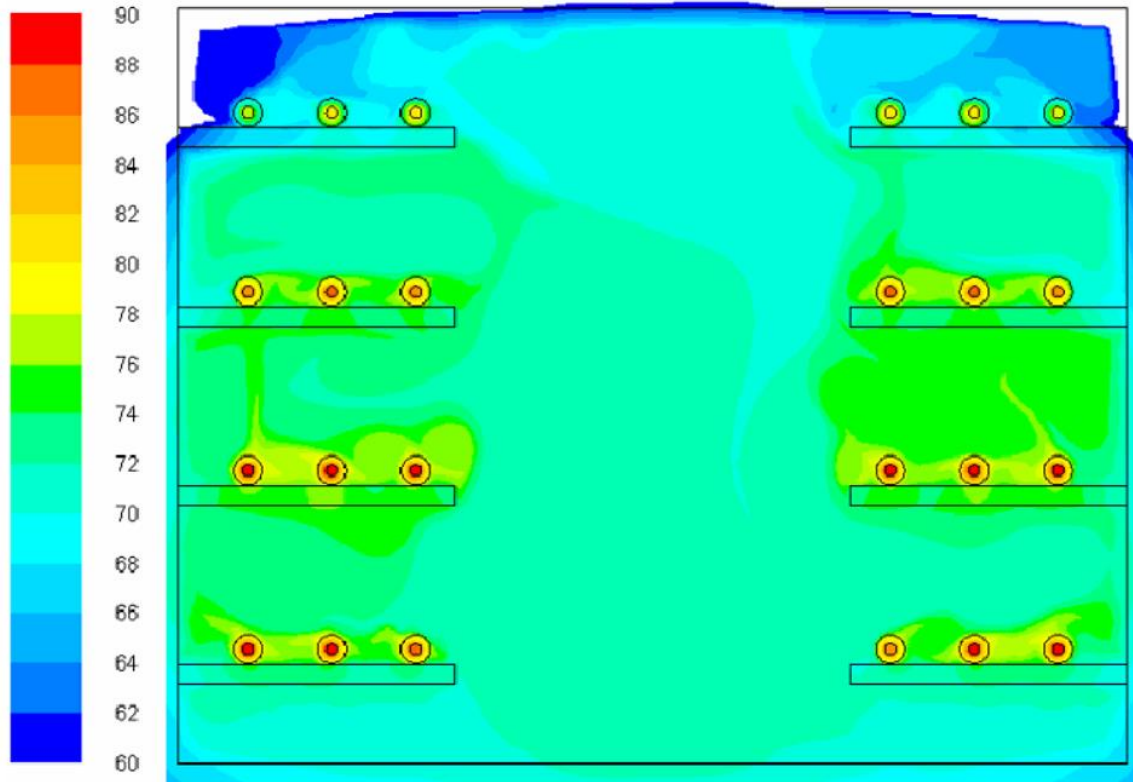


Рисунок 3.10 – Температурне поле в кабельному колекторі

Оскільки розподіл потужностей електричної енергії по кабельних лініях, прокладених у кабельних спорудах, часто не відповідає правилам безпеки при експлуатації, а внутрішній простір підземних мереж використовується неефективно, то дані проблеми особливо актуальні для кабельних колекторів, де раціональне заповнення, а також зменшення габаритів і відповідно зниження витрат на будівництво, набувають особливого значення.

Для ефективного використання внутрішнього простору підземних мереж запропонований варіант прокладки восьми кабельних ліній в зменшеному за габаритами колекторі з тієї ж сумарної потужністю. На рис. 3.11 представлено

отримане температурне поле в зменшеному за габаритами кабельному колекторі, при цьому значення температур на поверхні жил залишалися в допустимих межах.

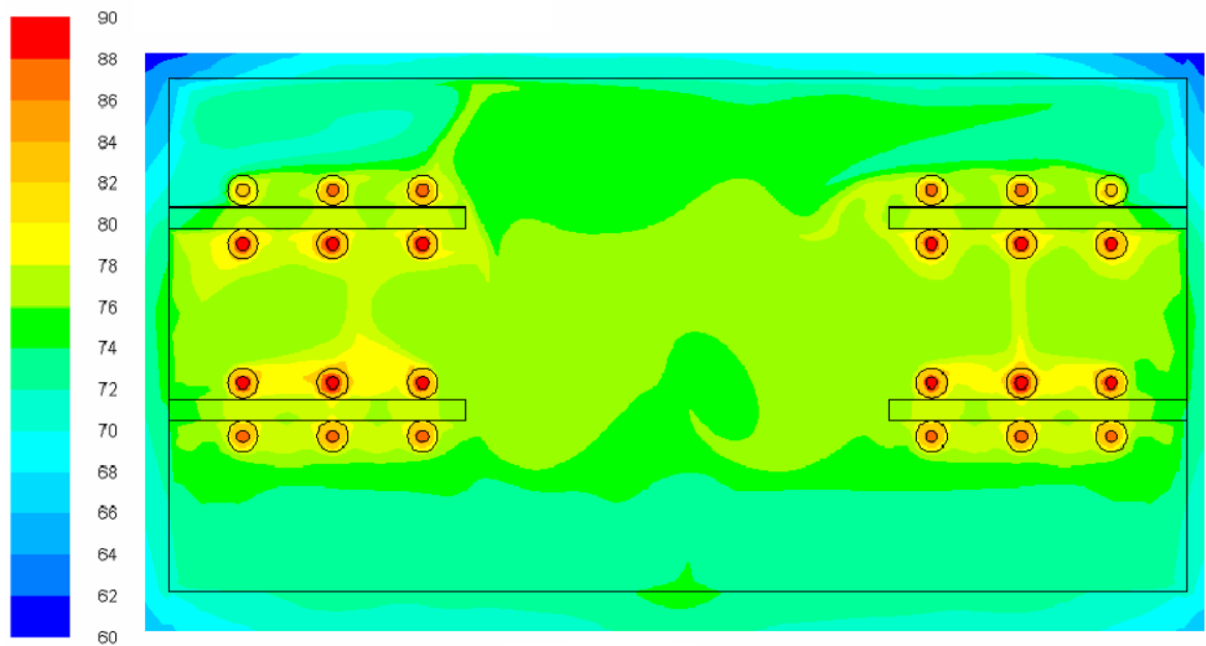


Рисунок 3.11 – Температурне поле в зменшеному за габаритами колекторі

Таким чином, з аналізу отриманих чисельних результатів, можна зробити висновок, що для ефективного використання внутрішнього простору підземних мереж можна застосовувати зменшений за габаритами колектор зі збереженням колишнього числа кабельних ліній тієї ж сумарної потужності, що передається, або використовувати дворівневу прокладку кабельних ліній з переліченим номінальним струмом, при якому не буде відбуватися перевищення допустимої температури в колекторі.

Наступні дослідження дозволили визначити температурні режими, які реалізуються в кабельному колекторі в залежності від глибини прокладки в масиві землі.

Результати розрахунків представлені у вигляді залежності на рис. 3.12. Зі збільшенням глибини прокладки в масиві землі відбувається зростання температури в колекторі, що обумовлюється гіршими умовами тепловідведення. При збільшенні глибини прокладки кабельного колектора в два рази температура зростає на  $52^{\circ}\text{C}$ , та є недопустимою.

Виходячи з отриманих результатів, при розрахунку температурних полів в кабельному колекторі, необхідно враховувати глибину прокладки конструкції кабельної споруди.

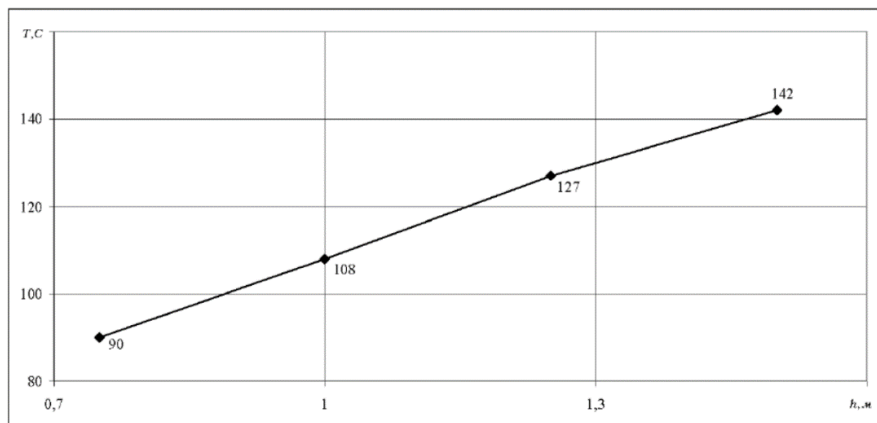


Рисунок 3.12 – Залежність максимальної температури в колекторі від глибини прокладання

Далі був проведений аналіз температур кабельних ліній в залежності від конструкційних матеріалів струмопровідної жили і ізоляції силового кабелю.

На рис. 3.13 і рис. 3.14 наведені максимальні температури кабельної лінії, отримані з вирішення поставленого завдання при заданому струмовому навантаженні в залежності від використаних матеріалів.

З аналізу рисунків видно, що істотний вплив на теплові процеси в кабельних колекторах надають теплофізичні властивості ізоляційних матеріалів на відміну від теплофізичних властивостей матеріалів, жил силового кабелю.

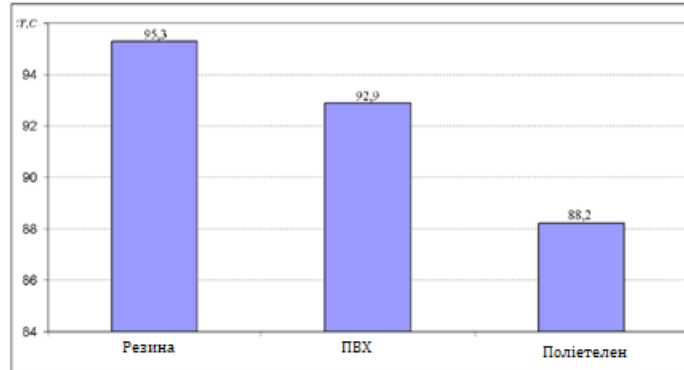


Рисунок 3.14 – Максимальні температури кабельної лінії в залежності від матеріалу ізоляції кабелю

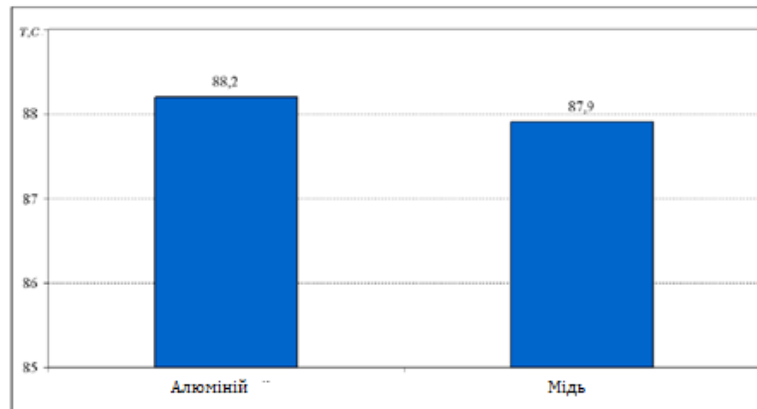


Рисунок 3.15 – Максимальні температури кабельної лінії в залежності від матеріалу жили

Так найбільшу температуру має силовий кабель з гумовою ізоляцією ( $T=95,3$  °C величини якої пояснюється низьким значенням теплопровідності матеріалу, в порівнянні з полівінілхлоридовою, або поліетиленовою ізоляцією. Матеріал жили силового кабелю має незначний вплив на температуру кабельної лінії (різниця по температурі складала  $\Delta T = 0,3$  °C).

При експлуатації кабельного колектора досить часто виникають ситуації, коли працююча кабельна лінія переходить в режим підвищеного навантаження. У цьому випадку важливо знати час роботи кабельних ліній в перевантажувальному режимі до досягнення граничних значень температур на ізоляції кабелів.

З цією метою було розглянуто нестационарний процес в колекторі при тривалій роботі кабельної лінії з максимально допустимим струмом і подальшим підвищенням струмового навантаження в кабелі. В результаті дослідження були визначені поля температур та час, протягом якого можливо підтримувати підвищене струмове навантаження без перегріву ізоляції (рис. 3.16).

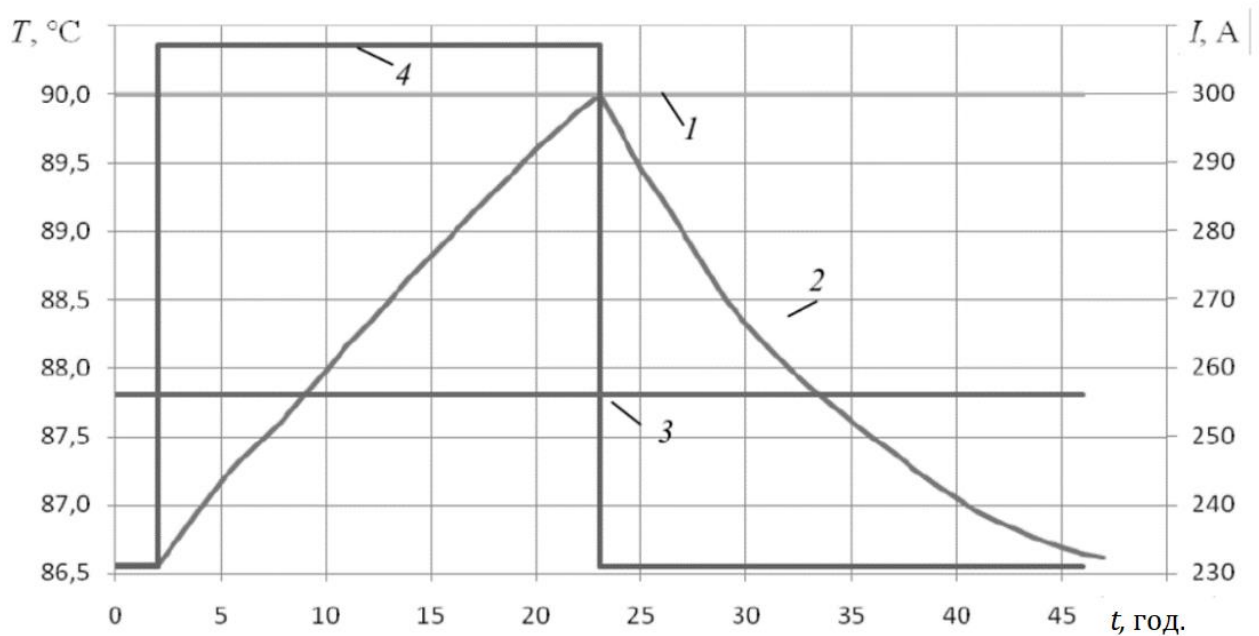


Рисунок 3.16 – Графік нагріву кабельної лінії: 1 - максимальна температура на поверхні кабелю в номінальному режимі; 2 - максимальна температура ізоляції в умовах перевантаження; 3-номінальне струмове навантаження; 4 - характер струмового навантаження в режимі перевантаження.

Отриманий режим роботи кабельної лінії дозволяє короткочасно підтримувати підвищене струмове навантаження до 23 годин без перегріву ізоляції, потім необхідно зменшити потужність до максимально допустимої щоб уникнути перегріву ізоляції.

Таким чином, використання запропонованих математичних моделей і аналіз чисельних результатів дозволив зробити висновок про те, що геометричні особливості кабельних ліній і кабельних споруд, теплофізичні властивості навколишнього середовища та матеріалів, додаткові теплові втрати в металевих екранах кабелів, умови експлуатації надають значний вплив на температурне поле в кабельній споруді, і як наслідок - на величину пропускну здатності силових кабелів.

### **3.7. Висновки до розділу**

1. Розглянуто розподіл густини електричного струму в окремо взятій кабельної лінії, прокладеної в трубі. Показано, що в такому випадку має місце несиметрія струмів в жилах і екранах в зв'язку з складним взаємним впливом провідних частин кожного кабелю і впливом кабельних ліній між собою.

2. Досліджено температурні поля в кабельному каналі при різних режимах навантаження. Наведено залежності робочих струмів кабельних ліній від кількості працюючих ліній, від температури і теплофізичних характеристик навколишнього масиву землі.

3. Визначено температурні поля в кабельному колекторі в залежності від укомплектування. Встановлено, що для ефективного використання внутрішнього простору підземних мереж можна застосовувати зменшений за габаритами колектор, або використовувати дворівневу прокладку кабелів зі зменшеним струмовим навантаженням.



## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Заходи електробезпеки при роботі з електрообладнанням.

Струмоведачі частини електроустановки повинні бути недоступними для випадкового прямого дотику до них, а доступні для дотику відкриті її частини і сторонні провідні частини не повинні знаходитися під напругою, яка становить небезпеку ураження електричним струмом як у нормальному режимі роботи електроустановки, так і при пошкодженні її ізоляції.

Для захисту від ураження електричним струмом при прямому дотику повинні застосовуватись, окремо або в поєднанні, такі основні заходи захисту:

- основна ізоляція струмоведачих частин;
- огорожі і оболонки;
- бар'єри;
- розміщення поза зоною досяжності;
- наднизька (мала) напруга.

Для додаткового захисту від прямого дотику в електроустановках напругою до 1 Кв можуть застосовуватись ПЗВ.

Захист від прямого дотику не вимагається, якщо номінальна напруга не перевищує:

- 25 В змінного або 60 В постійного струму при застосуванні системи БННН, а також системи ЗННН у випадку, коли електрообладнання експлуатується тільки в сухих приміщеннях і знаходиться в зоні дії системи зрівнювання потенціалів, а ймовірність контакту людини з частинами, які знаходяться під напругою, мала;
- 6 В змінного або 15 В постійного струму у всіх інших випадках.

Для захисту від ураження електричним струмом при непрямому дотику повинні застосовуватись, окремо або в поєднанні, такі заходи захисту:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимикання живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- вирівнювання потенціалів;
- подвійна або посилена ізоляція;
- захисний електричний поділ кіл;
- ізолюючі (непровідні) приміщення, зони, площадки;
- наднизька (мала) напруга.

Захист від непрямого дотику слід виконувати в усіх випадках, якщо напруга електроустановці перевищує 50 В змінного і 120 В постійного струму. В приміщеннях з підвищеною небезпекою, в особливо небезпечних і в зовнішніх установках виконання захисту від непрямого дотику може знадобитися при більш низьких напругах, наприклад: 25 В змінного і 60 В постійного струму або 12 В змінного і 30 В постійного струму за наявності відповідних вимог до конкретних електроустановок або електроприймачів.

Заходи захисту від ураження електричним струмом повинні бути передбачені в електроустановці чи її частині або застосовані до окремих електроприймачів і можуть бути реалізовані при виготовленні електрообладнання, або в процесі монтажу електроустановки чи в обох випадках. Застосування двох і більше заходів захисту в електроустановці не повинно чинити взаємного впливу, що знижує ефективність кожного з них.

Для захисного заземлення електроустановок можуть бути використані штучні і природні заземлювачі. В першу чергу слід використовувати природні заземлювачі. Якщо при використанні природних заземлювачів опір

заземлювальних пристроїв задовольняє пред'явлені до них вимоги, то виконання штучних заземлювачів в електроустановках напругою до 1 кВ не обов'язкове. Використання природних заземлювачів як елементів заземлювальних пристроїв не повинно приводити до їх ушкодження при протіканні по них струмів короткого замикання або до порушення роботи пристроїв, з якими вони зв'язані.

Для заземлення в електроустановках різних призначень і напруг, територіально зближених, необхідно, як правило, застосовувати один спільний заземлювальний пристрій.

Заземлювальний пристрій, який використовується для заземлення електроустановок одного або різних призначень і напруг, повинен задовольняти усі вимоги, висунуті до заземлення цих електроустановок: захист людей від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції; умови режимів роботи мереж; захист електрообладнання від перенапруги; електромагнітну сумісність комп'ютерних і мікропроцесорних систем, РЗА і АСУ ТП, які застосовуються у цих електроустановках, тощо - протягом усього періоду експлуатації. В першу чергу повинні дотримуватись вимоги, висунуті до захисного заземлення.

При виконанні незалежного окремого заземлювача для функціонального заземлення за умовами роботи інформаційного або іншого чутливого до впливу перешкод устаткування повинні бути вжиті спеціальні заходи захисту від ураження електричним струмом, які виключають одночасний дотик до частин, що можуть при ушкодженні ізоляції опинитися під небезпечною різницею потенціалів.

Для об'єднання заземлювальних пристроїв різних електроустановок в один спільний заземлювальний пристрій можуть бути використані природні і штучні заземлювальні провідники при їх кількості не менше двох.

Необхідні значення напруг дотику і опорів заземлювальних пристроїв при стіканні з них струмів замикання на землю і струмів витоку повинні бути забезпечені при найбільш несприятливих умовах у будь-яку пору року.

При визначенні опору заземлювальних пристроїв повинні враховуватися штучні і природні заземлювачі. При визначенні питомого опору землі за розрахункове слід приймати його сезонне значення, яке відповідає найбільш несприятливим умовам. Заземлювальні пристрої повинні бути механічно міцними та динамічно стійкими до струмів замикання на землю і не повинні термічно ушкоджуватись за час їх протікання. Матеріал і переріз заземлювачів повинні забезпечувати їх стійкість до корозії на весь період експлуатації.

Електроустановки напругою до 1 кВ житлових, громадських і промислових будинків, приміщень для утримування тварин і зовнішніх установок повинні, як правило, отримувати живлення від джерела з глухозаземленою нейтраллю із застосуванням системи заземлення TN. Вимоги до вибору системи TN-C, TN-S, TN-C-S для конкретних електроустановок подаються у відповідних главах ПУЕ.

TN-S система заземлення – нульовий робочий та нульовий захисний провідники працюють окремо в усій системі.

TN-C-S система заземлення – функції нульового робочого та нульового захисного провідників об'єднані в одному провідникові в частині мережі.

TN-C система заземлення – функції нульового робочого та нульового захисного провідників об'єднані в одному провідникові в усій мережі.

ІТ-система заземлення – мережа живлення системи ІТ не має безпосереднього зв'язку струмовідних частин з землею, а відкриті струмопровідні частин електроустановки заземлені.

L – фазний провідник.

N – нульовий робочий провідник.

PE – нульовий захисний провідник.

PEN – об'єднаний нульовий робочий та захисний провідник.

Для захисту від ураження електричним струмом при непрямому дотику в електроустановках із системою TN повинно виконуватися автоматичне вимикання живлення відповідно до підрозділу 1.4. На повітряних лініях мереж з системою TN повинно виконуватись повторне заземлення PEN- провідника відповідно до вимог підрозділу 1.6. Рекомендується також виконувати повторне заземлення PEN (PE) – провідника на вводі в електроустановки будинків згідно з підрозділом 1.6. В середині великих і багатоповерхових будинків аналогічну функцію виконує зрівнювання потенціалів шляхом приєднання нульового захисного провідника до головної заземлювальної шини.

#### **4.2 Норми проектування інженерно-технічних об'єктів господарювання.**

Заходи щодо підвищення стійкості об'єктів господарювання здійснюють відповідно до вимог Норм проектування інженерно-технічних заходів, які починають діяти після прийняття постанови урядом. Вимоги норм призначені для того, щоб в умовах НС:

- забезпечити захист населення та знизити масштаби руйнувань (пожеж, затоплень, заражень);
- підвищити стійкість роботи об'єктів господарювання і галузей економіки;
- створити умови для успішного проведення робіт з ліквідації наслідків НС.

Вимоги норм проектування реалізують під час проектування та забудови міст, будування нових промислових підприємств, об'єктів енергетики, транспортних систем, систем водо- та газопостачання, а також під час їх реконструкції.

Головним документом, відповідно до якого слід планувати та здійснювати інженерно-технічні заходи цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) є «Будівельні норми і правила» (БН і П 2.00.05-90), а також «Загальні вимоги до розвитку і розміщення потенційно небезпечних виробництв з урахуванням ризику надзвичайних ситуацій техногенного походження» (Київ, НАН України, 1995). Запровадження норм проектування ІТЗ ЦЗ здійснюється диференційовано з урахуванням ролі і важливості міст і об'єктів економіки. Для цього міста поділяють на групи, а об'єкти – на категорії за такою класифікацією: міста: «Особливої групи», I, II та III груп; об'єкти господарювання: «Особливої важливості», I та II категорій. Об'єкти атомної енергетики виділяють в окрему групу.

Для «категорійних» міст і об'єктів з метою реалізації ІТЗ встановлено дві зони: можливих слабких руйнувань, де очікується (за прогнозом) надмірний тиск у фронті повітряної УХ  $P_{\phi} = 10\text{--}30$  кПа; можливих сильних руйнувань, у межах якої очікується  $P_{\phi} 30$  кПа.

Межа зони сильних руйнувань для міст «особливої», I, II, III груп пролягає в межах проектної забудови міста (ПЗМ), а зони слабких руйнувань – на відстані 7 км від межі проектної забудови міста (ПЗМ приймають відповідно до затвердженого генерального плану забудови на розрахунковий період). Для об'єктів «особливої важливості» межа зони сильних руйнувань пролягає на відстані 3 км від межі проектної забудови об'єкта; слабких – 10 км

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі приведені результати теоретичних досліджень та вирішена науково-технічна задача, що полягає в моделюванні електричних та теплових характеристик підземних кабельних ліній електропередач. На базі отриманих результатів зроблено наступні висновки:

1. Показано, що у випадку двостороннього заземлення екранів втрати потужності в екранах, залежать від величини струму в жилі, площі перетину екрана, діаметра кабелю і відстані між кабелями.

2. Розглянуто розподіл густини електричного струму в окремо взятій кабельній лінії, прокладеної в трубі. Показано, що в такому випадку має місце несиметрія струмів в жилах і екранах в зв'язку з складним взаємним впливом провідних частин кожного кабелю і впливом кабельних ліній між собою.

3. Досліджено температурні поля в кабельному каналі при різних режимах навантаження. Наведено залежності робочих струмів кабельних ліній від кількості працюючих ліній, від температури і теплофізичних характеристик навколишнього масиву землі. Показано, що в холодну пору року передавану потужність мережі можна збільшити.

4. Визначено температурні поля в кабельному колекторі в залежності від укомплектування. Встановлено, що для ефективного використання внутрішнього простору підземних мереж можна застосовувати зменшений за габаритами колектор, або використовувати дворівневу прокладку кабелів зі зменшеним струмовим навантаженням

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Илюшин Н.И. Снижение затрат при капитальном строительстве кабельных сооружений // Кабель – news. – 2014. – №1 – С. 34 – 35
2. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – 2-е изд. Перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
3. Фридкин И.А. Прокладка силовых кабельных линий. – М.: Энергия, 1976. – 96 с.
4. Барнес С. Силовые кабели. Конструкция, монтаж и эксплуатация. Пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – 287 с.
5. Канискин В.А., Костенко Э.М., Таджибаев А.И. Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации // Электричество. – 1995. – №5 – С. 19–23.
6. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Глава 2.3. Кабельные линии напряжением до 220 кВ. М.: Стандартинформ, 2003. 557 с.
7. Зевин М. Б., Трифонов А. Н. Электромонтер - кабельщик. М.: Высшая школа, 1984. 239 с.
8. Лавров Ю.А. Кабели 6-35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности // Новости электротехники. 2006. - № 6 (42).
9. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ. 1959. 356 с.
10. Технические свойства полимерных материалов: Учеб. - Справ. пособие // В.К. Крыжановский [и др.] – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.
11. Расчет допустимых нагрузок одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией / Э. Т. Ларина [и др.] // Электротехника. – 1991. – № 3. – С. 28–31.



- Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
12. Бернхардт Э. Переработка термопластических материалов. – М.: Химия, 1965. – 747 с.
13. Camerlingh Onnes H. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series // *Comm. Leiden.* — 1901. — No 71. — P. 1 – 25.
14. Mayer J.E. The statistical mechanics of condensed systems// *J.Chem. Phys.* – 1937. – V.5. – No.1. – P. 67-74.
15. Баскаков А.П. Теплотехника. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
- Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. – М.: Энергоатомаудит, 1984. – 368 с.
16. Neher J.H., McGrath M.H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems // *AIEE Transactions – Power Apparatus and System.* Part III. 1957. V. 76. P. 752–772.
17. George J. Anders. Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications// *IEEE Press power engineering series.* –1997 P. 428.
18. Electric Cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Section 1: General. IEC Standard 287– 1– 1 (1994– 12).
19. Electric Cables – Calculation of the current rating – Part 2: Thermal resistance – Section 1: Calculation of the thermal resistance. IEC Standard 287–2–1 (1994–12).
20. Electric Cables –Calculation of the current rating – Part 3: Section on operating conditions –Section 1: Reference operating conditions and selection of cable type. IEC Standard 287–3–1 (1995–07).
- Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло - и массообмена. М.: Наука, 1984. 285 с.

21. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1987. 287 с.  
Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1979. 541 с.
22. Григорьева М.М., Кузнецов Г.В. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий // Известия Томского политехнического университета. – 2010. Т.316. №4. С. 34–38.
23. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. 2011. V. 31. P. 772–778.
24. Lyall J.S., Nourbakhsh G., Zhao H.C., Underground power cable environment on line monitoring and analysis // Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting. – Washington. 2000. P. 457–462.
25. Tai-Tien Electric Co., LTD., XLPE Power Cable // Handbook. – 1997. P. 95
26. Навалихина Е.Ю. Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале // Научнотехнический вестник Поволжья. – 2013. №3. С. 38–41.