

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

О.Г. Кессаєв, О.В. Голик, Ю.Г. Гонтар, Л.А. Щебенюк

**ЕЛЕКТРИЧНА НАВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ СИЛОВИХ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ**

Навчально-методичний посібник
для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол №1 від 15.02.2024 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2024

УДК 621.315.2 (075)

ББК

Рецензенти:

В. Є. Плюгін – д-р техн. наук, професор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

О. П. Лазуренко – канд. техн. наук, професор НТУ «ХП»

Кессаєв О.Г.

К 36 Електрична навантажувальна здатність силових високовольтних кабелів: навч.-метод. посіб. / Кессаєв О.Г., О.В. Голик, Ю.Г. Гонтар, Щебенюк Л.А. – Х. : НТУ «ХП», 2024. – 162 с.

Викладено основи визначення навантажувальної здатності силових кабелів. Матеріал проілюстровано практичними прикладами, до всіх розділів наведено необхідні задачі та вправи. Посібник складається з 6 розділів, кожний з яких включає теоретичну частину, завдання та вправи з прикладами розв'язку завдань з дисциплін “Кабельна техніка”, “Розрахунок та технологія виготовлення силових кабелів та проводів” та “Електромагнітні та теплофізичні процеси в електроізоляційних та кабельних системах”.

Для студентів ЗВО електроенергетичних спеціальностей денної та заочної форм навчання, інженерно-технічних працівників.

Табл. 33. Іл.101. Бібліогр. 13

УДК 621.315.2(075)

ББК

ВСТУП

Електроенергетика України об'єднує енергогенеруючі потужності та розподільні мережі регіонів України, пов'язані між собою системними лініями електропередачі напругою 220–750 кВ. Об'єднана енергетична система (ОЕС) забезпечує централізоване електропостачання внутрішніх споживачів, взаємодію з енергосистемами інших країн, експорт і транзит електроенергії.

Магістральні електричні мережі – це одна з основних складових ОЕС України, які налічують більше двадцяти тисяч кілометрів, з них на напругу (400–750) кВ – орієнтовно чверть, на 330 кВ – половина, інші на напругу (220–110) кВ.

Сучасні електроенергетичні системи настільки складні і інтегровані, що аналіз їх надійності як єдиного цілого спеціалісти визнають практично неможливим. Тому загальний підхід до аналізу надійності функціонування цих систем – це розділення на підсистеми: електричні станції, системи генерації, електричні мережі, лінії електропередачі, електроенергетичні системи об'єднані з лініями зв'язку, підстанції і пункти переключень.

Принципова схема передачі електроенергії для замкнутої системи (рис. 1) містить генератори електростанцій (ЕС). Оскільки генератори виробляють електроенергію на напруги 6, 10 і 20 кВ, за яких передача на відстані більше чотирьох чи п'яти кілометрів не є економічно доцільною, залежно від довжини лінії передача відбувається на напругу (35, 110, 150, 220, 330, 500, 750) кВ, що забезпечують підвищуючі трансформатори і високовольтна лінія ВЛ (переважно повітряна). Подальша система розподілу електроенергії між її споживачами включає розподільчі пристрої з потрібною трансформацією, які пов'язані мережею силових кабельних ліній КЛ.

Силові кабелі є невід'ємною частиною систем споживання електроенергії:

– для введення і виведення потужності до високовольтних трансформаторів ліній електропередачі;

- для схемних з'єднань на генеруючих електростанціях, розподільних підстанціях та підприємствах, які споживають електроенергію;
- для заміни повітряних ЛЕП на кабельні в місцях щільної забудови;
- для прокладання кабельних ліній у місцях, де повітряні ЛЕП мають перетинати значні перешкоди: великі річки, озера, водосховища тощо.

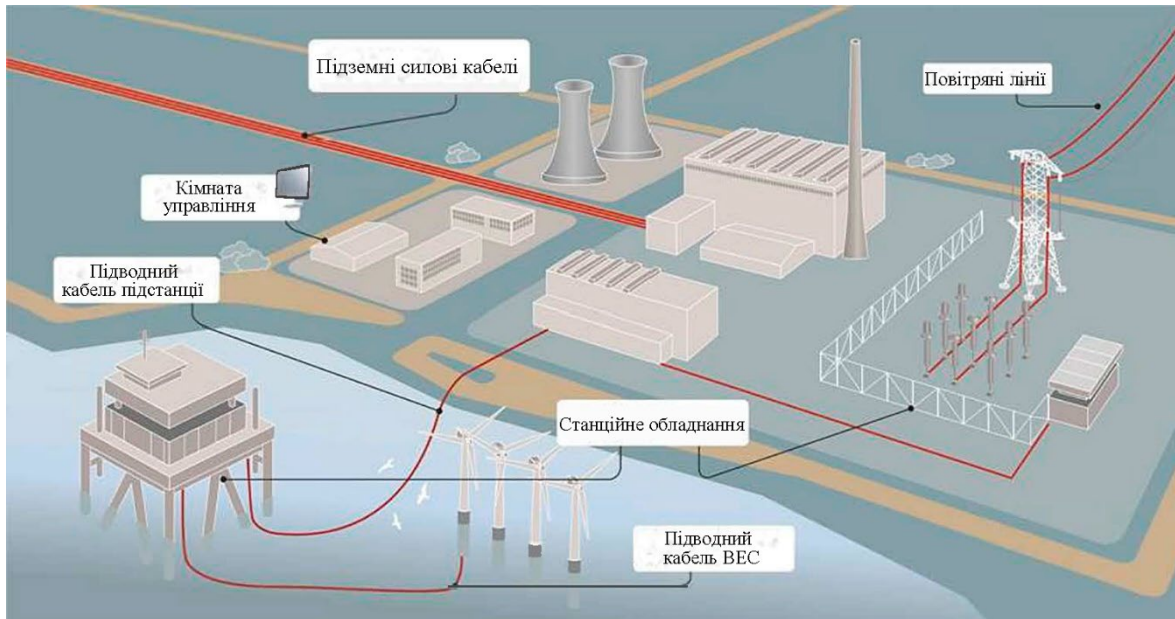


Рисунок 1 – Схема електроенергетичні системи

Навантажувальна здатність силового кабелю є його основною технічною характеристикою, оскільки вона визначає обмеження потужності, яка може бути надана всім користувачам, підключеним до цього кабелю. Наступною, не менш важливою характеристикою є *надійність кабелю*, оскільки його відмова означає припинення споживання електроенергії всіма підключеними до нього користувачами.

Саме забезпеченню достатнього рівня цих двох характеристик за умови прийнятних економічних витрат присвячена вся діяльність у галузі силової кабельної техніки.

В більшості названих електроенергетичних підсистем електроізоляційні пристрої є найбільш вразливими елементами,

показники надійності яких мають бути серед основних врахованих при аналізі ефективності функціонування цих підсистем.

Альтернативою силових кабелів в електроенергетичних системах є повітряні лінії. Кабелі, як елементи цих систем, забезпечують значно вищу надійність в експлуатації, ніж повітряні лінії. Наприклад, частота відмов ліній електропередачі до 10 кВ включно (табл. 1) в два з половиною рази менша в порівнянні з повітряними лініями в перерахунку на 100 км.

Показники в табл. 1 для повітряних ліній стосуються статистично стабільних відмов. Коефіцієнт статистично нестабільних відмов, на який може бути помножений відповідний показник, набуває значення до 7 і більше. Це пов'язано із захищеністю кабельних ліній від погодних умов та інших подібних випадкових факторів. Відповідно суттєво меншим є для кабельних ліній і середній термін планового профілактичного обслуговування.

Надійність в експлуатації, компактність при прокладанні в районах щільної забудови та великої кількості комунікацій роблять кабельні лінії конкурентоспроможними порівняно з повітряними лініями електропередачі.

Таблиця 1 – Показники надійності елементів ліній електропередачі [1]

Вид лінії	Напруга, кВ	Параметр потоку відмов на 100 км, рік ⁻¹	Параметр потоку відмов на лінію, рік ⁻¹	Середній термін профілактики, годин
Повітряна	до 1	25	–	6
	6-10	7,6	–	8
Кабельна	до 1	10	0,02	2,0
	6-0	7,5	0,005	2,0

За даними табл. 2 витрати користувача на кабельну лінію з урахуванням експлуатаційних витрат виявляються меншими, ніж на повітряну лінію, аж до напруги 110 кВ [1]. Для цих ліній вже сьогодні витрати користувача на високовольтну кабельну лінію з урахуванням

експлуатаційних витрат виявляються меншими, ніж на повітряну лінію. Відповідна тенденція у часі існує і для надвисоких напруг.

Таблиця 2 – Співвідношення вартості повітряних та підземних кабельних ліній електропередачі [1]

Показник вартості	Німеччина 110 кВ 30 МВА		Данія 50/60 кВ 20–40 МВА		Франція 12/20 кВ 1,5 МВА		Швеція 11 кВ 23–80 МВА	
	повітр.	підзем.	повітр.	підзем.	повітр.	підзем.	повітр.	підзем.
Вартість монтажу в \$1000 на км	318	1780	103	184	41	47	23	24
Відношення вартості монтажу підземн. та повітр. ЛЕП	5,60		1,79		1,14		1,06	
Вартість експлуатації за строк служби в \$1000 на км	766	293	78	42	39	31	14	6
Сумарна вартість в \$1000 на км	1084	2083	181	226	80	78	37	30
Відношення сумарної вартості підземн. та повітр. ЛЕП	1,91		1,25		0,97		0,83	

Отже, основними технічними характеристиками силового кабелю є його навантажувальна здатність і надійність, оскільки саме вони визначають можливість споживання всіма користувачами, підключеними до цього кабелю. Разом з економічними витратами на його виробництво, монтаж та експлуатацію ці технічні характеристики визначають його ринкову конкурентоспроможність.

Традиційною ізоляцією силових кабелів півтора століття була паперова, імпрегнована композиціями на основі мінерального масла (ПМ). ПМ актуальна і дотепер. Вперше виготовлені в 1890р. англійською фірмою Callender's Cable and Construction, вони і сьогодні переважають в кабельній промисловості Великої Британії.

Окрім того, для найбільш складних умов прокладання також застосовують високовольтні силові кабелі з ПМ-ізоляцією.

Тим не менш спостерігається масова тенденція переходу від цієї традиційної ПМ-ізоляції до сучасної твердої полімерної (рис. 2) переважно зшитого поліетиленової (ЗПЕ-ізоляції), що має ряд технологічних і експлуатаційних переваг, але суттєво відрізняється за електрофізичними і механічними властивостями, відповідно методами випробувань і діагностики цих кабелів як у виробництві, так і в експлуатації.

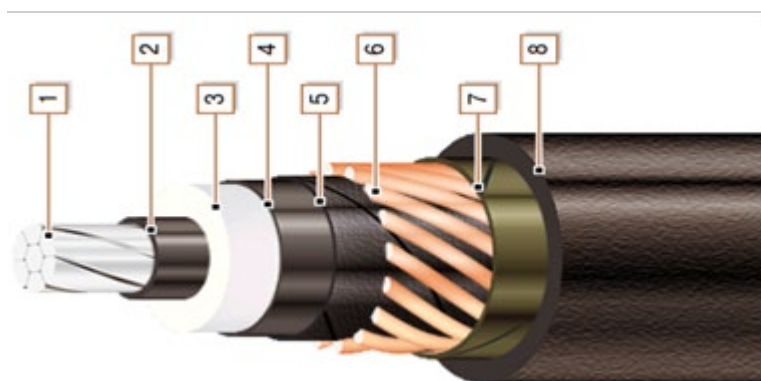


Рисунок 2 – Сучасний кабель середньої напруги, ізольований зшитим поліетиленом (3), жила алюмінієва кругла (1), напівпровідні екрани по жилі і по ізоляції (2), (4), неброньований, в захисних покриттях: напівпровідна водопоглинаюча стрічка (5), мідний проволочний екран (6), алюмополімерна оболонка (7), зовнішня полімерна оболонка (8)

Саме такого типу кабель, але високої напруги постійного струму ± 200 кВ, був прокладений в 2010 р. в США через залив Сан-Франциско на глибині 1,8 м і є першим у світі підводним ЗПЕ-кабелем (довжина лінії 88 км, потужність 400 МВт).

До цього часу ЗПЕ-кабелі для прокладання в повітрі і ґрунті вже були досить широко застосовними і виготовлялись зокрема і в Україні, але досвід використання їх принципово інноваційної системи ізоляції поставив цілий ряд запитань, на які не було відповіді, що відображено в низці міжнародних нормативних документів [1, 3, 12, 13]. Особливо ці запитання стосувались методів випробувань і діагностики цих кабелів як у виробництві, так і в експлуатації, зумовлених значним підвищенням

допустимої температури нагріву (90 °С), відповідно підвищення пропускної здатності, додаткових вимог до умов прокладання.

Прийняття оптимальних технічних рішень при виготовленні, реалізації і експлуатації цих інноваційних для кабельної техніки виробів має спиратись на одночасне використання ряду перевірених практикою математичних моделей з конструктивними, електрофізичними, тепловими і економічними параметрами.

Така систем математичних моделей може бути названою багатовимірною, оскільки основні конструктивні, електрофізичні, теплові і економічні параметри кабелю мають бути задані як змінні, визначені в технічно і економічно доцільних діапазонах.

Прикладом є відомі моделі радіального електричного і теплового полів в ізоляції кабелю з мідною жилою несегментальної конструкції і високим коефіцієнтом заповнення перерізу жили з огляду на технологію гарячого пресування ізоляції. Ілюстрацію відповідних результатів розрахунку наведено на рис. 3.

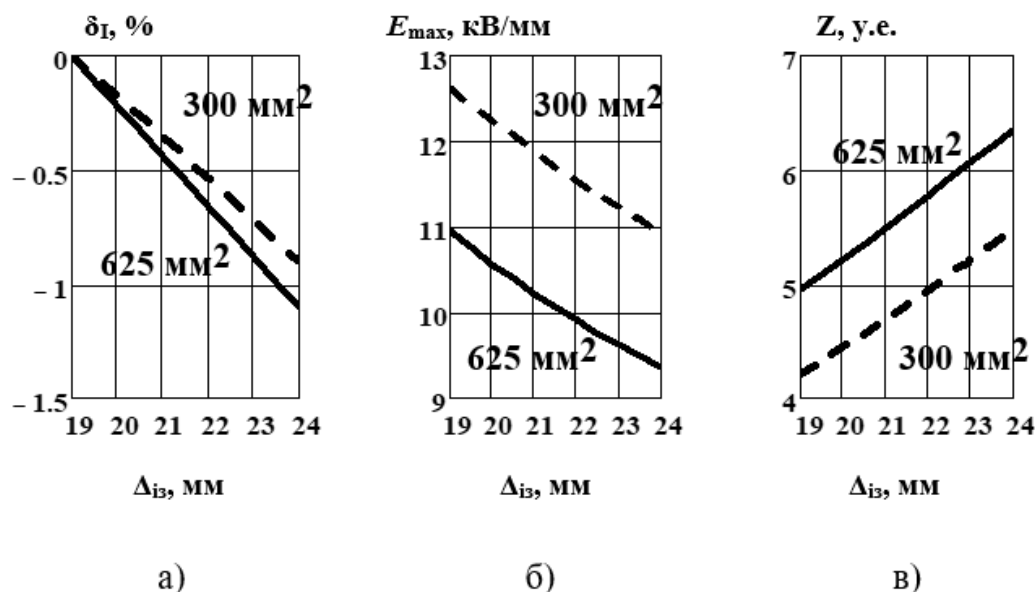


Рисунок 3 – Ілюстрація результатів розрахунку трьохвимірної моделі залежності від товщини ізоляції ЗПЕ-кабелю на напругу 220 кВ за використання відомих моделей:

- а) відносна зміна номінального струму δI ; б) максимальна напруженість електричного поля E_{max} ; в) затрати на матеріал ізоляції Z , у.е

Видно, що суттєве зменшення E_{max} (відповідно – підвищення надійності ізоляції) шляхом збільшення товщини ізоляції

супроводжується зменшенням номінального струму і значним збільшенням витрат на матеріал ізоляції. А використання нормативних рекомендацій [7] про збільшення поперечних перерізів жили підвищує номінальний струм, суттєво підвищує надійність ізоляції, збільшуючи витрати на матеріал ізоляції. Спільне вирішення трьох відомих моделей свідчить про нелінійну залежність δ_1 (Δ_{i3}), нелінійність якої суттєво залежить від площі перерізу жили.

Але якщо згадати, що використання більших поперечних перерізів жили значно зменшує їх електричний опір, зменшуючи втрати в жилі, то в процесі багаторічної експлуатації виникає можливість введення в систему рівнянь параметру економії від втрат в експлуатації та кількісно оцінити рекомендацію діючого міжнародного стандарту [7]: «для XLPE і EPR ... економія собівартості для більшого розміру провідника, ніж вибраний за тепловими обмеженнями, досягає 40 %».

Таким чином, спираючись на технічні рішення за допомогою одночасного використання перевірених практикою математичних моделей з конструктивними, електрофізичними, тепловими і економічними параметрами при запровадженні інноваційних для кабельної техніки виробів можна забезпечити попередню оптимізацію цих рішень. Перевірка їх прийнятності має бути підтверджена випробуваннями.

Промисловому застосуванню інноваційних ЗПЕ-кабелів передують так звані **передкваліфікаційні випробування**, що включають перевірку товщини ізоляції (Δ_{i3} на рис.3); **випробування грозовою імпульсною напругою** (має значення E_{max} на рис.3), **випробування циклічним нагріванням** за гранично допустимої температури і під номінальною напругою. Передкваліфікаційні випробування передбачені на дослідних зразках інноваційного кабелю і передують виготовленню його промислових партій.

На рис. 4 наведено принципову схему так званих передкваліфікаційних випробувань високовольтного ЗПЕ-кабелю.

Промислове масове виготовлення інноваційних ЗПЕ-кабелів базується на результатах типових випробувань промислово виготовлених дослідних партій, що включають вісім електричних випробувань

включно з випробування циклічним нагріванням за гранично допустимої температури і під номінальною напругою і сім механічних випробувань, що включають перевірку конструкції кабелю і визначення механічних характеристик ізоляції і оболонки до і після старіння.

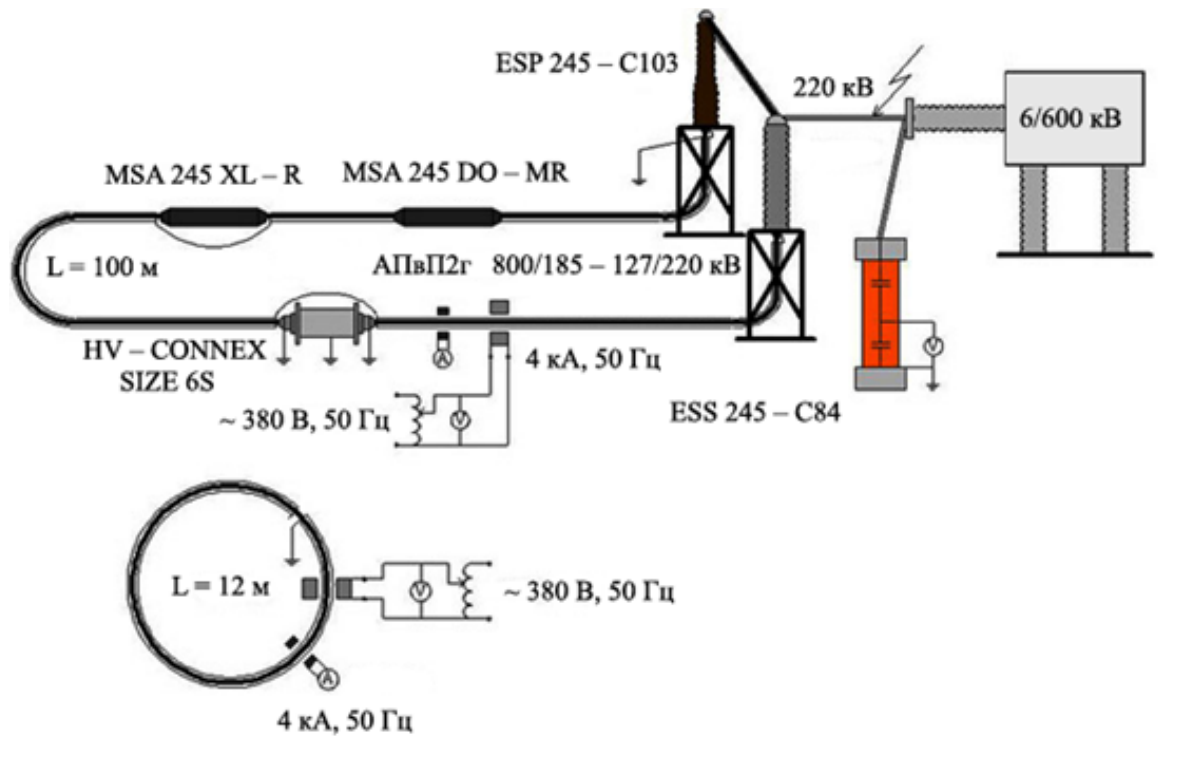


Рисунок 4 – Принципова схема випробування циклічним нагріванням за гранично допустимої температури і під номінальною напругою високовольтного ЗПЕ-кабелю: цикл нагрівання до 90–95 °С впродовж 8 годин, витримка 2 години, охолодження 16 годин під напругою $U_{\text{випр}} = 1,7U_0$; цикли впродовж 1 року

Найбільш поширені у практиці розгалужених кабельних мереж трижильні кабелі на напругу 1; 6 та 10 кВ. На рис. 5 показані такі кабелі, призначені для прокладення за умов можливої дії на кабель механічних зусиль. Ці кабелі призначені для передачі і розподілу електричної енергії змінного струму в мережах з будь-яким режимом нейтралі при стаціонарному прокладанні і у мережах постійного струму. Їх виготовляють з мідними або алюмінієвими жилами всіх стандартних перерізів у діапазоні 35–240 мм².

На рис.5 наведено конструкції силових кабелів з поясною ізоляцією заземлений захисний елемент яких, будь-то металева оболонка, броня або електропровідний екран, замкнені навколо всіх струмопровідних

жил. Тому картина електричного поля має складний вигляд, для якого характерна присутність в деяких областях ізоляції так званої **тангенційної складової напруженості електричного поля**, тобто напруженості, спрямованої по дотичній до шарів ізоляції або до її поверхні.

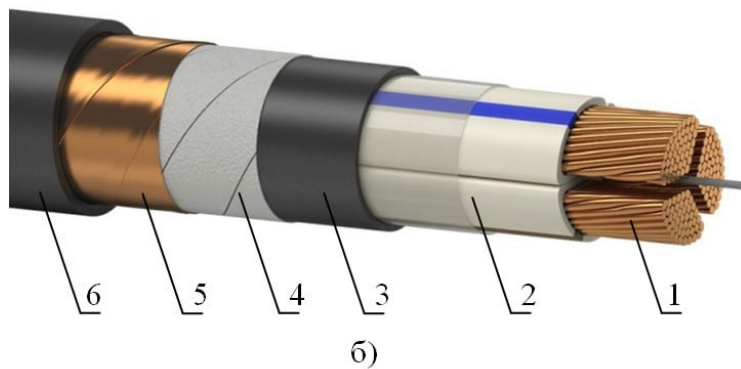
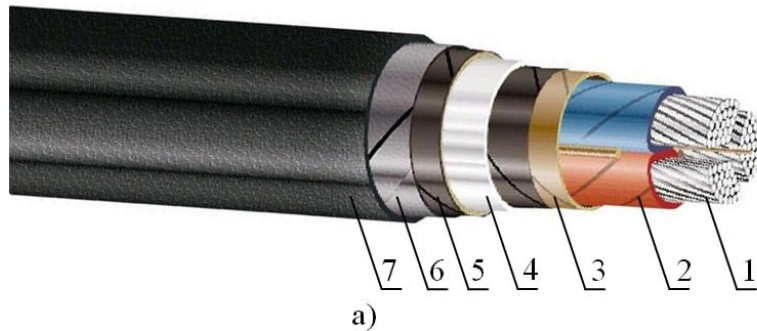


Рисунок 5 – Трижильні броньовані силові кабелі на напругу 1–10 кВ:

а – з паперовою імпрегрованою ізоляцією: 1 – алюмінієва струмопровідна жила; 2, 3 – ізоляція; 4 – алюмінієва оболонка; 5 – подушка під броню; 6 – броня із двох сталевих стрічок; 7 – зовнішнє покриття;

б – з пластмасовою ізоляцією: 1 – мідна струмопровідна жила; 2 – ізоляція жили (ПВХ-пластикат або зшитий поліетилен); 3 – поясна ізоляція; 4 – екран з напівпровідного паперу; 5 – броня із стрічок; 6 – захисне покриття з ПВХ-пластикату, що не поширює горіння

Відомо, що електрична міцність ізоляції відносно до тангенційної напруженості в декілька разів менша за електричну міцність тієї ж ізоляції відносно до напруженості, напрямленої нормально до її шарів.

Тому компактна конструкція з поясною ізоляцією не застосовується для кабелів на напругу більшу 10 кВ.

Рис. 5 є ілюстрацією того, що особливу роль в конструкції кабелю мають захисні покриття поверх осереддя, що складається з системи електродів (жила – заземлений елемент) і системи ізоляції між ними. Вимоги до захисних покриттів залежать, в першу чергу, від умов прокладання, отже є відносно універсальними. При цьому вплив конструкції захисних покриттів на пропускну здатність кабелю може переважати вплив конструкції його активної частини.

Це стосується і інноваційних ЗПЕ-кабелів, але ряд їх особливостей підсилюють саме вплив конструкції захисних покриттів на пропускну здатність. Найочевидніші:

- по-перше, відносно більші значення площі перерізу жили, як відповідно до рекомендацій згаданого вище діючого міжнародного стандарту [7], так і ширшого застосування алюмінію, як матеріалу жили;

- по-друге, відсутність у більшості конструкцій ЗПЕ-кабелів для прокладання в землі масивних випресуваних металевих оболонок, які ефективно відводять тепло в оточуюче середовище.

Разом із високим, порівняно із традиційним коефіцієнтом заповнення перерізу багатопроволочної жили металом провідника (з огляду на технологію гарячого пресування ізоляції) і високою допустимою температурою ізоляції вплив конструкції захисних покриттів на пропускну здатність ЗПЕ-кабелю вимагає додаткового аналізу порівняно із рекомендаціями для традиційних кабелів.

Завдання:

1. У системі спостереження за відмовами силових кабелів США [1] кількість відмов оцінюють для одиниці довжини (100 км) та за один рік. Тобто оцінюють показник надійності параметра потоку відмов Ω , який використовують і користувачі силових кабелів. Для кабелів середньої напруги з паперовою ізоляцією це число протягом десятків років стабільне і дорівнює $1,1\text{--}1,2 \text{ рік}^{-1}$ на 100 км кабелю. Оцінити середнє напрацювання на відмову для таких кабельних ліній довжиною 5–10 км.

Рішення. За стабільного потоку відмов ймовірність безвідмовної роботи описують експоненційним законом $p(t) = \exp(-\lambda t)$, в якому значення інтенсивності відмов λ дорівнює параметру Ω . За послідовного з'єднання елементів для довжини 5–10 км кількість елементів n становить 10–20. Тоді середнє напрацювання $t_{\text{сер}}$ можна знайти з

$$p(t)^n = \exp(-\Omega t_{\text{сер}}),$$

де $p(t) = 0,37$ [2].

Звідки середнє напрацювання на відмову для таких кабельних ліній довжиною 5–10 км становить від 8 до 18 років:

$$t_{\text{сер min}} = -\ln(0,37) \cdot 10/1,2 = 8,28;$$

$$t_{\text{сер max}} = -\ln(0,37) \cdot 20/1,1 = 18,08.$$

2. Для кабелів із термопластичною поліетиленовою ізоляцією за середніх напруг параметр потоку відмов зростає у часі [1], тому їх застосовують тільки для напруги до 1 кВ. Для кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією за середніх напруг параметр потоку $\Omega \approx 0,4 - 0,6$ рік⁻¹ на 100 км кабелю [1]. Оцінити середнє напрацювання на відмову для відповідних кабельних ліній довжиною 3–15 км, якщо $p(t) = 0,5$.

3. Для визначення питомого електричного опору ρ дроту з нейзиберу в умовах експерименту виміряли електричний опір $R = 1,3$ Ом відрізка проволочки довжиною $l = 5$ м і діаметром $D = 1,2$ мм. Обчислити ρ .

Рішення. Площа перерізу $F = \pi \cdot D^2/4$:

$$F = \pi \cdot 1,2^2 \cdot 10^{-3}/4 = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Електричний опір $R = \rho \cdot l / F$:

$$\rho = R \cdot F / l = 1,3 \times 1,13 \times 10^{-6} / 5 = 2,94 \times 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

4. Результати вимірювань електричного опору відрізків круглої проволочки наведено у таблиці. Обчислити відповідні значення ρ . Визначити матеріал дроту.

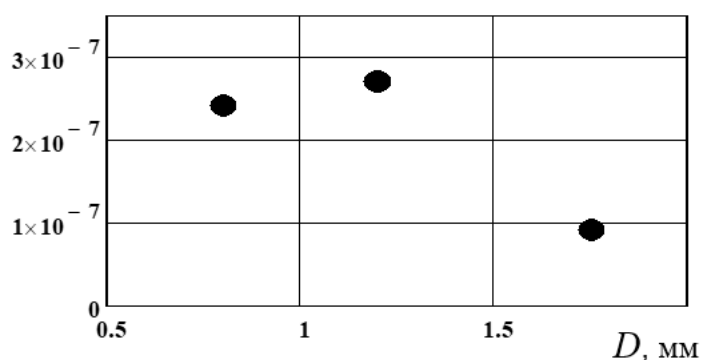
Довжина l , м	Діаметр D , мм	Електричний опір R , Ом	Площа перерізу F , мм ²	Питомий електричний опір ρ , Ом · м	Матеріал
7,3	0,80	4			
60	1,75	2,4			
25	1,20	0,38			
3,5	0,80	0,12			
8,6	1,75	0,061			

5. До умови задачі 3 додати те, що на діаметр дроту завжди є допуск $\pm \Delta d$. Визначити діапазони можливих значень питомого електричного опору ρ проволочки з нейзильберу за умовами експерименту для трьох відрізків проволочки (3 – № 1, 4 – № 1, № 2), якщо $\Delta d = \pm 0,05$ мм. Результати подати графічно і зробити висновки щодо впливу можливого нормованого відхилення діаметра проволочки від номінального на експериментально визначене значення ρ .

Рішення. $\rho_{\min} \cdot F_{\min} = \pi(1,2 - 0,05)^2 \cdot 10^{-3}/4 = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;

$$\rho = R \times F / l = 1,3 \cdot 1,04 \cdot 10^{-6} / 5 = 2,70 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

ρ_{\min} , Ом · м



Відомо, що питомий електричний опір проволочки з нейзильберу знаходиться в діапазоні значень від $1,5 \cdot 10^{-7}$ Ом · м до $4,9 \cdot 10^{-7}$ Ом · м. Одержане значення $2,70 \cdot 10^{-7}$ Ом · м знаходиться в цьому діапазоні.

1. РОЗРАХУНОК НОМІНАЛЬНОГО СТРУМУ

1.1. Номінальний струм силового кабелю

Кількісними показниками навантаження в системах електропостачання є потужність та струм, які в трифазній системі пов'язані співвідношенням

$$P = I \cdot U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi,$$

де U – лінійна напруга.

Навантаження силових кабелів має бути обмежене максимальною допустимою температурою ізоляції. Очевидно, що температура ізоляції залежить не тільки від навантаження кабелю, а й від умов експлуатації та часу навантаження.

Тому, як одну з основних технічних характеристик силового кабелю, використовують номінальний струм (*current rating*) – гранично допустимий струм у нормованих умовах експлуатації (100% *load factor*). Такими нормованими умовами є:

- 1) вид довкілля (грунт, повітря, спеціальні кабельні споруди тощо);
- 2) нормований параметр теплопередачі у довкілля (питомий тепловий опір ґрунту, коефіцієнт теплопередачі з поверхні кабелю у повітря тощо);
- 3) нормована температура довкілля;
- 4) стаціонарний режим навантаження.

Вираз «стаціонарний режим» означає середній тривалий незмінний струм (100% коефіцієнт навантаження), за якого встановлюється максимальна допустима температура жили Θ_n за незмінних умов навколишнього середовища [3].

При виборі та проектуванні кабелів як **основні показники пропускної здатності** використовують:

- струм у стаціонарному, найбільш навантаженому робочому режимі (номінальний струм) I_n ;
- струм у режимі нормативно допустимого перевантаження.

Струм I_n не повинен перевищувати допустимий необмежено довго струм $I_{доп}$, який одержують у результаті розрахунку в стаціонарному тепловому режимі.

Для всіх традиційних конструкцій кабелів змінної напруги і кабелів постійної напруги до 5 кВ, прокладених у землі, в повітрі, в блоках, у жолобах чи сталевих трубах, з урахуванням і без урахування особливостей умов прокладання (часткового висихання ґрунту та ін.) розрахунок I_n є нормованою процедурою [3].

Для інноваційних конструкцій кабелів I_n визначають розрахунком з наступною експериментальною перевіркою результатів. При цьому основним критерієм є максимальна допустима температура Θ_n жили за незмінних умов навколишнього середовища. Цю температуру Θ_n і цей струм I_n у практиці називають номінальними.

Задачі та вправи:

1. Марка кабелю є буквено-цифровим кодом. Перша літера «А» показує на наявність жили з алюмінію. Мідна жила в марці ніяк не позначається. Після буквеного коду в стандартному позначенні кабелю розташований цифровий код, в якому послідовно вказані: кількість жил, переріз жили у квадратних міліметрах, номінальна напруга у кіловольтах. Обчислити електричний опір постійному струму жили кабелю ААБ2лШв 1×240 –1.

2. Обчислити електричний опір постійному струму за нормальної температури жили кабелів марки: СГ 3×35-6; АВБ2лШв 3×70-1; ВБ2лШв 4×70-1; ААБ2лШв 3×35-1.

3. Обчислити електричний опір постійному струму за температури 60 °С жили кабелів марки: СГ 3×35-6; АВБ2лШв 3×70-1; ВБ2лШв 4×70-1; ААБ2лШв 3×35-1.

4. Якщо за відомим співвідношенням $P = I \cdot U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi$, обчислити значення I , то одержимо так званий розрахунковий струм I_p . На практиці значення I_p порівнюють з гранично допустимою величиною $I_{\text{доп}}$ для різних площ перерізу, матеріалу жили і умов прокладання, наведених у нормативних документах, наприклад у [4].

Для заданих P , U , $\cos\varphi$ обирають такий кабель, для якого $I_p \leq I_{\text{доп}}$. Знайти за [3] орієнтовне значення $I_{\text{доп}}$ для кабелів марки: СГ 3×35-6; АВБ2лШв 3×70-1; ВБ2лШв 4×70-1; ААБ2лШв 3×35-1.

1.2. Модель радіального теплового потоку

В основу розрахунку I_H покладено аналогію процесів тепло-масообміну в кабелях, зокрема процесів перенесення зарядів і процесу перенесення тепла. Відповідні моделі однакові за своєю структурою, вони включають базову різницю потенціалів (електричних чи теплових), потік, опір, провідність.

Відповідно, всі інші елементи моделей, що описують той чи інший процес, є похідними від цих величин, і математичний опис того чи іншого процесу в системах диференціальних рівнянь є досить універсальним та уніфікованим [1, 3].

У циліндричних координатах (r, θ, z) , найбільш прийнятних для опису процесів тепломасообміну в кабелях, для потенціалу φ застосовують рівняння Пуассона:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1.1)$$

в якому, якщо потенціал залежить тільки від радіуса (радіальне поле), другий і третій доданки в лівій частині дорівнюють нулю, то:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0; \quad (1.2)$$

$$\int \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0; \quad (1.3)$$

$$r \frac{\partial \varphi}{\partial r} + A = 0, \quad (1.4)$$

де A – постійна інтегрування (за умови, що $r = r_1$, $\varphi = \varphi_0$ і при $r = r_2$, $\varphi = 0$ ($r_1 < r_2$), дорівнює $A = \varphi_0 / \ln \frac{r_2}{r_1}$ і відповідно градієнт потенціалу обернено пропорційний до радіуса:

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \varphi_0 / r \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1.5)$$

Ця модель є основною розрахунковою моделлю, що використовується в кабельній техніці для опису процесів перенесення через однорід-ну речовину в радіальному полі:

– зарядів через ізоляцію, для якого різниця потенціалів U в В, електричний струм I_{i3} в Кл/с, опір ізоляції на одиницю довжини кабелю:

$$R_{i3} = \rho \ln(r_2/r_1)/2\pi, \quad (1.6)$$

де ρ – в Ом·м;

– тепла через ізоляцію, для якого різниця температур τ , К; тепловий потік P , Дж/с; тепловий опір ізоляції на одиницю довжини кабелю:

$$S_{i3} = \sigma_{i3} \ln(r_2/r_1)/2\pi, \quad (1.7)$$

де σ_{i3} – в К · м /Вт

Відповідно до моделі стаціонарного теплового балансу тепловий опір S – це коефіцієнт пропорційності між різницею температур τ («тепловою напругою») і інтенсивністю спричиненого нею теплового потоку P . Відповідно $S = \tau/P$ і одиниця вимірювання теплового опору К/Вт (тепловий Ом).

Оскільки потенціал залежить тільки від радіуса (лише за умови необмежено довгого кабелю), а речовина, в якій відбувається процес перенесення в тій чи іншій мірі є неоднорідною, модель (1.5) зумовлює похибку тим меншу, чим названі вище умови ближчі до реальності.

Щоб уникнути суттєвої похибки, обчислення треба виконувати для інтервалів можливих значень параметрів.

Наприклад, при використанні (1.7) для кабелів з поліетиленовою ізоляцією треба використати інтервал значень питомого теплового опору ізоляції, оскільки цей параметр залежить від робочої температури кабелю (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Теплофізичні властивості ізоляційних кабельних матеріалів

Матеріал	Питомий тепловий опір, °С · м/Вт	Питома об'ємна теплоємність, кДж/м ³ · °С	Густина, кг/м ³
Паперова імпрегнована ізоляція			
в стані постачання	5,5–6,5	1715	1252
в процесі експлуатації	6,0–7,0	1715	1252
Полівінілхлоридний пластикат	5,0–6,0	1662	1350
Поліетилен ізоляційний за температури			
20 °С	3,0	2185	920
50 °С	3,5	–	–
80 °С	3,7	3562	920
Гума	5,0	1890	1400
Етиленпропіленова гума (EPR)	3,0–5,0		

Задачі та вправи

1. Обчислити (1.7) тепловий опір ізоляції кабелів за заданою маркою з урахуванням залежності $\sigma_{із}$ ізоляції від температури (табл.1.1). Параметри і результати обчислень занести до таблиці:

№ з/п	Марка кабелю	Питомий тепловий опір ізоляції $\sigma_{із}$	Радіус внутрішньої ізотерми r_1	Радіус зовнішньої ізотерми r_2	Тепловий опір ізоляції $S_{із}$
1	ААБШв 1×70-6				
2	АПВГ 3×240-1				
3	АПВВГ 3×240-6				
4	ОСБ 3×240-35				
5	АПВЕШв 1×120-10				

2. За (1.7) обчислити тепловий опір ізоляції кабелів за заданою маркою. Значення вибраних параметрів, результати обчислень і відповідні одиниці виміру занести до таблиці:

№ з/п	Марка кабелю	Питомий тепловий опір ізоляції, $\sigma_{із}$	Радіус внутрішньої ізотерми, r_1	Радіус зовнішньої ізотерми, r_2	Тепловий опір ізоляції, $S_{із}$
1	АПВБШв 1×70-6				
2	АПВГ 3×240-1				
3	АПВВГ 3×240-6				
4	АПВЕШв 1×300-110				
5	АПВЕШв 1×240-110				

1.3 Модель стаціонарного теплового балансу

Якщо процес перенесення **стаціонарний** (параметри не залежать від часу) і **лінійний**, відношення рушійної різниці потенціалів (різниця температур τ , К) до інтенсивності потоку (тепловий потік P , Дж/с) є сталим, то для потоку через будь-який елемент конструкції кабелю:

$$\tau = P \cdot S, \quad (1.8)$$

де S – тепловий опір елемента конструкції кабелю у К/Вт.

Якщо потік є радіальним, то тепловий опір елемента конструкції визначається **на одиницю довжини кабелю** формулою (1.7), де r_1 , r_2 –

радіуси еквіпотенціалей радіального поля відповідно менший і більший. Відповідно S – тепловий опір елемент конструкції кабелю у $K \cdot m/Вт$.

Для розрахунку процесів перенесення тепла в кабелі є застосовними методи розрахунку електричних ланцюгів, зокрема, якщо елемент кабелю складається з послідовно розташованих шарів різних матеріалів, то значення теплових опорів окремих матеріалів додаються.

Якщо елемент кабелю складається з паралельно розташованих «трубок силового поля» з різних матеріалів, то додаються величини, обернені до відповідних опорів.

Виходячи з основного правила, що максимальна температура ізоляції Θ_1 не повинна перевищувати допустиму (табл. 1.2), а температура зовнішньої ізотерми Θ_2 відома за умовами прокладання, за (1.8) і (1.7) встановлюють допустиму потужність теплового потоку $P_{\text{доп}}$:

$$P_{\text{доп}} \leq \tau/s = 2\pi(\Theta_1 - \Theta_2)/\sigma \ln(r_2/r_1), \quad (1.9)$$

де σ – питомий тепловий опір матеріалу між двома коаксіальними ізотермами з температурами Θ_1 і Θ_2 так, що $\Theta_1 > \Theta_2$.

Оскільки $P_{\text{доп}} = I_n^2 \cdot R_g(\Theta_1)$, де $R_g(\Theta_1)$ – електричний опір жили за температури Θ_1 , необмежено довготривалий струм у жилі, якщо тепло виділяється тільки в ній, за (1.9) допустимий струм визначає формула

$$I_n = [2\pi(\Theta_1 - \Theta_2)/R_g(\Theta_1) \sigma \ln(r_2/r_1)]^{0,5}, \quad (1.10)$$

де вираз $\sigma \ln(r_2/r_1)/2\pi$ – це тепловий опір матеріалу між двома коаксіальними ізотермами з температурами Θ_1 і Θ_2 .

Схеми моделі радіального теплового потоку та заміщення цього потоку в стаціонарному тепловому режимі наведена на рис. 1.1.

Загальна розрахункова модель, описана співвідношенням (1.10), відображає загальний принцип розрахунку тривало допустимого струму кабелю для схеми заміщення теплового потоку на рис. 1.1, де питомий тепловий опір матеріалу між ізотермами однаковий.

Для конкретного типу кабелю, який складається з різних матеріалів і конструктивних елементів, має бути визначена відповідна схема заміщення, що відповідає особливостям конструкції саме цього типу.

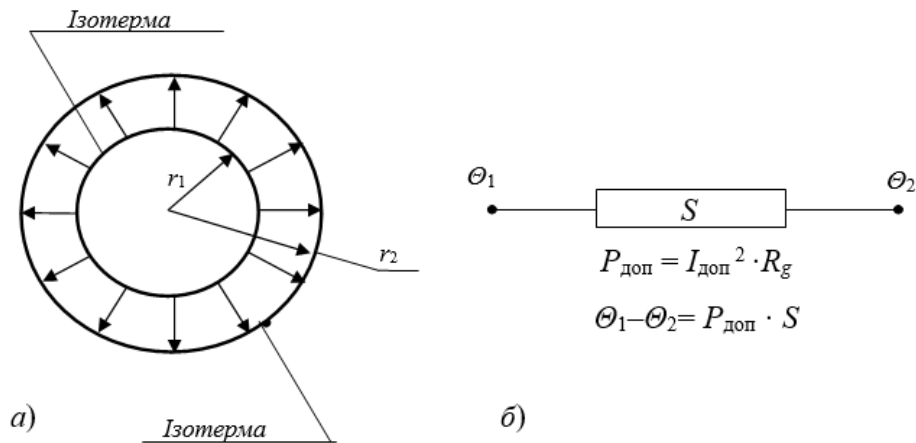


Рисунок 1.1 – Схема моделі радіального теплового потоку та схема заміщення цього теплового потоку в стаціонарному тепловому режимі:

$\theta_1, \theta_2, r_1, r_2$ – температури та радіуси ізотерм: $\theta_1 > \theta_2$; $r_1 < r_2$,
де θ_1 – допустима температура ізоляції у стаціонарному режимі;

$P_{\text{доп}}, R_g(\theta_1)$ – гранично допустима потужність теплового потоку та електричний опір жили відповідно при температурі θ_1

За схемою заміщення і на основі так званого теплового закону Ома знаходять гранично допустиму потужність теплового потоку, виходячи з того основного правила, що максимальна температура ізоляції не повинна перевищувати допустиму $\theta_1 \leq \theta_{\text{доп}}$.

Для одножильного кабелю з виділенням тепла тільки в жилі (низьковольтного, одножильного, наприклад, типу АПВГ, у ґрунті), в якому теплові опори ізоляції захисних покриттів і оточуючого середовища – це теплові опори послідовно розташованих шарів різних матеріалів з радіальним тепловим полем (рис. 1.2) (теплові опори додаються), приклад застосування моделі (1.10) дає така формула:

$$I_H = [(\theta_1 - \theta_2) / R_g(\theta_1) (S_{i3} + S_{o6} + S_{oc})]^{0,5}, \quad (1.11)$$

де $S_{i3}; S_{o6}; S_{oc}$ – теплові опори послідовно розташованих ізоляцій, захисних покриттів (оболонки) та оточуючого середовища за (1.7):

$$S_{i3} = \sigma_{i3} \ln(r_{i3} / r_{ж}) / 2\pi; \quad (1.12)$$

$$S_{o6} = \sigma_{o6} \ln(r_{o6} / r_{i3}) / 2\pi; \quad (1.13)$$

$$S_{oc} = \sigma_{oc} \ln(L_{гр} / r_{o6}) / 2\pi, \quad (1.14)$$

де $\sigma_{із}$, $\sigma_{об}$, $\sigma_{ос}$ – питомі теплові опори послідовно розташованих ізоляцій, захисних покриттів (оболонки) та оточуючого середовища у $K \cdot m/Вт$ (табл. 1.1);

$L_{гр}$ – глибина прокладання в землі.



Рисунок 1.2 – Схема заміщення теплового потоку одножильного кабелю типу АПВГ у стаціонарному тепловому режимі:

$S_{із}$; $S_{об}$; $S_{ос}$ – теплові опори послідовно розташованих ізоляцій, захисних покриттів (оболонки) та оточуючого середовища;

Θ_1 , Θ_2 – гранично допустима температура ізоляції у стаціонарному режимі та температура оточуючого середовища

У табл. 1.2 наведені максимально допустимі температури різних видів ізоляції та температури навколишнього середовища, середні для клімату України. Якщо немає конкретних значень температури оточуючого повітря чи землі, то рекомендовані значення в табл. 1.3.

Таблиця 1.2 – Максимально допустимі температури ізоляції та характерні температури навколишнього середовища

№ з/п	Вид ізоляції, середовища	Допустима робоча температура, °С
1	Паперова імпрегнована ізоляція на напругу:	
	1кВ	80
	6кВ 10 кВ і більше	80 70
2	Поліетилен:	
	термопластичний зшитий	70 90
3	Полівінілхлоридний пластикат	70
4	Гума	70
5	Ґрунт на рівні прокладання: взимку влітку	0
		15
6	Повітря	25

Таблиця 1.3 – Максимально і мінімально допустимі температури навколишнього середовища

Клімат	Температура оточуючого повітря на рівні моря		Температура землі на глибині 1 м	
	Мінімальна °C	Максимальна °C	Мінімальна °C	Максимальна °C
Тропічний	25	55	25	40
Субтропічний	10	40	15	30
Помірний	0	25	10	20

З метою забезпечення найменшої вартості кабельної лінії випускається широка номенклатура відповідних кабелів з урахуванням різних умов експлуатації та вимог користувачів. Кабелі виготовляють одножильними чи багатожильними, з мідними або алюмінієвими жилами круглими чи фасонними, з екранами чи без них, у оболонці зі свинцю, алюмінію або пластмаси, з різними захисними покриттями.

Наприклад, залежно від того, які механічні навантаження діють на кабель при прокладанні та експлуатації, застосовують різні види броні, а залежно від корозійної активності довкілля застосовують спеціальні покриття, що забезпечують захист від корозії. Відповідно до конкретної конструкції кабелю схеми заміщення теплового потоку суттєво відрізняються від найпростіших, наведених на рис. 1.1 і рис. 1.2.

Схема заміщення має бути побудована для конкретного типу кабелю. Для цього необхідно врахувати такі особливості його конструкції:

1) на схемі заміщення мають бути позначені всі суттєві для нагрівання кабелю джерела тепла і потужність, яка в них виділяється: у всіх кабелях – це втрати в жилах; у високовольтних суттєвими є діелектричні втрати в ізоляції; в одножильних кабелях – втрати в металевих захисних елементах конструкції (екран, оболонка, броня).

2) на схемі заміщення мають бути позначені всі суттєві для нагрівання кабелю теплові опори елементів конструкції. Наприклад, тепловим опором суцільної металевої оболонки можна знехтувати, оскільки питомий тепловий опір металу значно менший, ніж для діелектричного матеріалу.

3) схема заміщення має відображувати розгалуження теплового потоку, якщо такі є в конкретній конструкції. Наприклад, у кабелях з порожнистою жилою тепловий потік від жили розгалужується на дві паралельні складові: одна – через ізоляцію (S_{i3}), інша – через внутрішній канал (S_k). На схемі заміщення відповідні теплові опори мають бути з'єднані паралельно.

Наприклад, для побудови схеми заміщення теплового потоку для трижильного силового кабелю середньої напруги із зшитою поліетиленовою ізоляцією (рис. 1.3) необхідно врахувати втрати в металевих екранах і те, що теплові потоки через ізоляцію жили є паралельними, а їх сума відносно теплового потоку через захисні покриття є послідовною.

Відповідна схема заміщення подана на рис. 1.4.

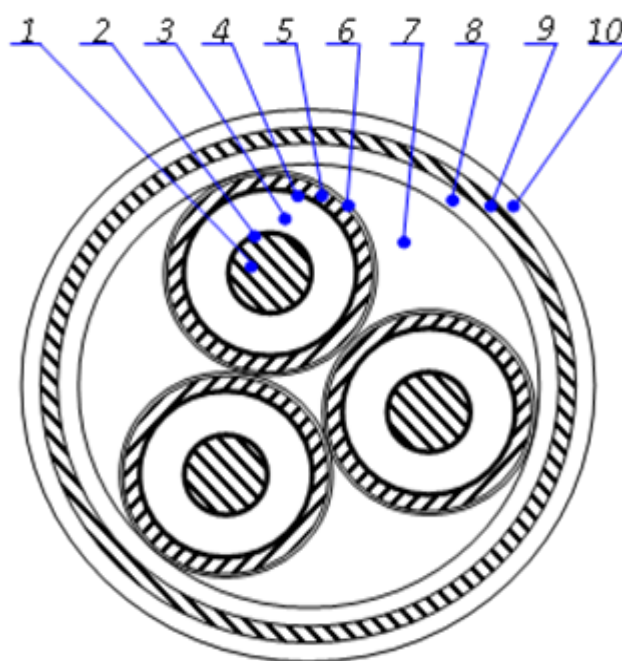


Рисунок 1.3 – Характерна для силового кабелю середньої напруги із зшитою поліетиленовою ізоляцією конструкція з окремо екранованими жилами:

- 1 – струмопровідна жила; 2 – напівпровідний екран по жилі; 3 – ізоляція;
- 4 – напівпровідний екран по ізоляції; 5 – електропровідний екран по ізоляції;
- 6 – напівпровідний екран з прогумованої тканини; 7 – міжфазне заповнення;
- 8 – подушка під броню; 9 – броня; 10 – зовнішній захисне покриття

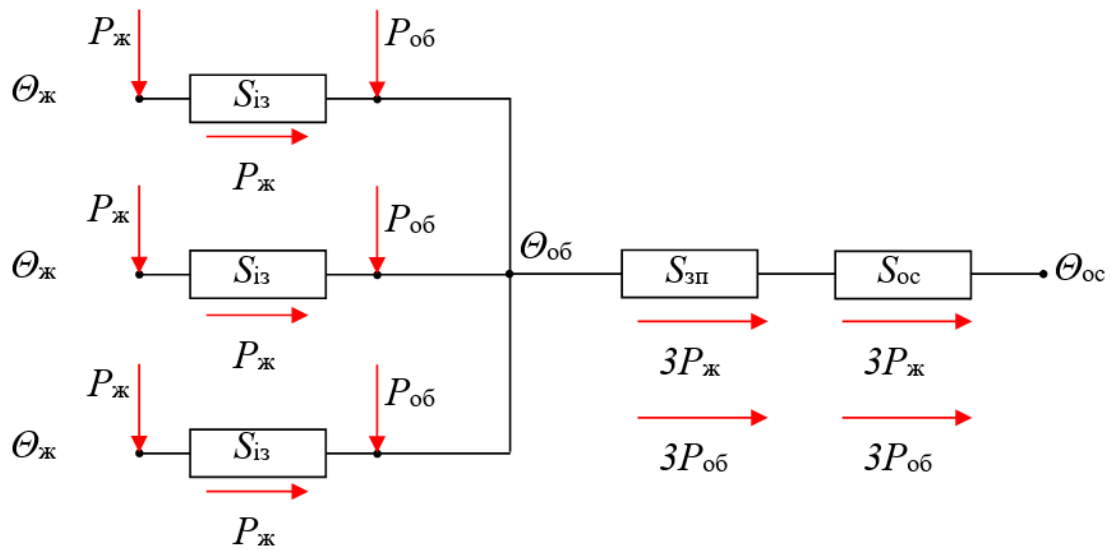


Рисунок 1.4 – Схема заміщення теплових опорів і потоків тепла в кабелі середньої напруги із зшитою поліетиленовою ізоляцією (за рис. 1.3):
 $\theta_{ж}$, $\theta_{об}$, θ_{oc} – відповідно температури жили, електропровідного екрана, оточуючого середовища;

$P_{ж}$, $P_{об}$ – потужності, що виділяються в жилі та електропровідному екрані кабелю;
 S_{i3} , $S_{зп}$, S_{oc} – теплові опори відповідно ізоляції, захисних покриттів та оточуючого середовища; стрілками на рисунку вказані прийняті напрямки теплових потоків

Для запису рівняння теплового балансу кабелю, зображеного на рис. 1.3, необхідно врахувати те, що в металевих елементах конструкції кабелю, які охоплюють кожну фазу (у даному разі – це електропровідний екран (поз. 5) є втрати ($P_{об}$), оскільки в металі екрана наводиться електрорушійна сила. За (1.8) і схемою заміщення, зображеною на рис. 1.4, рівняння теплового балансу:

$$\theta_{ж} - \theta_{oc} = P_{ж} \cdot S_{i3} + 3(P_{ж} + P_{об})(S_{зп} + S_{oc}), \quad (1.15)$$

де $\theta_{ж}$, θ_{oc} – відповідно температури жили та оточуючого середовища; $P_{ж}$, $P_{об}$ – потужність теплового потоку від жили та електропровідного екрана кабелю; S_{i3} , $S_{зп}$, S_{oc} – теплові опори відповідно ізоляції, захисних покриттів і оточуючого середовища.

Схема заміщення відображує розгалуження теплового потоку, а саме у даній конструкції теплові потоки через ізоляцію трьох жил паралельні,

а далі вони разом з теплом від втрат в оболонках відводяться через захисні покриття і оточуюче середовище.

Задачі та вправи:

1. Скласти рівняння теплового балансу для визначення тривало допустимого струму в кабелі АВББШВ 1x70-6.

Рішення. Схема заміщення теплового потоку одножильного кабелю АВББШВ 1x70-6 в стаціонарному тепловому режимі (рис. 1.5) включає відповідно до конструкції кабелю теплові опори послідовно розташованої ізоляції $S_1 = S_{із}$, оболонки $S_2 = S_{об}$, зовнішнього захисного покриття $S_3 = S_{зп}$ (шланг з полівінілхлоридного пластикату) і оточуючого середовища $S_4 = S_{ос}$.

Гранично допустима температура ізоляції у стаціонарному режимі Θ_1 та температура оточуючого середовища Θ_2 .

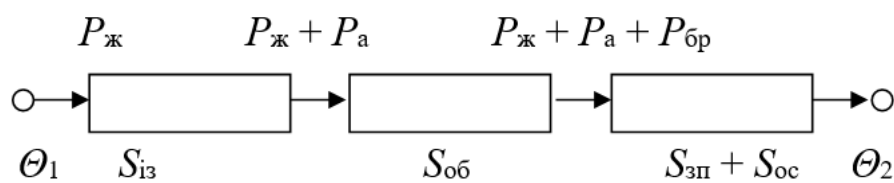


Рисунок 1.5 – Схема заміщення теплового потоку одножильного кабелю АВББШВ 1x70-6

Відповідно рівняння теплового балансу виглядає так:

$$\Theta_1 - \Theta_2 = (I^2 R + \frac{1}{2} Pa) S_1 + [I^2 R + Pa] S_2 + [I^2 R (1 + k_2) + Pa] (S_3 + S_4), \quad (1.16)$$

де R – опір змінному струму на одиницю довжини жили за максимально допустимої робочої температури Θ_1 ; k_2 – відношення втрат в броні до втрат в жилі кабелю.

Враховано виділення тепла в жилі $P_ж$, в броні $P_{бр}$ і в діелектрику P_a (згідно з діючими міжнародними стандартами (ІЕС 60287-1-1) втрати в ізоляції для кабелів на напругу до 10 кВ включно потрібно враховувати при визначенні допустимого струму лише в кабелях з ізоляцією із полівінілхлоридного пластикату на напругу 6 кВ і більше).

2. Записати формулу для розрахунку тривало допустимого струму для кабелю АВББШВ 1x70-6.

3. Скласти рівняння теплового балансу для визначення тривало допустимого струму в кабелі АВБШв 3×70-6.

4. Записати формулу для розрахунку тривало допустимого струму для кабелю АВБШв 3×70-6.

5. Скласти рівняння теплового балансу для визначення тривало допустимого струму в кабелях МНСА 1×625-220 і АПвПЕг 1×625-220, співставити їх.

Примітка. Спостерігається тенденція до використання високовольтних силових кабелів із нагрівостійкою полімерною екструдованою (зшитою поліетиленовою чи з етиленпропіленової гуми) ізоляцією замість традиційних маслонаповнених з паперовою ізоляцією. Такі кабелі мають ряд переваг:

- підвищена робоча температура, що дозволяє збільшувати пропускну здатність;

- підвищена стійкість при роботі в умовах перевантажень і коротких замикань;

- можливість прокладки на трасах з вертикальними і крутонахиленими ділянками;

- не мають у своєму складі мінерального масла, бітуму, свинцю, що спрощує монтаж, експлуатацію і зменшує екологічну шкоду від прокладання кабельних ліній;

- мають меншу масу і менший допустимий радіус вигину кабелю на трасі;

- забезпечують можливість виготовлення кабелю більшої побудованої довжини.

Найбільш актуальною для впровадження цієї інноваційної продукції кабельної промисловості в енергетичні системи України є проблема забезпечення кращих, ніж у альтернативної продукції, споживчих властивостей: пропускну здатності, вартості, надійності в експлуатації, пристосованості до монтажу та обслуговування, збереження електроенергії, екологічності.

1.4 Використання нормативних моделей

Головним і найбільш складним завданням, пов'язаним із забезпеченням надійності кабелів, є прийняття економічно виправданих рішень, яке включає як мінімум дві достатньо самостійні, хоча і взаємозалежні, складові:

- економічність прийнятого рішення у виробника;
- економічність прийнятого рішення у споживача.

Економічність у виробника, перш за все, пов'язана з витратами на матеріали. Частка витрат на матеріали досягає 70% від загальних витрат у виробника, і тому значною мірою визначає ціну кабелю, а отже, економічність прийнятого рішення у споживача. Важливою складовою у прийнятті економічного рішення у споживача є також монтажні та експлуатаційні витрати. І в цьому сенсі значні переваги мають кабелі з твердою полімерною ізоляцією, які є інноваційною продукцією для вітчизняної кабельної промисловості.

Пропускна здатність силових кабелів визначається процесами тепло- і масообміну в кабелі в номінальних умовах (розд. 1.1 і 1.2), але розрахункові моделі включають велику кількість припущень й експериментально визначених оцінок конкретних параметрів моделі. Тому на практиці широко використовують рекомендації нормативних документів щодо вибору цих параметрів. Такі присутні в міжнародних і відповідних національних стандартах серії 60287 [1,3].

Ця серія разом з необхідними нормативними посиланнями в кожному з стандартів потоковими змінами до них включає кілька десятків нормативних документів, у кожному з яких зазначені діапазони значень параметрів розрахункових моделей для традиційних конструкцій кабелів та умов їх застосування. Ці стандарти встановлюють формули для обчислення номінального струму і втрат.

До формул у буквеному вигляді входить ряд параметрів, які можуть бути віднесені до трьох груп:

- конструктивні параметри кабелю (наприклад, термічний опір ізоляційного матеріалу), для яких подані величини є базовими для розрахунку;

– параметри, що відображають умови навколишнього середовища і можуть суттєво відрізнятись для різних країн, в яких застосовують чи можуть застосовувати дані кабелі;

– параметри, які є результатом узгодження між виробником і користувачем щодо застосування обмежень для забезпечення роботи (наприклад, максимальна температура жили).

Конкретна схема заміщення теплового потоку в кабелі і конкретний вигляд рівняння теплового балансу залежать від конструкції і напруги даного кабелю (див. розд. 1.1 і 1.2). Так, наприклад, для високовольтних кабелів (110 кВ і більше) необхідно врахувати виділення тепла в ізоляції, для одножильних броньованих кабелів необхідно врахувати виділення тепла в броні і та ін.

Тому в нормативній документації кабельної техніки [3] для визначення пропускної здатності у стаціонарному тепловому режимі використовують узагальнені розрахункові співвідношення.

Допустимий струм навантаження **всіх кабелів змінного струму** може бути отриманий з виразу для перевищення $\Delta\theta$ температури кабелю $\Theta_{\text{ж}}$ над температурою оточуючого середовища Θ_{oc} :

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} Pa) S_1 + [I^2 R (1 + k_1) + Pa] n S_2 + [I^2 R (1 + k_1 + k_2) + Pa] n (S_3 + S_4), \quad (1.17)$$

де I – струм, що протікає в одній жилі (А); $\Delta\theta$ – перевищення температури жили над оточуючою температурою; R – опір змінному струмові на одиницю довжини жили за максимально допустимої робочої температури (Ом/м); $\Delta\theta$ – перевищення температури жили над оточуючою температурою; Pa – діелектричні втрати в ізоляції жили на одиницю довжини (Вт/м); S_1 – тепловий опір між однією жилою і оболонкою на одиницю довжини ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м/Вт}$); S_2 – тепловий опір між оболонкою і бронєю на одиницю довжини ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м/Вт}$); S_3 – тепловий опір зовнішнього захисного покриття на одиницю довжини ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м/Вт}$); S_4 – тепловий опір між поверхнею кабелю і оточуючим середовищем на одиницю довжини кабелю ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м/Вт}$); n – кількість жил навантаження в кабелі (жил однакового розміру і навантаження); k_1 – відношення втрат у металевій оболонці до загальних втрат в усіх жилах кабелю; k_2 – відношення втрат у броні до загальних втрат в усіх жилах кабелю.

Відповідно до (1.17) допустимий струм навантаження визначають за такою формулою:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - Pa \cdot [0,5 \cdot S_1 + n(S_2 + S_3 + S_4)]}{R \cdot S_1 + n \cdot R \cdot (1 + k_1) \cdot S_2 + n \cdot R \cdot (1 + k_1 + k_2) \cdot (S_3 + S_4)} \right]^{0,5} \quad (1.18)$$

Ця формула є досить універсальною і в стандартах серії 60287 наведені моделі для визначення значень величин, які вона містить, нормовані процедури використання цих моделей, необхідні емпіричні параметри.

Використання нормативних моделей необхідно для порівняння за пропускною здатністю різних кабелів, які можуть бути застосовані в даному випадку.

Очевидно, що умови експлуатації і числові значення ряду параметрів можуть суттєво змінюватись від одного регіону чи країни до інших.

Наприклад, у [9] наведені національні дані різних країн, членів Міжнародної Електротехнічної Комісії (МЕК) щодо умов прокладання для визначення пропускної здатності силових кабелів. Ці дані суттєво різняться.

Тому пропускна здатність кабелю, визначена за нормативними моделями і середніми параметрами оточуючого середовища, прийнятими в нормативній документації, надає лише попередню інформацію, корисну для вибору кабелю і порівняння його пропускної здатності з іншими кабелями, подібними за споживчими властивостями.

Для конкретного застосування і для інноваційних конструкцій кабелю необхідно визначати пропускну здатність за конкретних умов експлуатації, за яких і сама модель, і числові значення ряду її параметрів можуть суттєво відрізнятись від нормативних.

Задачі та вправи:

1. Згідно з діючим міжнародним стандартом ІЕС 287-1-1 втрати в ізоляції для кабелів з ізоляцією із полівінілхлоридного пластикату на напругу 6 кВ і більше потрібно враховувати при визначенні допустимого струму. Порівняти втрати в жилі і втрати в ізоляції кабелю АВВГ 1×70-6, якщо густина струму в жилі 1,5 А/мм². Записати формулу для

розрахунку тривало допустимого струму з урахуванням цієї рекомендації.

Рішення. Втрати в жилі:

$$P_g = (70 \cdot 1,5)^2 \cdot 0,028 \cdot 10^{-6} / 70 \cdot 10^{-6} = 4,41 \text{ Вт/м.}$$

Втрати в ізоляції:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta,$$

де U – фазна напруга, що дорівнює $6/\sqrt{3}$ кВ;

ω – кругова частота $2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 50$;

C – ємність ізоляції на одиницю довжини кабелю, $C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 / \ln(R/r)$,

$$r = \sqrt{70/\pi} = 4,72 \text{ мм};$$

$$R = 4,72 + 3,4 = 8,12 \text{ мм};$$

ϵ – діелектрична проникність ПВХ-пластикату, $\epsilon = 8$;

$\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат (для ПВХ-пластикату $\text{tg}\delta = 0,1$).

$$P_a = (6/\sqrt{3})^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 2\pi \cdot 8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1 / \ln(8,12 / 4,72) = 3,091 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м.}$$

Таким чином, втратами в ізоляції кабелю АВВГ 1×70-6 порівняно з втратами в жилі можна знехтувати, отже, формулу для розрахунку номінального струму цього кабелю можна записати так:

$$I_n = [(\Theta_1 - \Theta_2) / R_g(\Theta_1)(S_{iz} + S_{ob} + S_{oc})]^{0,5}, \quad (1.19)$$

де Θ_1 , Θ_2 – максимальна допустима температура жили та температура оточуючого середовища; – відповідно значення теплового опору для ізоляції, захисного покриття, оточуючого середовища;

R_g – електричний опір жили при максимально допустимій температурі.

2. У додатку 2 наведено кілька нормативних моделей для обчислення номінального струму силових кабелів. Вибрати модель для заданої марки кабелю і визначити її параметри, наведені в таблиці. Результати занести до таблиці.

№ з/п	Марка кабелю	№ мод.	Питомий тепловий опір ізоляції $\sigma_{із}$ (табл.1.1)	Радіус внутрішньої ізотерми r_1 (розр.за ескізом)	Максим. допустима температура жили Θ_1 (табл.1.2)	Температура оточуючого середовища Θ_2 (табл.1.2, 1.3)
1	АПВБШв 3×70-6 змін. струм, у повітр.					
2	АПВГ 3×240-1 пост. струм, у ґрун.					
3	АПВВГ 3×240-6 пост. струм, у повітр.					
4	АПВЕШв 1×400-110 змін. струм, у повітр.					
5	АПВЕШв 1×400-110 змін. струм, у ґрун.					

1.5 Основні параметричні моделі

Практичні рекомендації нормативних документів щодо оцінки пропускну здатності силових кабелів базуються на балансі процесів тепло- і масообміну в кабелі в номінальних умовах, але розрахункові моделі включають велику кількість умов і експериментально визначених оцінок конкретних параметрів, якими зазначені діапазони значень параметрів розрахункових моделей для традиційних конструкцій кабелів та умов їх застосування. Досвід свідчить, що експериментально одержані значення технічних параметрів (наприклад електричного опору жили R^*) суттєво різні для технічно тотожних зразків.

В умовах виробництва вимірюють електричний опір постійному струмові провідника на довжині 1 м при температурі 20 °С. Для визначення питомого електричного опору ρ необхідно визначити площу поперечного перерізу $F = M/(\gamma \cdot L)$, де M – маса зразка; γ – питома маса металу; L – довжина зразка масою M .

Вихідні дані еталонного вимірювання R дев'яти зразків суцільних алюмінієвих провідників однакового номінального перерізу (240 мм²) в умовах виробництва наведені у вигляді матриці A , яка включає: масу зразка M в грамах; довжину зразка L в метрах; електричний опір R в Ом/км.

$$A = \begin{pmatrix} 636 & 712 & 746 & 789 & 739 & 755 & 698 & 841 & 716 \\ 1.034 & 1.14 & 1.187 & 1.253 & 1.182 & 1.207 & 1.14 & 1.365 & 1.143 \\ 0.124 & 0.121 & 0.118 & 0.12 & 0.119 & 0.119 & 0.121 & 0.122 & 0.12 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{маса зразка } M \text{ в грамах} \\ \text{довжина зразка } L \text{ в метрах} \\ \text{електричний опір } R \text{ в Ом/км} \end{matrix}$$

На рис. 1.6 наведено результати еталонних вимірювань електричного опору R в Ом/км, середнє значення виміряних значень і вірогідний інтервал для невідомого середнього в залежності від площі поперечного перерізу зразка F .

Залежність $R = f(F)$ в цілому очевидна: чим більша площа перерізу провідника, тим менший погонний електричний опір.

Для порівняння нанесено гранично допустиме значення для даного номінального перерізу в умовах виробництва: штрихова червона лінія.

Рис. 1.6 свідчить, що експериментально одержані значення електричного опору жили R^* не просто різні в умовах еталонного вимірювання, але сумнів викликає вимога достатньої статистичної сталості ансамблю для технічно тотожних зразків, яка є природною вимогою для прогнозу границь вірогідного інтервалу для невідомого середнього (визначено за [2] і нанесено на рис. 1.6 у вигляді хрестиків).

Дані на рис. 1.6 вочевидь розділенні на дві частини з помітною різницею в площі поперечного перерізу зразків і значення електричного опору зразків з меншою площею перерізу викликають сумніви щодо рекламацийного потенціалу щодо втрат в жилі.

Електричний опір жили – параметр, що пов’язаний відомими співвідношеннями з іншими конструктивними (матеріал, розміри), електричними (струм, питомий опір), тепловими (теплоємність, теплопровідність, температурні коефіцієнти) та економічними (питома маса, ціна, технологічність) параметрами кабелю, одночасно визначає співвідношення корисної потужності і потужності втрат на нагрівання кабелю.

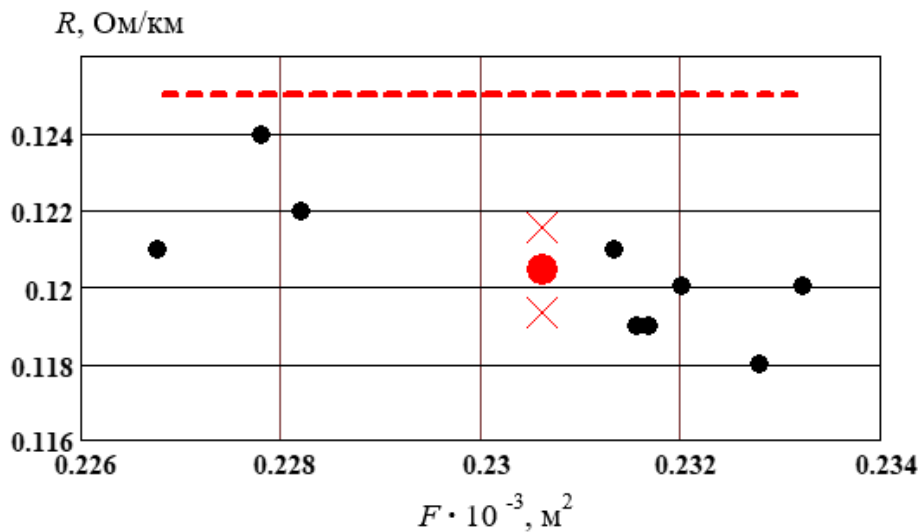


Рисунок 1.6 – Результати вимірювань електричного опору R в Ом/км, дев'яти зразків алюмінієвих провідників однакового номінального перерізу в умовах виробництва – чорні точки; середнє значення виміряних значень – червона точка; прогноз границь вірогідного інтервалу для невідомого середнього – хрестики; гранично допустиме значення електричного опору для даного номінального перерізу – штрихова червона лінія

Тому електричний опір жили є основним параметром силового кабелю в для аналізу його пропускну́ї здатності і нормується застосовними в світовій кабельній техніці дискретною шкалою перерізів і відповідною шкалою обмежень зверху (не більше) [1]. Основним ще й тому, що безпосередньо впливає на інший основний.

Рис. 1.7 ілюструє електротепловий характер пробою ізоляції високовольтного ЗПЕ-кабелю. Розвиток такого пробою – тривалий процес нагрівання діелектрика, якщо потужність діелектричних втрат в локальній області ізоляції більша, ніж потужність, яка може бути відведена від неї в оточуюче середовище в конкретних умовах; процес завершується **пробоем, тобто коротким замиканням між електродами в наслідок втрати матеріалом ізолюючих властивостей під дією накопиченої теплової енергії.**



Рисунок 1.7 – Характерний слід електротеплового пробою системи ізоляції сучасного високовольного ЗПЕ-кабелю: вплив температури діелектрика на напругу пробою і тривалість розвитку пробою є свідченням перетворення енергії електричного поля на теплову (розсіяння енергії електричного поля)

Вплив напруженості електричного поля в ізоляції є не менш важливим, ніж забезпечення високої теплопровідності і механічної міцності діелектрика. У разі одночасного застосування відомих моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю, що визначають його пропускну здатність забезпечують аналізувати цілий спектр можливих технічних рішень щодо даного конкретного кабелю.

Такий підхід можна назвати **методом використання багатовимірних моделей, які складаються з універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло- і масообміну в кабелях для дослідження їх пропускну здатності.** При цьому застосування сучасної обчислювальної техніки і стандартного програмного забезпечення виключають проблеми виконання розрахунків.

Всі зусилля при вирішенні конкретних задач мають включати чотири основних етапи:

– визначення необхідних вихідних розрахункових співвідношень, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю;

– компонування з цих співвідношень єдиної розрахункової моделі такої, щоб параметри всіх розрахункових співвідношень були взаємно пов'язані;

– визначення інтервалів можливих значень параметрів моделі, виділення серед цих параметрів змінних, які є такими для всіх розрахункових співвідношень;

– аналіз результатів спектра рішень моделі щодо визначених змінних.

Всі чотири етапи вимагають врахування технічної і фізичної суті задачі і виключають виконання рутинних обчислювальних процедур.

Наприклад, для кабелю ПвВШв 1×120-20 справедливими є три наведені нижче прості моделі: (1.20) дозволяє обчислити максимальну напруженість радіального електричного поля в однорідній ізоляції; (1.21) дозволяє обчислити номінальний струм за (1.11); (1.22) дозволяє обчислити затрати на матеріал ізоляції (товщина Δ_{i3}), якщо відомі ціна C_{i3} одного кілограму матеріалу, питома маса γ_{i3} і об'єм V_{i3} на одиницю довжини.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_H = [(\Theta_1 - \Theta_2) / R_g(\Theta_1)(S_{i3} + S_{o6} + S_{oc})]^{0,5}, \quad (1.20) \\ E_{\max} = \frac{U}{(r_{\text{æ}} + \Delta_e) \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{æ}} + \Delta_e + \Delta_{\text{ç}}}{r_{\text{æ}} + \Delta_e}\right)}, \quad (1.21) \\ Z = C_{i3} \cdot \gamma_{i3} \cdot V_{i3}. \quad (1.22) \end{array} \right.$$

Ці формули взаємопов'язані спільним параметром – товщиною ізоляції Δ_{i3} . Для забезпечення надійності кабелю має бути обмежена зверху (не більше) максимальна напруженість електричного поля в ізоляції. Це вимагає обмеження Δ_{i3} знизу (не менше). Очевидно, що чим більше значення Δ_{i3} , тим більші затрати на матеріал ізоляції Z і тим більший тепловий опір ізоляції (1.12), а отже, може бути меншою пропускну здатність кабелю. Таким чином, тільки спільне розв'язання

(1.20) – (1.22) для конкретної марки кабелю може дозволити вобрати економічно і технічно прийнятне рішення.

Таку модель можна назвати тривимірною за кількістю простих моделей, що її утворюють і відповідно за кількістю змінних, які одночасно визначають. Ці змінні – тривало допустимий струм кабелю I , товщина ізоляції Δ_{iz} і витрати на матеріали для ізольованої жили Z_{atr} одночасно визначаються за різних значень багатьох параметрів – максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю, максимально допустимої температури ізоляції та ін.:

– всього конструктивних параметрів шість: площа номінального перерізу жили F , коефіцієнт заповнення перерізу жили η , товщина екрана Δ_e , товщина захисних покриттів, питомі маси матеріалів ізоляції і напівпровідних екранів γ_{iz} , жили γ_{cu} ;

– теплових параметрів п'ять: температури жили Θ_1 і оточуючого середовища Θ_2 , значень питомого теплового опору ізоляції σ_{iz} і захисних покриттів σ_{zp} ; температурного коефіцієнту електричного опору жили α ;

– електричних параметрів вісім: максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю E_{max} , електричної ϵ_0 і магнітної μ_0 постійних, частоти f , відносної діелектричної проникності ϵ і тангенса кута діелектричних втрат \tan ізоляції, питомого електричного опору жили ρ_{20} і номінальної напруги U ;

– економічних параметрів три: ціна на матеріал жили C_{cu} , на матеріал ізоляції і напівпровідних екранів C_{iz} , середня ціна матеріалів захисних покриттів C_{sr} .

Результати рішення системи рівнянь (1.20) – (1.22) для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції ЗПЕ-кабелю перерізом 500 мм² на напругу 110 кВ свідчать, що зменшення напруженості, наприклад, з 10 кВ/мм до 8 кВ/мм вимагає збільшення товщини ізоляції майже в півтори рази і при цьому суттєво зменшується пропускна здатність кабелю.

При цьому пропускна здатність зменшується нелінійно: стрімко в діапазоні відносно менших значень товщини ізоляції. Саме спільне рішення відомих, перевірених досвідом рівнянь надає цю інформацію.

Те, що зменшення напруженості електричного поля за рахунок збільшення товщини ізоляції зумовлює збільшення витрат на матеріали, є тривіальним. А от зменшення номінального струму при зменшенні товщини ізоляції таким не є і вимагає подальшого розвитку моделі розрахунку, наприклад аналізу зменшення поверхні охолодження кабелю.

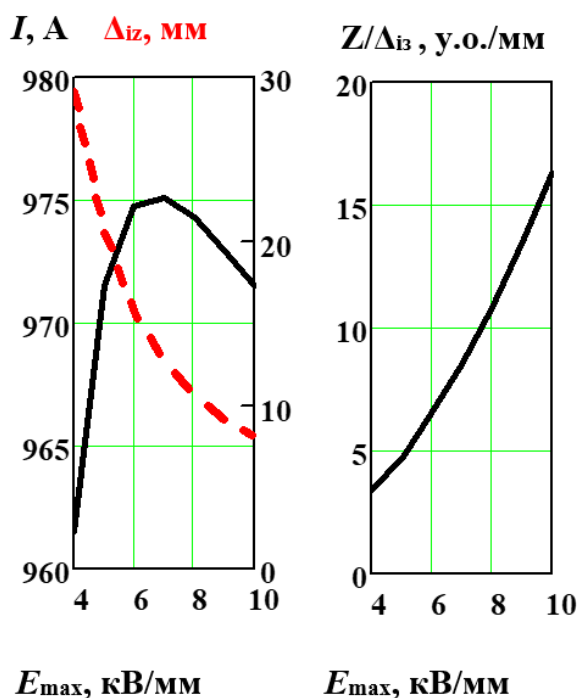


Рисунок 1.8 – Результати рішення системи рівнянь (1.20) – (1.22) для різних значень максимальної напруженості електричного поля в широкому діапазоні в ізоляції кабелю марки АП вЕВнгд 1×500– 110 кВ в номінальному режимі (90 °С) при одиночному прокладанні в повітрі без дії прямого сонячного випромінювання за температури 20 °С (в ізоляції, прилеглий до напівпровідного екрану по жилі)

Те, що зменшення напруженості електричного поля за рахунок збільшення товщини ізоляції зумовлює збільшення витрат на матеріали, є тривіальним.

А от досить виразний максимум пропускної спроможності в діапазоні товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм (рис. 1.8) і відповідність цього діапазону тому факту, що при подальшому зменшенні товщини ізоляції зменшується пропускна здатність кабелю, є важливим результатом саме спільного вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

За цим треба додати, що:

– прості моделі, які складають систему, можна ускладнювати залежно від необхідності врахування особливостей конструкції кабелю, умов його прокладання і економічних реалій конкретного виробника;

– до системи можуть і мають бути залучені технологічні моделі, які пов'язують технічні та споживчі параметри кабелю з його технологічними параметрами; очевидно, що зв'язок з економічною складовою системи, а отже, і необхідність спільного вирішення, посиляться;

– при визначенні інтервалів можливих значень параметрів системи необхідно врахувати **високі вимоги до однорідності параметрів кабельних виробів по довжині**, що зумовлені закономірностями розповсюдження електромагнітної енергії (ЕМ) вздовж напружальної лінії (втрати, поступова зміна форми ЕМ, зустрічні потоки ЕМ зумовлені неоднорідностями і т.ін);

В будь-якому разі суддею прийнятих технічних і економічних рішень є досвід експлуатації, а саме система спостережень за відмовами кабелів в експлуатації.

Приклад [1] дії такої системи: в доповіді № 21-10 на сесії СІГРЕ, 1980 р. «Досвід експлуатації кабелів високої напруги з синтетичною екструдованою ізоляцією в США» наведено дані про число пробоїв n за рік на 100 км кабелю в експлуатації на протязі 1962—1978 років в США та Канаді (напруга 5-45 кВ; дані для ~ 40% встановлених кабелів) на рис.1.9.

1975 р. став переломним для застосування поліетилену в світовій кабельній галузі: синтетична екструдована поліетиленова ізоляція (ПЕ: введено в експлуатацію не менше 70 000 км силових кабелів) виявилась недостатньо надійною у порівнянні з традиційною паперовою імпрегрованою ізоляцією. Ситуацію з часом виправило застосування зшитого поліетилену (ЗПЕ). ЗПЕ містить суттєву кількість домішок, які є прямими продуктами хімічної реакції зшивки поліетилену: вода, полярний ацетофенон, газ метан, ін. – вони суттєво впливають на електрофізичні процеси в ізоляції кабелю. Річ у механічній міцності і нагрівостійкості, які у ЗПЕ набагато кращі.

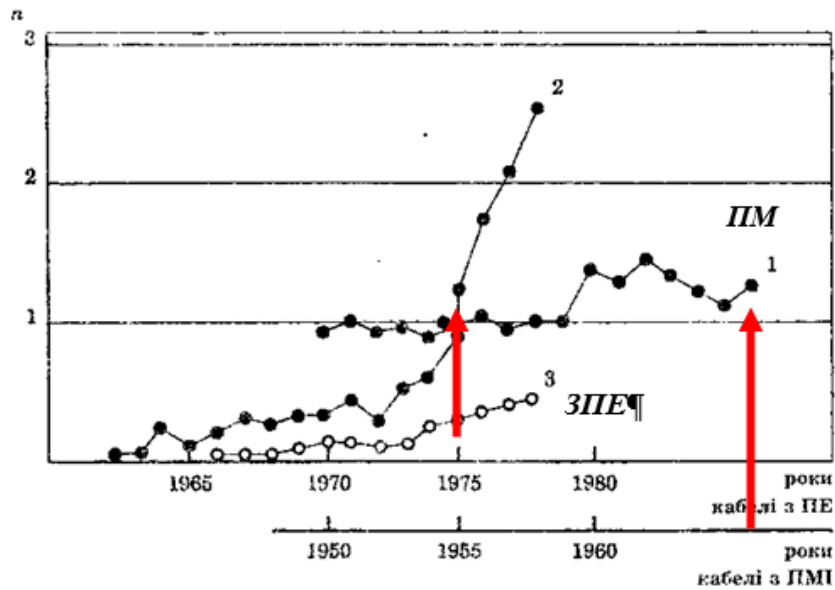


Рисунок 1.9 – Число пробовів n за рік на 100 км кабелю середньої напруги в експлуатації:

- 1 – кабелі з паперовою імпрегнованою ізоляцією;
- 2 – кабелі з ізоляцією із лінійного поліетилену;
- 3 – кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену

Задачі та вправи:

1. Запропонувати багатовимірну модель для вибору товщини ізоляції кабелю марки ПвВШв 1×120-20.

2. За нормативним співвідношенням (1.18) внести необхідні зміни до формул (1.20)–(1.21), щоб запропонувати багатовимірну модель для вибору товщини ізоляції кабелів марки:

- 1) ПвВЕШв 1×300-220; 2) ПвВЕКШв 1×300-220; 3) ПвВЕШв 1×600-220; 4) ПвВЕКШв 1×600-220; 5) ПвВКШв 1×70-35; 6) ПвВКШв 1×70-35.

1.6 Визначення параметрів системи рівнянь

Розвиток електроспоживання зумовлює появу нових конструкцій силових кабелів та умов їх експлуатації. Наприклад, використання високовольтних силових кабелів із нагрівостійкою полімерною екструдованою ізоляцією замість з імпрегнованою паперовою ізоляцією.

Такі кабелі мають ряд переваг і найперша – підвищена робоча температура (до 90 °С), що дозволяє збільшувати навантажувальну

здатність. Основними масово застосовними діелектриками цих кабелів є зшитий поліетилен (**XLPE**) чи етиленпропіленова гума (**EPR**).

Є свідчення на користь XLPE за електричною міцністю, і що важливо тривалу електричною міцністю в номінальному режимі [15], про що свідчить наведена нижче таблиця:

Час в номінальному режимі, годин		0	8760	17520
$E_{пр}$, кВ/мм	XLPE	70	49	46
	EPR	40	35	30

З іншого боку за основною характеристикою гнучкості, – відносним видовженням при розриві δ , (*elongation at break*) переваги має EPR.

Крім того суттєво вища допустима температура ізоляції і вплив конструкції захисних покривів без масивних металевих оболонок на пропускну здатність ЗПЕ–кабелю вимагають додаткового аналізу щодо навантажувальної здатності порівняно із рекомендаціями для традиційних кабелів.

В Європі для ліній середньої напруги використовують кабелі з термопластичною полімерною ізоляцією на основі поліпропілену (**ПП**): фірма Mallefer Group (Finland) присутня на ринку з відповідним обладнанням [14].

Головні переваги ПП: не потрібні вулканізація і дегазація, а головний недолік підвищена полярність стає перевагою з огляду на очевидну тенденцію використання довгих ліній постійного струму, оскільки XLPE при постійному струмі накопичує об’ємні заряди і її електрична міцність при постійному струмі менша, ніж при змінному.

Дослідження на зразках кабелів на 10 кВ свідчать, що з часом під дією експлуатаційних навантажень в ПП-ізоляції розвиваються так звані «водяні триінги» (рис 1.9) і короткочасна електрична міцність є меншою, ніж у ізоляції ЗПЕ-кабелів.

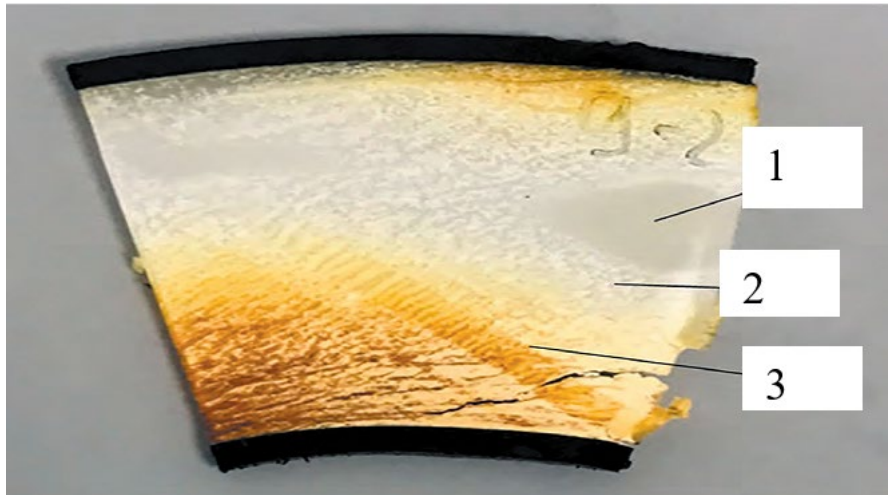


Рисунок 1.9 – Мікрофотографія поперечного перерізу ізоляції кабелю з ПП ізоляцією на 10 кВ після 40 діб за температури 150 °С в номінальному режимі:

- 1 – ділянка з глянцевою поверхнею характерною для ПП;
- 2 – ділянка с матовою поверхнею;
- 3 – ділянка, що значно змінила колір

В довгих лініях полярність діелектрика суттєво впливає на роботу системи через ємнісні струми I_c . Це стає помітним вже в системах середньої напруги залежно від їх довжини $I_c = U \cdot \omega \cdot C \cdot l$, де l - довжина лінії.

Наприклад, в Північному морі в Данії вітропарк живить кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену довжиною 21 км на напругу 150 кВ змінного струму 633 А, оснащений компенсаторами реактивної енергії на 64 МВар.

Поряд з цим необхідно враховувати те, що кабелі з підвищеною допустимою температурою суттєво нагрівають оточуюче середовище.

Якщо кабель змінного струму, прокладений у землі, має високу температуру поверхні, то за часткового висихання навколишнього ґрунту відповідно до стандарту ІЕС 60287-1-1 для розрахунку гранично допустимого струму застосовують метод, який базується на універсальній формулі (1.18) з додаванням до теплового опору оточуючого середовища сухої зони, прилеглої до кабелю, границя якої є ізотермою з температурою θ_x (див. додаток 1).

Змінення зовнішнього теплового опору внаслідок утворення сухої зони навколо кабелю може бути враховано за допомогою формули, в якій

є додатковий параметр Θ_x , якщо відома ширина dz сухої зони довкола кабелю:

$$\Theta_x - \Theta_2 = 3 R_g(\Theta_1) \cdot I^2 \cdot \sigma_w \cdot \ln[2L/(r_k + dz)], \quad (1.23)$$

де $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_x$ – температури жили, ґрунту, умовної ізотерми між сухою та вологою зонами; L, r_k, dz – глибина прокладання, радіус кабелю, ширина сухої зони довкола кабелю; $v = \sigma_c / \sigma_w$ – відношення теплових опорів сухої та вологої зон ґрунту.

Тоді для вирішення задачі про розрахунок допустимого струму в умовах висихання ґрунту за ІЕС 60287-1-1 система з двох незалежних рівнянь – на основі (1.18) для різниці температур між сухою зоною та оточуючим середовищем за загальною формулою для теплового опору ґрунту. Приклад такої системи рівнянь для трижильних кабелів з поясною ізоляцією [1]:

$$\begin{cases} I_n = [(\Theta_1 - \Theta_2 + (v - 1)(\Theta_x - \Theta_2)) / 3 R_g(\Theta_1) (S_{iz} + S_{об} + v S_{oc})]^{0,5} & (1.24) \\ \Theta_x - \Theta_2 = 3 R_g(\Theta_1) \cdot I^2 \cdot \sigma_w \cdot \ln[2L/(r_k + dz)/2\pi], & (1.25) \end{cases}$$

де Θ_x, I – змінні, що визначаються рішенням системи; інші величини мають бути визначені як відомі параметри (за недостатньої інформації – як інтервали для значень цих параметрів).

Очевидно, що рішення такої системи можливе за умови відносно довільного вибору ширини сухої зони dz , оскільки невідомих три, а рівняння тільки два. Якщо вибрати $dz = v \cdot r_k$, то розрахунок, наприклад, для кабелю ААШВ 3×25-10 показує, що:

– поправка на допустимий струм для даного кабелю може становити до 11–14 %, отже, є суттєвою;

– при збільшенні питомого теплового опору сухого ґрунту та збільшення ширини сухої зони, температура умовної ізотерми Θ_x зменшується і таким чином точне розв'язання задачі в конкретних умовах прокладання вимагає спеціальних даних про стан ґрунту.

Результати вказаного рішення наведені в табл. 1.4, дані якої свідчать, що необхідне врахування додаткових параметрів в універсальній розрахунковій моделі за суттєвих змін в умовах прокладання.

Таблиця 1.4 – Результати вирішення задачі про розрахунок допустимого струму в умовах висихання ґрунту за ІЕС 60287-1-1

Питомий опір сухого ґрунту, σ_c , К · м/Вт	Температура ізотерми Θ_x , яка розділяє суху та вологу зони ґрунту, °С, при величині питомого теплового опору вологого ґрунту σ_w		Допустимий струм I , А, при величині питомого теплового опору вологого ґрунту σ_w	
	1,0 К · м/Вт	1,2 К · м/Вт	1,0 К · м /Вт	1,2 К · м /Вт
1,3	38,5	41,7	95,3	91,5
1,5	37,4	40,7	94,2	90,7
2,0	34,9	38,2	91,0	88,3
2,5	32,6	35,9	87,5	85,5
3,0	30,6	33,8	84,0	82,6

Необхідність врахування часткового висихання навколишнього ґрунту за рекомендацією 60287-1-1 свідчить про необхідність визначення додаткових параметрів в універсальних нормативних формулах в разі суттєвих змін в конструкції чи технології виготовлення сучасних кабелів з підвищеною навантажувальною здатністю.

Використання багатовимірних моделей, які складаються з універсальних і уніфікованих розрахункових співвідношень процесів тепло- і масообміну в кабелях для дослідження їх пропускнув здатності вимагає визначення цілого ряду параметрів, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні властивості елементів конструкції кабелю; компонування з цих співвідношень єдиної розрахункової моделі такої, щоб параметри всіх розрахункових співвідношень були взаємно пов'язані.

Задачі та вправи:

1. Записати модель для розрахунку допустимого струму в умовах висихання ґрунту за ІЕС 60287-1-1 на основі системи з двох незалежних рівнянь (1.24), (1.25) для кабелю марки ПвВЕШв 1×300-220.

Рішення.

Цей кабель одножильний, тому в (1.24) і (1.25) замість $3 \cdot Rg(\Theta_1)$ треба записати $Rg(\Theta_1)$. У конструкції цього кабелю є мідний екран,

втрати в якому є додатковим джерелом тепла, що в нормативному співвідношенні (1.18) позначено як k_1 (відношення втрат в металевій оболонці до втрат у жилах кабелю).

Кабель високовольтний, отже, треба врахувати втрати в ізоляції, які в нормативному співвідношенні (1.18), позначено як Pa . Доцільно позначення замінити $S_{об}$ на $S_{зп}$, оскільки в цьому кабелі досить складна шарувата конструкція захисних покриттів.

Отже, система для цього кабелю може виглядати так:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_H = [(\theta_1 - \theta_2 + (v - 1)(\theta_x - \theta_2)) / R_g(\theta_1) [S_{із} + (1+k)(S_{об} + v S_{ос})]]^{0,5}, \quad (1.26) \\ \theta_x - \theta_2 = R_g(\theta_1) \cdot I^2 \cdot (1+k)(\sigma_w \cdot \ln[2L/(r_k + dz)] / 2\pi) . \quad (1.27) \end{array} \right.$$

2. Записати модель для розрахунку допустимого струму в умовах висихання ґрунту за ДСТУ ІЕС 60287-1-1 (на основі системи з двох незалежних рівнянь (1.24), (1.25)) для кабелів марки:

- 1) ПвВЕКШв 1×300-220;
- 2) ПвВЕШв 1×600-220;
- 3) ПвВЕКШв 1×600-220;
- 4) ПвВКШв 1×70-35;
- 5) ПвВКШв 1×70-35.

2. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ НАВАНТАЖУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ

2.1. Електричний опір струмопровідних жил

2.1.1. Загальні положення

Електричний опір жили – параметр, що пов’язаний відомими співвідношеннями з іншими конструктивними (матеріал, розміри), електричними (струм, питомий опір), тепловими (теплоємність, теплопровідність, температурні коефіцієнти) та економічними (питома маса, ціна, технологічність) параметрами кабелю, одночасно визначає співвідношення корисної потужності і потужності втрат на нагрівання кабелю.

Тому електричний опір жили є основним параметром силового кабелю в для аналізу його пропускної здатності і нормується застосовними в світовій кабельній техніці дискретною шкалою перерізів і відповідною шкалою обмежень зверху (не більше) [1].

Провідниковими матеріалами для струмопровідних жил кабелів є електrolітичні, тобто очищені електролізом, мідь і алюміній. Висока чистота металу необхідна для забезпечення максимально можливої електропровідності. Остання є основним фактором забезпечення найменшого можливого електричного опору жили, а отже, найменших втрат у жилі.

2.1.2. Фактори впливу на електричний опір кабельних провідників

Вплив кристалічної структури

Мідь і алюміній є провідниками першого роду, електропровідність яких, як і для всіх речовин з металічним зв’язком атомів, є електронною, а отже, визначається кількістю n_0 вільних електронів в одиниці об’єму металу, середньою довжиною вільного пробігу λ електрона в кристалічній структурі і середньою швидкістю V теплового руху вільних електронів:

$$\gamma = e^2 n_0 \lambda / 2mV, \quad (2.1)$$

де γ – питома електропровідність; e і m – заряд і маса електрона.

Значення середньої швидкості V теплового руху і концентрації n_0 вільних електронів за температур, при яких експлуатують кабелі, для

різних металів, навіть суттєво різних за електропровідністю, відрізняються відносно мало. Тому значення γ залежить, перш за все, від середньої довжини вільного пробігу λ електрона в кристалічній структурі, а отже, від її особливостей, які визначають λ :

- будови кристалічної структури матеріалу провідника;
- деформації кристалічної структури під впливом різних факторів, наприклад механічних;
- дефектів кристалічної структури.

Всі фактори, що суттєво деформують структуру провідника чи створюють в ній дефекти, зменшують його електропровідність.

Для кабельних провідників такими факторами є:

- **домішки**, вміст яких нормують і контролюють;
- **технологічні деформації** металу при виготовленні струмопровідних жил, перш за все, при волочінні і ущільненні жил;
- **температура**, яка не є стабільною в процесі експлуатації, а отже, не є стабільною і електропровідність металу жили.

Кожен із зазначених факторів характерний для всіх речовин з металічним зв'язком атомів, але для кабельних провідників має деякі особливості.

Вплив домішок

Наприклад, домішка в міді кадмію (Cd), питомий електричний опір якого (за температури 20 °C $\rho = 0,076 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) у кілька разів більший ніж у міді, майже не змінює електропровідність міді. А домішка срібла (Ag), питомий електричний опір якого менший ніж у міді, суттєво зменшує електропровідність міді.

Приклад характерного графіка залежності питомого електричного опору сплаву мідь-нікель від співвідношення компонентів наведено на рис. 2.1, на якому видно, що домішка більш електропровідної міді погіршує електропровідність нікелю. Така залежність характерна для сплавів, в яких різні метали утворюють спільну кристалічну структуру («твердий розчин»).

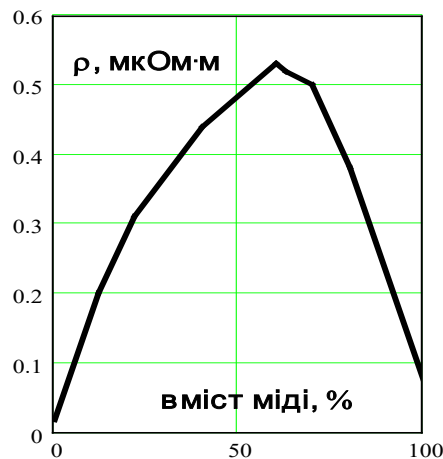


Рисунок 2.1. – Залежність питомого електричного опору сплаву мідь-нікель від співвідношення компонентів

Примітка. Важливо: а) домішки змінюють не тільки (а часто і не стільки) електропровідність провідника, але й інші його властивості: температурний коефіцієнт електричного опору, механічну міцність і пластичність провідника, теплопровідність, контактну різницю потенціалів; б) вплив домішок інших металів може суттєво відрізнятись від наведеного на рис. 2.1 прикладу.

Якщо металева домішка знаходиться у вигляді окремих кристалів, то електропровідність сплаву із зміною концентрації компонентів близька до лінійної і визначається правилом арифметичного змішування компонентів. Такою є домішка вольфраму (W) в міді.

Якщо ж металева домішка вступає в хімічну реакцію з основним металом (інтерметаліди), то може змінюватись механізм електропровідності, – з'являється складова електропровідності, характерна для напівпровідників, що може значно змінювати температурний коефіцієнт електричного опору.

Наприклад, сплави цинку і магнію: чисті цинк і магній є провідниками першого роду з відповідними значеннями питомої електропровідності, а при співвідношенні 60 % цинку і 40 % магнію утворюють сплав, який за характером електропровідності є електронним напівпровідником.

Вплив технологічних деформацій на електропровідність кабельних провідників.

Технологія виготовлення струмопровідних жил є деформуванням металу провідника. Значні технологічні деформації відбуваються при волочінні, скручуванні і ущільненні жил.

Всі ці процеси є холодним деформуванням металу, за якого пластичний метал стискується, витягується, скручується, набуває необхідної форми, розміру і взаємне розташування окремих дrotів.

Найбільші деформації відбуваються при волочінні – протягуванні заготовки більшого поперечного розміру через отвір меншого розміру у твердосплавному або алмазному інструменті (волоці). Основною технологічною характеристикою цього процесу є витяжка μ заготовки, яка для однократного волочіння дорівнює:

$$\mu = l_1 / l_0 = F_0 / F_1, \quad (2.2)$$

де l_0 і F_0 , l_1 і F_1 – довжина та переріз дроту відповідно до та після волочіння.

Витяжка пов'язана з напругою волочіння та зумовлює структурні зміни в металі (нагартровку). Явище нагартування зменшує пластичність і збільшує питомий електричний опір металу, оскільки значно змінює кристалічну структуру металу провідника.

Тому величина витяжки при однократному волочінні обмежена величиною 1,35–1,4, при перевищенні якої різко збільшується кількість обривів дроту при волочінні.

Необхідна сумарна витяжка може становити кілька десятків. Тому використовують багатократне волочіння, і деформація металу, а отже, і його електропровідність суттєво залежать від технології виготовлення провідника.

Після волочіння для відновлення пластичності та електропровідності металу забезпечують як можна більш повну рекристалізацію металу шляхом відпалення дроту.

Примітка. Відпалення – це термічна обробка металу, яка відбувається при нагріванні до температури рекристалізації (для міді 450–650 °С, для алюмінію 350–400 °С) і утриманні при цій температурі

впродовж визначеного терміну та наступного регульованого охолодження. В якій мірі відбулося відновлення електропровідності металу можна визначити тільки експериментально.

Багатодротові жили, скручені з відпаленого дроту, як правило, ущільнюються, стискаючи при протягуванні через твердосплавні калібри. Особливості деформацій при ущільненні полягають таким чином:

– ущільнені жили не відпалюють, а тому кристалічна структура металу залишається деформованою і електропровідність меншою;

– деформації кристалічної структури металу неоднорідні за поперечним перерізом, вони є більшими біля поверхні жили, тобто там, де найбільші деформації крутіння дроту.

Таким чином, електропровідність металу готової жили можна визначити тільки експериментально, а в будь-яких попередніх розрахунках вплив технологічних факторів має бути врахований у вигляді інтервальних оцінок, що базуються на експериментальних даних для виробництва подібної продукції з різним рівнем технології (рис. 1.6).

Відповідно вихідні дані для сировини виражені теж інтервально (табл.2.1), причому технічні вимоги до параметрів сировини є одночасно свідченням реального розсіяння різних параметрів.

Таблиця 2.1 – Базові характеристики кабельних провідників за 20 °С

Характеристика, одиниці вимірювання	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Питомий опір, мкОм · м	0,0179–0,0182	0,0172–0,0176	0,029–0,030	0,027–0,028
Міцність при розтягуванні, МПа	360–390	239–280	160–170	80–90
Відносне видовження при розриві, %	0,5–2,5	18–48	1,5–2,0	10–35
Температурний коефіцієнт електричного опору, К ⁻¹	3,8·10 ⁻³ – 3,84·10 ⁻³	3,9·10 ⁻³ – 3,95·10 ⁻³	4,00·10 ⁻³ – 4,01·10 ⁻³	4,02·10 ⁻³ – 4,04·10 ⁻³

Відносно незначні розсіяння температурного коефіцієнту електричного опору, якими в орієнтовних розрахунках можна знехтувати.

Розсіяння відносного видовження при розриві є принциповими як при виборі матеріалу провідника, так і доцільної технології його оброблення.

Сумарний вплив перших двох факторів (домішок і технологічних деформацій) відносно просто контролюють шляхом вимірювання електричного опору та геометричних параметрів провідника після його виготовлення. Визначення окремого впливу кожного з цих факторів вимагає більш складного контролю, наприклад спектрографічного аналізу домішок.

Вплив температури

Для характеристики впливу температури на електропровідність металу у відносно вузькому діапазоні температур, за яких відбувається експлуатація кабелів і залежність електричного опору від температури є хоч і нелінійною, але слабкою, використовують лінійну залежність:

$$\rho(\Theta) = \rho(20) \cdot [1 + \alpha \cdot (\Theta - 20)], \quad (2.3)$$

де Θ – температура провідника $^{\circ}\text{C}$; α – температурний коефіцієнт питомого опору, $^{\circ}\text{C}^{-1}$

Вплив температури не контролюють, а вважають визначеним за (2.3), і відповідним розрахунком результати вимірювання питомого електричного опору приводять до нормальної температури.

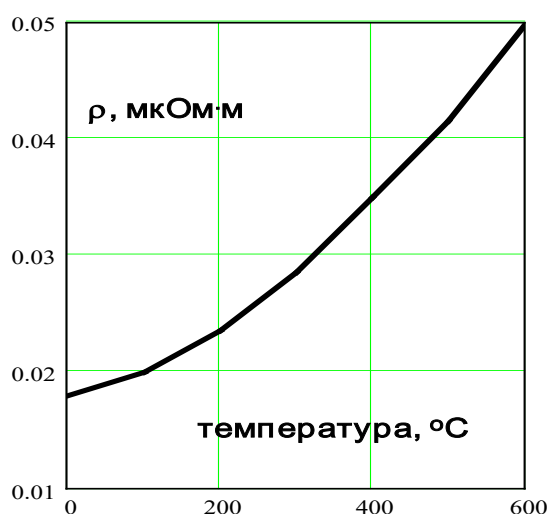


Рисунок 2.2 – Залежність питомого електричного опору міді від температури

Примітка. Середній температурний коефіцієнт питомого опору визначають за лінійною залежністю питомого опору від температури, допустимою у відносно вузькому діапазоні температур, за яких відбувається експлуатація кабелів.

Таким чином, урахування впливу зазначених факторів практично може і повинно бути виконано лише у вигляді визначення відповідних інтервалів кількісних характеристик, як для факторів впливу, так і для електричного опору жили, так і для показника собівартості технічного рішення. Тому в табл. 2.1 базові характеристики електротехнічних міді і алюмінію наведені як діапазони значень і якщо в умовах технічної задачі не зазначено інше, то розрахунки необхідно виконувати для відповідних інтервалів значень базових характеристик.

Таким чином, врахування **впливу зазначених факторів на електричний опір жил і, відповідно, на навантажувальну здатність силових кабелів, практично може і повинно бути виконано у вигляді визначення і внесення до розрахункових моделей інтервалів кількісних оцінок** арактеристик як для факторів впливу, так і для електричного опору жили.

Вплив частоти струму на електричний опір провідника

Суттєвий вплив на електричний опір металевих провідників має форма кривої напруги, яка діє на провідник. У практичних задачах розглядають, як правило, гармонічну форму. Саме про гармонічну форму змінного струму йтиметься далі завжди, якщо не зазначено інше. Відповідно кількісною характеристикою форми напруги для гармонічної функції часу є частота.

Вплив частоти змінного струму на електричний опір провідника, як і вплив інших зазначених вище факторів, залежить від структури самого металу.

Для електромагнітного поля в електропровідному середовищі згідно з рівняннями Максвелла у комплексній формі:

$$\operatorname{rot} \dot{H}_m = (\gamma + j\omega \varepsilon_a) \dot{E}_m = \delta_m + \delta_{m \text{ зм}}, \quad (2.4)$$

$$\operatorname{rot} \dot{E}_m = -j\omega \mu_a \dot{H}_m, \quad (2.5)$$

де \dot{H}_m - амплітуда напруженості магнітного поля;

\dot{E}_m - амплітуда напруженості електричного поля;

γ, ε_a – питома електропровідність та абсолютна діелектрична проникність матеріалу;

$\delta_m, \delta_{m_{зм}}$ – амплітуда густини струму електропровідності та зміщення;

ω – кругова частота.

Для рівняння (2.5) розгортання виразу для ротора $\text{rot } \dot{E}_m$ у декартових координатах дає:

$$\text{rot}_x \dot{E}_m = \frac{\partial \dot{E}_{mz}}{\partial y} - \frac{\partial \dot{E}_{my}}{\partial z}, \quad (2.6)$$

$$\text{rot}_y \dot{E}_m = \frac{\partial \dot{E}_{mx}}{\partial z} - \frac{\partial \dot{E}_{mz}}{\partial x}, \quad (2.7)$$

$$\text{rot}_z \dot{E}_m = \frac{\partial \dot{E}_{my}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{E}_{mx}}{\partial y}. \quad (2.8)$$

Для правих частин у (2.6) – (2.8) тільки другий доданок у правій частині (2.7) не дорівнює нулю, оскільки змінюється тільки проекція \dot{E}_m на вісь z вздовж осі x . Тоді (2.7) виглядає так:

$$\text{rot } \dot{E}_m = \text{rot}_y \dot{E}_m = -\frac{\partial \dot{E}_{mz}}{\partial x} = -j\omega\mu_a \dot{H}_{my}. \quad (2.9)$$

Після підстановки \dot{H}_{my} , вираженого із (2.9), у (2.4) одержимо:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_{mz}}{\partial x^2} = j\omega\mu_a(\gamma + j\omega\varepsilon)\dot{E}_{mz}, \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) має рішення як диференціальне рівняння другого порядку:

$$\dot{E}_{mz} = \dot{E}_m = \dot{C}_1 e^{-\vartheta x} + \dot{C}_2 e^{\vartheta x}, \quad (2.11)$$

де ϑ – називають коефіцієнтом розповсюдження:

$$\vartheta = (j\omega\mu_a(\gamma + j\omega\varepsilon))^{0,5}. \quad (2.12)$$

На рисунку 2.3 наведено схему векторів напруженості магнітного поля і векторів густини струму в пласкій металевій стрічці, у якої ширина стрічки $2b$ і висота стрічки $2a$ такі, що $b \ll a$.

Рішення (2.11) після підстановки його похідної по x у (2.4) дає записати вираз для амплітуди напруженості магнітного поля:

$$\dot{H}_{my} = -\frac{\vartheta}{j\omega\mu_a} \cdot (-\dot{C}_1 e^{-\vartheta x} + \dot{C}_2 e^{\vartheta x}), \quad (2.13)$$

в якому за законом повного струму при $x = 0$ напруженість магнітного поля дорівнює нулю: $\dot{H}_{my} = 0$, що можливо лише якщо $\dot{C}_1 = \dot{C}_2 = \dot{C}$, а

при $x = b$ напруженість магнітного поля дорівнює: $\dot{H}_{my} = \pm \frac{I_m}{4a} j$ (знак «-» стосується від'ємних значень x), звідки постійна \dot{C} дорівнює:

$$\dot{C} = \mp \frac{I_m \cdot j \omega \mu_a}{4a \cdot \vartheta (e^{\vartheta b} - e^{-\vartheta b})}. \quad (2.14)$$

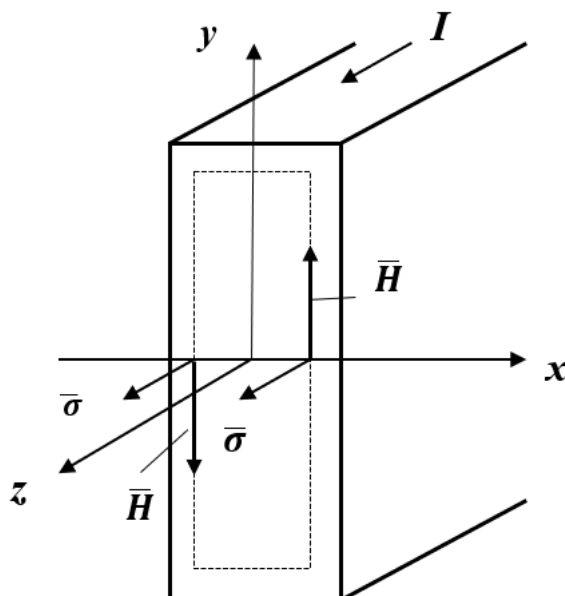


Рисунок 2.3 – Схема струмопровідної стрічки:

вектор \bar{H} має проекцію тільки на вісь y і ця проекція має похідну тільки по осі x . А вектор густини струму $\bar{\sigma}$, як і вектор напруженості електричного поля, має проекцію тільки на вісь z і, відповідно, ця проекція має похідну по осі x

Густина струму в металевій стрічці, за (2.4), (2.11), (2.14) і законом Ома в диференційній формі дорівнює:

$$\dot{\sigma}_m = \frac{I_m \cdot \sqrt{j\omega\mu_a\gamma}}{4a} \cdot \frac{ch(\vartheta x)}{sh(\vartheta b)}. \quad (2.15)$$

У (2.15) для провідників:

$$\vartheta = (j\omega\mu_a\gamma)^{0,5}. \quad (2.16)$$

Результати розрахунку за (2.16) за частоти 59 Гц наведені на рис. 2.4 у вигляді залежності дійсної складової густини струму $\text{Re}(\dot{\sigma}_m)$ в металевій стрічці від відстані до осі y .

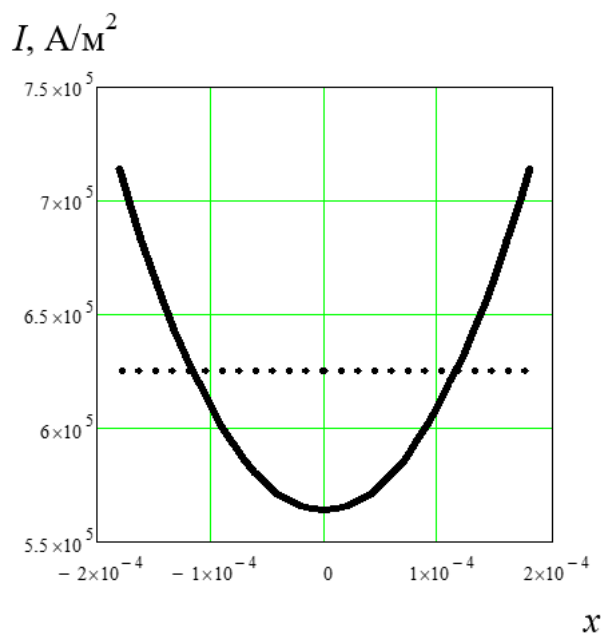


Рисунок 2.4 – Залежність густин струму промислової частоти від відстані до осі y (рис.2.3) в металевій стрічці: виглядає так, що струм начебто витісняється до поверхні провідника (поверхневий ефект або скін-ефект).

На рис.2.4 розподіл густини струму по перерізу провідника згідно (2.15) і (2.16) визначається круговою частотою ω і електрофізичними параметрами середовища.

Для немагнітних провідників ($\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), в першу чергу, це питома електропровідність металу γ .

Оскільки γ зменшується із збільшенням температури, розподіл густини змінного струму теж змінюється із зміною температури, що може бути важливим для вирішення конкретних технічних задач, наприклад, для визначення впливу поверхневого ефекту на навантажувальну спроможність силового кабелю за гранично допустимої температури.

Крім того до (2.15) входять геометричні розміри провідника, а сам вираз одержаний за умови щодо його форми і співвідношення розмірів. Таким чином (2.15) є розрахунковою моделлю саме за таких умов.

Відповідна аналітична модель існує для круглих провідників і її широко застосовують в кабельній техніці. Для фасонних провідників існують напівемпіричні моделі.

Задачі та вправи:

1. Спектрографічний аналіз зразка мідної проволочки засвідчив, що вміст всіх домішок, крім фосфору, в межах допустимого. Фосфору виявлено 0,005 %. Питома електропровідність міді становить приблизно 99 % базової величини, якщо домішка фосфору становить 0,005 %. Оцінити питомий опір дроту за температури 20 °С, якщо дріт повністю відпалений і якщо відпалення не було.

Рішення. Питома електропровідність міді становить приблизно 99 % базової величини, якщо домішка фосфору становить 0,005 %. Оскільки питома електропровідність обернено пропорційна до питомого опору ρ , то коефіцієнт пропорційності становить $0,99^{-1} = 1,0101$.

Відповідно до базових значень з табл. 2.1 значення питомого опору дроту за температури 20 °С такі:

для ММ (відпалений дріт) $\rho \in (1,737 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}; 1,778 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м})$;

для ММ (твердий дріт) $\rho \in (1,808 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}; 1,838 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м})$.

2. За умовою попередньої задачі оцінити питомий опір дроту за температур: 30 °С, 45 °С, 60 °С, 80 °С, 90 °С. Побудувати графік.

3. Чому кабельні провідники виготовляють з електролітичних міді і алюмінію та переважно волочинням? За даними табл. 2.1 оцінити питомий електричний опір жили за максимальної допустимої температури жили, вибравши залишкову деформацію $\varepsilon = 1,5$ % за даними Додатку 1:

- дріт після волочиння повністю відпалений;
- скручені жили ущільнені до коефіцієнта заповнення перерізом 0,9;
- максимальна залишкова деформація ε після повивного ущільнення 5%, а після ущільнення за зовнішнім повивом – 3 %;
- чим більше переріз жили, тим більша залишкова деформація ε .

№ з/п	Марка кабелю	Залишкова деформація ε , % (вибрати)	Питомий електричний опір жили ρ , мкОм · м за 20 °С (діапазон)	Питомий електричний опір жили ρ , мкОм м за θ_1 (діапазон)
1	АПВБШв 3×240-6	3	0,02703–0,02803	0,03460–0,03588
2	АПВГ 3×300-1			
3	ПВВГ 3×240-6			
4	ПВЕШв 1×150-35			
5	ПВЕШв 1×95-20			

Рішення. Для кабелю АПвБШв 3×240-6, як і для інших кабелів з відносно великим перерізом, обираємо середнє значення ε після повивного ущільнення, тобто 3 %. Для алюмінію питомий електричний опір без нагартування дорівнює приблизно $0,02799 \cdot 10^{-6}$ Ом·м за 20 °С, а для нагартування 3% приблизно $0,02802 \cdot 10^{-6}$ Ом·м за 20°С. Тобто нагартування 3% збільшує ρ не більше, ніж на 0,1 %. Діапазон для АМ з табл. 2.1 майже не змінився і такою різницею в інженерних розрахунках можна знехтувати. Але суттєвим у цій задачі є те, що за максимально допустимої температури 90 °С відповідний діапазон помітно зріс, що за одночасного впливу кількох факторів (температури, деформації, домішок, форми струму) може вплинути на результат.

2.1.3 Основні розрахункові моделі

2.1.3.1 Електричний опір жили постійному струму

Електричний опір скрученої жили постійному струмові $R_{жс}$ за лінійної залежності електричного опору від температури Θ :

$$R_{жс} = \rho \cdot K_y \cdot K_3 / F, \quad (2.17)$$

$$R_{жс}(\Theta) = \rho \cdot K_y \cdot K_3 [1 + \alpha (\Theta - 20)] / F, \quad (2.18)$$

де ρ – питомий електричний опір металу жили за 20 °С (табл. 2.1);

K_y – коефіцієнт укрутки (для суцільних жил $K_y = 1$), середній коефіцієнт укрутки для багатопроволочних жил дорівнює:

$$K_y = (K_1 \cdot n_1 + K_2 \cdot n_2 + \dots + K_n \cdot n_n) / n, \quad (2.19)$$

де K_i і n_i відповідно коефіцієнт укрутки в i -тому повиві, кількість проволочок в i -тому повиві;

$$K_i = \sqrt{1 + (\pi / m_i)^2}, \quad (2.20)$$

де m_i – коефіцієнт скрутки i -того повиву (відношення кроку скрутки H до діаметру жили d):

$$m_i = H / d; \quad (2.21)$$

K_3 – коефіцієнт загальної укрутки при скручуванні (для не скручених жил $K_3 = 1$):

- чи ізольованих жил в багатожилевих кабелях,
- чи сегментів жил у жилах великого перерізу сегментної конструкції;

α – температурний коефіцієнт електричного опору (табл. 2.1);

F – площа поперечного перерізу металу жили.

Формули (2.17) і (2.18) застосовують до будь-якої форми поперечного перерізу струмопровідної жили.

Задачі та вправи:

1. Практично, якщо, наприклад, радіус круглої жили кабелю чи еквівалентний радіус фасонної жили менший або дорівнює глибині проникнення a , то електричний опір жили змінному струмові $R_{жс}$ ~ дорівнює електричному опоріві $R_{жс}$ постійному струмові. За промислової частоти і 20°C a дорівнює приблизно 9 мм для міді і 11 мм для алюмінію. Оцінити різницю електричного опору нагартованої і повністю відпаленої жили за температури 90°C кабелів заданої марки:

№ п/п	Марка кабелю	Питомий електричний опір нагартованої жили ρ , мкОм м за 90°C	Електричний опір нагартованої жили R_l , Ом/ м за 90°C (діапазон)	Електричний опір ненагартованої жили R , Ом/ м за 90°C (діапазон)	Різниця $R_l - R$, Ом/ м за 90°C (діапазон)
1	АПВБШв 3×240-6	0,03460 – 0,03588	$1,524 \cdot 10^{-4}$ – $1,581 \cdot 10^{-4}$	$1,523 \cdot 10^{-4}$ – $1,579 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$ – $2 \cdot 10^{-7}$
2	АПВГ 3×300-1				
3	ПвВГ 3×240-6				
4	ПвЕШв 1×150-35				
5	ПвЕШв 1×95-20				

Рішення. Для кабелю АПВБШв 3×240-6 питомий електричний опір нагартованої жили практично такий самий, як і для ненагартованої. За (2.17), (2.18) при $K_y = 1,05$ і $K_z = 1,007$ знаходимо і заносимо до таблиці відповідні діапазони для електричного опору ненагартованої і нагартованої жили. Одержана різниця вдвічі більша для верхньої границі діапазону. Це означає, що економічні втрати від збільшення питомого електричного опору жили слід аналізувати з урахуванням всіх факторів, які спричиняють таке збільшення: домішок, технологічних деформацій, температури, тощо.

2. За даними задачі 1. оцінити різницю площі перерізу жили, еквівалентну різниці електричного опору і оцінити економічний еквівалент втрат на матеріал жили в у.о. на місячний випуск 100 км

кабелю (ціну прийняти 5 у.о. за кг міді і 2,5 у.о. за кг алюмінію.

Результати занести до таблиці:

№ п/п	Марка кабелю	Електричний опір нагартованої жили R_I , Ом/ м за 90°C	Електричний опір ненагартованої жили R , Ом/ м за 90°C	Різниця $\Delta F = F_I - F$, мм ² $\Delta F = \rho(R_I^{-1} - R^{-1})$ $\rho \in 0,034 - 0,035 $ за 90°C	Економічний еквівалент втрат на матеріал жили від нагартовки, у.о. на 100 км за 90°C
1	АПВБШв 3×240-6	$1,524 \cdot 10^{-4} - 1,581 \cdot 10^{-4}$	$1,523 \cdot 10^{-4} - 1,579 \cdot 10^{-4}$	0,146 – 0,272	98,9 – 183,9
2	АПВГ 3×300-1				
3	ПВВГ 3×240-6				
4	ПВЕШв 1×150-35				
5	ПВЕШв 1×95-20				

Рішення. Для кабелю АПВБШв 3×240-6 різниця в еквівалентній площі перерізу ΔF дуже мала. Тим не менше, відповідний економічний еквівалент, знайдений як добуток ΔF на питому масу алюмінію, на ціну і на місячну програму випуску, є суттєвим. Для міді він має бути більшим з огляду на значно більшу питому масу, більшу ціну і більшу нагартовку мідних струмопровідних жил.

2.1.3.2 Електричний опір жили змінному струму

Розглянуті у попередньому розділі приклади стосуються перерозподілу густини струму під дією власного електромагнітного поля провідника. Це – поверхневий ефект. Крім того, на розподіл густини змінного струму в провіднику впливає змінне електромагнітне поле сусідніх провідників, якщо такі є. Це – ефект близькості.

Для кількісної оцінки цих впливів застосовують коефіцієнти поверхневого ефекту y_n і ефекту близькості y_b , які дорівнюють відносному збільшенню електричного опору змінному струму під впливом відповідного ефекту ($R_{ж \sim (\text{пов})}$ і $R_{ж \sim (\text{близ})}$) порівняно з електричним опором жили $R_{ж}$ постійному струму:

$$y_n = (R_{ж \sim (\text{пов})} - R_{ж}) / R_{ж}; \quad (2.22)$$

$$y_b = (R_{ж \sim (\text{близ})} - R_{ж}) / R_{ж}, \quad (2.23)$$

де y_n і y_b залежать від геометричних і електрофізичних параметрів.

Відповідно електричний опір змінному струму:

$$R_{ж\sim} = R_{ж}(1 + y_n + y_6). \quad (2.24)$$

Ця формула є нормативною [3]. Коефіцієнти поверхневого ефекту й ефекту близькості, в першу чергу, залежать від глибини проникнення a електромагнітного поля в метал жили:

$$a = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu}}, \quad (2.25)$$

де ρ – питомий електричний опір металу жили за температури жили; f – частота; μ_0 – магнітна стала, що дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – відносна магнітна проникність, для немагнітних металів дорівнює 1.

Для визначення $R_{ж\sim}$ за (2.24) необхідно знайти y_n і y_6 – коефіцієнти поверхневого ефекту і ефекту близькості.

У практиці силових кабелів для визначення y_n і y_6 використовують спеціальні таблиці функцій аргументу x : $F(x)$, $G(x)$, $H(x)$, $Q(x)$ (табл. 2.2):

$$x = r (2/a)^{0,5}, \quad (2.26)$$

де r – радіус круглої жили чи еквівалентний радіус фасонної жили; a – глибина проникнення за (2.25);

$$y_n = F(x), \quad (2.27)$$

$$y_6 = G(x) \cdot (2r/h)^2 / [1 - H(x) \cdot (2r/h)^2], \quad (2.28)$$

де h – відстань між центрами жил, для яких визначають ефект близькості.

Для силових кабелів аргумент x визначають через опір жили постійному струмові $R_{ж}$ за формулою:

$$x = (2 \cdot f \cdot \mu_0 / R_{ж})^{0,5}; \quad (2.29)$$

де f – частота; μ_0 – магнітна константа, що дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Значення функцій у (2.27) і (2.28) наведені у табл. 2.2 для характерних відносно силових кабелів величин аргументу $x \in [0; 2,8]$. Для цього діапазону замість (2.27) і (2.28) в [3] рекомендовано формули, одержані за допомогою апроксимації табличних функцій, і які приводять до простих співвідношень:

$$y_n = [(6,93 R/f\mu_0)^2 + 0,8]^{-1}; \quad (2.30)$$

$$y_6 = 2,9(2r/h)^2 \cdot y_n. \quad (2.31)$$

Формули (2.30) і (2.31) є зручними для використання в багатовимірних моделях, якщо необхідне спільне врахування конструктивних, електричних, теплових та економічних параметрів кабелю при визначенні пропускну здатності.

Відносне збільшення електричного опору змінному струму для різних значень площі перерізу жили кабелю (рис. 2.5, а) становить від кількох відсотків для площі (300–500) мм² до кількох десятків відсотків для площі (600–1300) мм², що зумовлювало б значні економічні втрати, тому для жил перерізом від 400 мм² застосовують сегментну конструкцію жили (див. табл. 2.3).

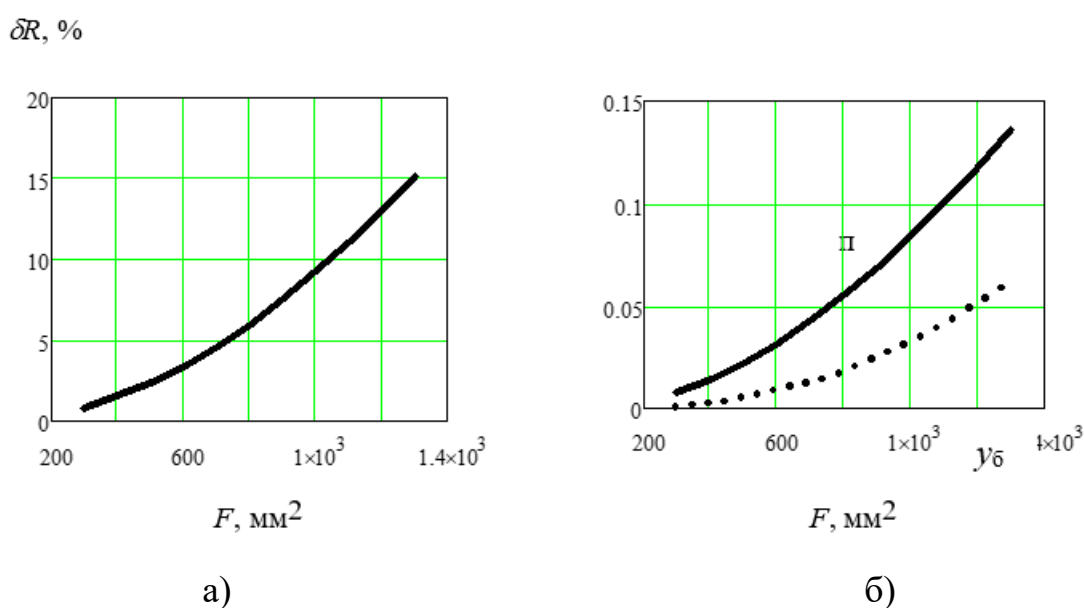


Рисунок 2.5 – Залежності характеристик впливу вихрових струмів на електричний опір жили від площі її поперечного перерізу, розраховані за (2.24) і (2.25):

a – для відносного збільшення опору δR , %;

б – для коефіцієнта поверхневого ефекту $\gamma_{\text{п}}$ і ефекту близькості.

Вплив поверхневого ефекту на збільшення електричного опору в кілька разів перевищує вплив ефекту близькості (рис. 2.5, б), але ці впливи співмірні. Фізична суть коефіцієнта близькості свідчить про його принципову залежність від взаємного розташування жил кабелю в лінії з кількох кабелів.

Глибина проникнення *a* – це відстань від поверхні провідника, на якій густина струму менша в *e*-раз, ніж біля поверхні, якщо товщина

провідника значно більша за a . Тепловий ефект струму, що протікає в поверхневому шарі товщиною a , такий самий, як в усьому провіднику, якщо густина струму в межах цього шару така, як біля поверхні провідника. Тобто глибина проникнення відображає тепловий ефект струму і її можна використати для оцінки економічних втрат V від збільшення електричного опору змінному струму.

Збільшення опору при рівномірному розподілі густини струму по перерізу жили обернено пропорційне зменшенню його перерізу.

Критерієм доцільності застосування конструктивних рішень у конкретному випадку має бути економічний критерій, наприклад, вартість тієї частини матеріалу жили, яка використовується неефективно за змінного струму.

Для круглих жил втрати від збільшення електричного опору змінному струмові як еквівалент вартості металу, який використовується неефективно:

$$V = Ci \cdot F \cdot \gamma \left[1 - a\pi \frac{(d-a)}{F} \right], \quad (2.32)$$

де вираз у дужках – це коефіцієнт втрат k_v ; Ci – ціна одиниці маси металу провідника; F – площа поперечного перерізу провідника; d – діаметр жили; γ – питома маса металу провідника.

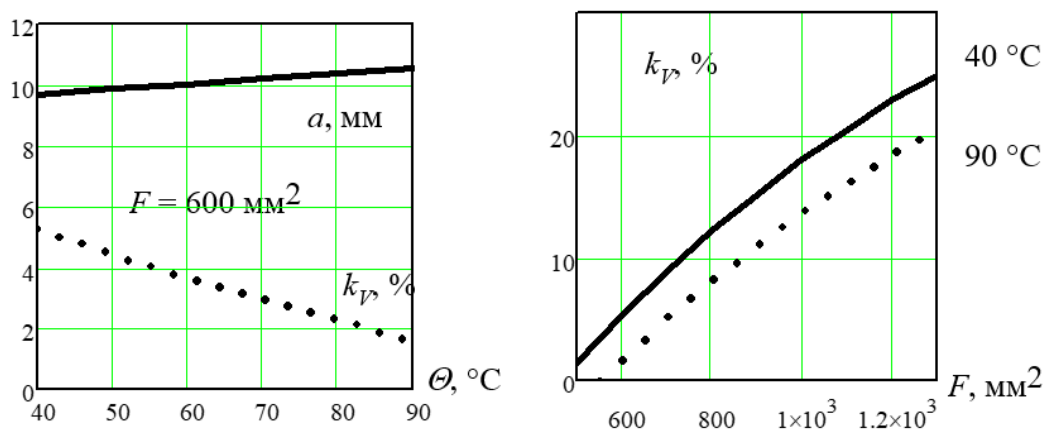


Рисунок 2.6 – Залежності коефіцієнта втрат k_v у відсотках, розрахованих за (2.32), як частка вартості матеріалу жили, який використовується неефективно через збільшення електричного опору за змінного струму: a – глибина проникнення і k_v від температури для жили 600 мм^2 ; b – k_v від площі перерізу за різних температур

Те, що найпростіша модель (2.32) може надати суттєву інформацію для прийняття технічного рішення ілюструє рис. 2.6, на якому видно, що при збільшенні температури жили втрати від збільшення електричного опору змінному струму зменшуються через збільшення глибини проникнення (рис. 2.6, а) і чим більша площа перерізу жили, тим різниця між економічними втратами при різних температурах більша (рис. 2.6, б).

Таблиця 2.2 – Значення функцій $F(x)$, $G(x)$, $H(x)$, $Q(x)$ для врахування впливу скін-ефекту на електричні параметри кабелю

x	$F(x)$	$G(x)$	$H(x)$	$Q(x)$
0,5	0	0,001	0,042	1,0
1,0	0,005	0,015	0,053	0,997
1,5	0,026	0,069	0,092	0,987
2,0	0,078	0,172	0,169	0,961
2,2	0,111	0,221	0,205	0,945
2,4	0,152	0,270	0,242	0,925
2,6	0,201	0,318	0,280	0,901

Висновок. Залежно від конкретної технічної задачі розрахунок електричного опору жили силового кабелю за змінного струму може бути виконано на різному рівні деталізації:

1) визначити глибину проникнення a електромагнітного поля в метал жили за (2.25) і, якщо радіус круглої жили чи еквівалентний радіус фасонної жили менший або дорівнює глибині проникнення a , то електричний опір жили змінному струмові $R_{ж}$ дорівнює електричному опоріві $R_{ж}$ постійному струмові, визначеному за (2.17), (2.18);

2) визначити глибину проникнення a електромагнітного поля в метал жили за (2.25) і, якщо радіус круглої жили чи еквівалентний радіус фасонної жили більший за глибину проникнення a , то для жил невеликого перерізу (до 300 мм² включно) несегментної конструкції достатньо оцінити вплив поверхневого ефекту, прийнявши $y_6 = 0$;

3) для жил великого перерізу (більше 300 мм^2) несементної конструкції необхідно оцінити електричний опір за (2.17) і (2.18), і після визначення коефіцієнта поверхневого ефекту і коефіцієнта ефекту близькості, знайти електричний опір змінному струму за (2.24). При цьому значення відстані між центрами жил h , за яким знаходять y_6 , необхідно визначити для конкретного розташування жил у кабелі чи одножильних кабелів у лінії з урахуванням форми жил (див. наступний розділ);

4) для жил великого перерізу сегментної конструкції необхідно оцінити електричний опір за (2.24), де коефіцієнти поверхневого ефекту y_n і ефекту близькості y_6 слід визначити за наступним розділом.

Задачі та вправи:

1. Розрахувати електричний опір жили змінному струму $R_{ж\sim}$ для кабелю ПвПЕГ $1 \times 1000-220$ мідної жили (середній коефіцієнт укрутки $K_y = 1,02$) перерізом 1000 мм^2 за температури $70 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо відстань між осями жил сусідніх кабелів дорівнює 85 мм .

Рішення. Електричний опір $R_{ж}$ мідної жили перерізом 1000 мм^2 при $70 \text{ }^\circ\text{C}$ постійному струму за (2.17) з урахуванням скручування та лінійної залежності опору від температури:

$$R_{ж} = 0,01724 \cdot 10^{-6} \cdot 1,02 \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (70 - 29)] = 2,11 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м.}$$

Електричний опір жили змінному струму за (2.24), (2.26), (2.27), (2.28) і табл. 2.2:

$$x = (2 \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} / 2,11 \cdot 10^{-5})^{0,5} = 2,44;$$

$$y_i = F(2,44) = 0,16;$$

$$y_a = \frac{G(2,44) \cdot (2 \cdot 20,8 / 85)^2}{1 - H(2,44) \cdot (2 \cdot 20,8 / 85)^2} = 0,071;$$

$$R_{ж\sim} = 2,11 \cdot 10^{-5} (1 + 0,16 + 0,071) = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м.}$$

2. Розрахувати коефіцієнт ефекту близькості y_6 для багатодротових ущільнених жил кабелів ПвПЕГ $1 \times 625-220$, розташованих правильним трикутником впритул за максимальної допустимої температури.

3. Розрахувати коефіцієнт поверхневого ефекту y_n для багатодровових ущільнених жил кабелів ПвПЕг 1×625-220 за максимальної допустимої температури.

4. Розрахувати коефіцієнт ефекту близькості y_b для багатодровових ущільнених жил кабелів ПвПЕг 1×625-220, розташованих у площині на відстані діаметра один від одного за максимальної допустимої температури.

5. Розрахувати коефіцієнт поверхневого ефекту y_n для багатодровових ущільнених жил кабелів ПвПЕг 1×400-220 за максимальної допустимої температури.

6. Побудувати графік залежності відносного збільшення електричного опору змінному струму порівняно з електричним опором постійному струму від номінальної площі перерізу круглої багатодрової ущільненої алюмінієвої жили в діапазоні перерізів від 300 мм² до 1300 мм² для температур 40 °С і 90 °С. Два одножилні кабелі розташовані впритул, а діаметральна товщина всіх елементів конструкції поверх жили дорівнює 64 мм. Прийняти коефіцієнт заповнення перерізу жили $\eta = 0,95$. Укрутку не враховувати.

Рішення. Діаметри струмопровідних жил визначаємо у заданому діапазоні перерізів за формулою:

$$d = (4 F / \pi \eta)^{0,5}. \quad (2.33)$$

Значення площі перерізу і діаметра жили заносимо до табл. 2.3. За (2.17, 2.18) визначаємо електричний опір постійному струму за двох температур $R(40)$ і $R(90)$, а за (2.29) значення аргументу x для розрахунку коефіцієнтів поверхневого ефекту y_n і ефекту близькості y_b . За (2.30) і (2.31) знаходимо коефіцієнти y_n і y_b , а за (2.24) значення електричного опору змінному струму. Всі результати заносимо до табл. 2.3.

Відносне збільшення електричного опору змінному струму порівняно з опором постійному струму виражаємо у відсотках і будуємо відповідний графік.

Суттєвим висновком цих розрахунків є те, що відносне збільшення електричного опору змінному струму порівняно з опором постійному струму є помітно більшим за робочих температур (40–60 °С), ніж за

гранично допустимої 90 °С і ця різниця збільшується зі збільшенням площі перерізу жили. Тому визначення навантажувальної здатності конкретних кабелів в конкретних умовах експлуатації має бути елементом оптимізації електроспоживання.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків

F , мм ²	d , мм	$R(40)$, Ом/м	$R(90)$, Ом/м	$x(40)$	$x(90)$	$R_{\sim}(40)$, Ом/м	$R_{\sim}(90)$, Ом/м	$\delta R_{\sim}(40)$, %	$\delta R_{\sim}(90)$, %
300	20,05	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	1,12	1,03	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	0,84	0,60
400	23,15	$7,56 \cdot 10^{-5}$	$8,96 \cdot 10^{-5}$	1,29	1,18	$7,67 \cdot 10^{-5}$	$9,06 \cdot 10^{-5}$	1,49	1,07
500	25,89	$6,05 \cdot 10^{-5}$	$7,17 \cdot 10^{-5}$	1,44	1,32	$6,19 \cdot 10^{-5}$	$7,29 \cdot 10^{-5}$	2,34	1,68
600	28,36	$5,04 \cdot 10^{-5}$	$5,97 \cdot 10^{-5}$	1,58	1,45	$5,21 \cdot 10^{-5}$	$6,12 \cdot 10^{-5}$	3,37	2,42
700	30,63	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$	1,71	1,57	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$5,29 \cdot 10^{-5}$	4,58	3,29
800	32,74	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$4,48 \cdot 10^{-5}$	1,82	1,67	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$4,67 \cdot 10^{-5}$	5,96	4,30
900	34,73	$3,36 \cdot 10^{-5}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$	1,93	1,78	$3,61 \cdot 10^{-5}$	$4,20 \cdot 10^{-5}$	7,50	5,43
1000	36,61	$3,02 \cdot 10^{-5}$	$3,58 \cdot 10^{-5}$	2,04	1,87	$3,30 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	9,20	6,68
1100	38,40	$2,75 \cdot 10^{-5}$	$3,26 \cdot 10^{-5}$	2,14	1,96	$3,05 \cdot 10^{-5}$	$3,52 \cdot 10^{-5}$	11,03	8,04
1200	40,10	$2,52 \cdot 10^{-5}$	$2,99 \cdot 10^{-5}$	2,23	2,05	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$3,27 \cdot 10^{-5}$	13,00	9,51
1300	41,74	$2,33 \cdot 10^{-5}$	$2,76 \cdot 10^{-5}$	2,32	2,13	$2,68 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{-5}$	15,08	11,08

2.1.3.3 Вплив конструкції кабелю на електричний опір жили

Крім параметрів скручування, які впливають на електричний опір жили і постійному, і змінному струмові, інші конструктивні особливості кабелю впливають тільки на опір змінному струмові, а отже, на значення $u_{\text{п}}$ і $u_{\text{б}}$ – коефіцієнтів поверхневого ефекту і ефекту близькості.

На величину $u_{\text{п}}$ впливає тільки конструкція самої жили, а на величину $u_{\text{б}}$ впливають і конструкція жили, і їх взаємне розташування в кабелі чи лінії. Тому впливи ці різні і їх визначають за допомогою експериментально визначених коефіцієнтів [3], які змінюють значення аргументу x , визначене за (2.26) чи (2.29). Для конструкцій, які розглянуті в діючих стандартах [3], значення відповідних коефіцієнтів наведені в табл. 2.4. Для інноваційних конструкцій значення відповідних коефіцієнтів мають бути експериментально визначені.

Емпіричні коефіцієнти k_s і k_p , визначені експериментально для конструкції жили, в якій передбачені заходи зменшення впливу вихрових струмів, дозволяють визначити зменшений аргумент x_s поверхневого ефекту і зменшений аргумент ефекту близькості x_p :

$$x_s = r (2 \cdot k_s)^{0,5} / a; \quad (2.34)$$

$$x_p = r (2 \cdot k_p)^{0,5} / a, \quad (2.35)$$

де r – радіус жили; a – глибина проникнення за (2.25).

Наприклад, ізолювання і скручування окремих багатодротових сегментів в жилу (сегментна конструкція) зменшує аргумент поверхневого ефекту на 66 % ($0,435^{0,5} = 0,66$), а аргумент ефекту близькості – на 60,8 % ($0,37^{0,5} = 0,608$) (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Значення емпіричних коефіцієнтів k_s і k_p для врахування впливу вихрових струмів на електричний опір струмопровідних жил кабелю

Тип жили	Висушена і імпрегнована чи ні	k_s	k_p
Кругла скручена	так	1	0,8
Кругла скручена	ні	1	1
Кругла ущільнена	так	1	0,8
Кругла ущільнена	ні	1	1
Кругла сегментна	так	0,435	0,37
Порожниста, скручена		**	0,8
Секторна	так	1	0,8
Секторна	ні	1	1

Примітка. Для порожнистої (з центральним маслопровідним каналом), скрученої жили: $k_s = (d - dk)(d + 2dk)^2 / (d + dk)^3$, d – де діаметр жили; dk – діаметр центрального каналу жили.

У формули (2.30) і (2.31), одержані за допомогою апроксимації табличних функцій, аргумент x не входить в явному вигляді, тому в разі застосування відомих конструктивних заходів зменшення впливу вихрових струмів для обчислення опору змінному струму $R \approx$ при прокладанні кабелів по вершинах рівностороннього трикутника доцільно користуватись формулою:

$$R \approx R \cdot \left[1 + \frac{(x_s)^4}{192 + 0,8(x_s)^4} (x_s)^4 \cdot \frac{\left(\frac{d}{h}\right)^2 \cdot 2,9}{192 + 0,8(x_p)^4} \right], \quad (2.36)$$

де x_s і x_p визначені формулами (2.34) і (2.35); R – опір постійному струму; d – діаметр жили; h – відстань між осями жил.

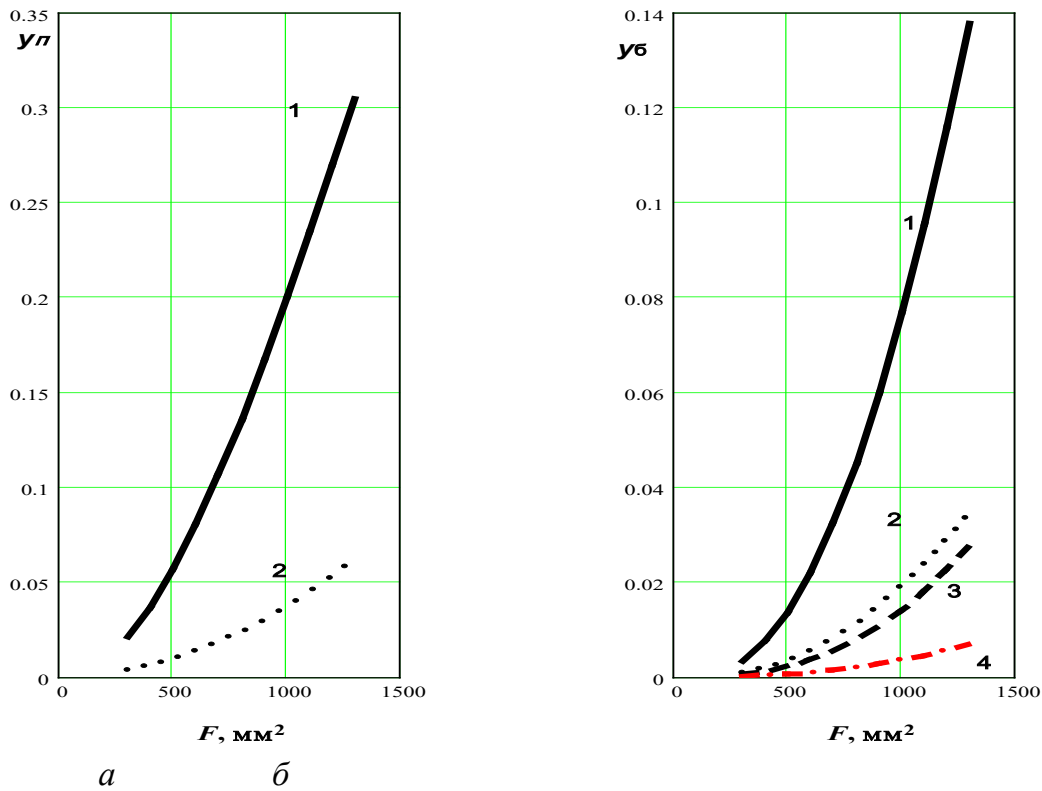


Рисунок 2.7 – Залежності коефіцієнтів поверхневого ефекту y_n (а) і ефекту близькості y_b (б) від площі поперечного перерізу жили для двох одножилевих кабелів промислової частоти: 1 – кругла багатодротова ущільнена жила і кабелі прокладені впритул; 2 – сегментна жила з коефіцієнтами зменшення аргументу $k_p = k_s = 0,4$ і кабелі прокладені впритул; 3 – кругла багатодротова ущільнена жила і кабелі прокладені на відстані діаметра один від одного; 4 – сегментна жила з коефіцієнтом зменшення аргументу $k_p = k_s = 0,4$, кабелі прокладені на відстані діаметра один від одного

Порівняння кривих на цьому рисунку свідчить про те, що і застосування сегментної конструкції жили, і збільшення відстані між кабелями при прокладанні дозволяють значно зменшити вплив вихрових струмів на електричний опір змінному струмові в силових кабелях з площею перерізу струмопровідних жил 500 мм^2 і більшою.

Конструктивні заходи для зменшення впливу вихрових струмів вимагають значних додаткових технологічних і матеріальних витрат, тому важливе визначення їх ефективності.

Очевидно, що критерієм доцільності застосування відповідних конструктивних рішень у кожному конкретному випадку має бути

економічний критерій, подібний до наведеного (2.32) і введений розрахункову модель для визначення пропускної здатності кабелю. Але в такому разі до втрат за (2.32) необхідно додати додаткові технологічні втрати V_t на виготовлення, наприклад, сегментної жили і втрати на додаткові матеріали в такій конструкції:

$$V = CiF\gamma \left[1 - a\pi \frac{d-a}{F} \right] + V_t + k_m Ci_m F \gamma_m, \quad (2.37)$$

де Ci – ціна одиниці маси металу жили; F – площа поперечного перерізу жили; d – діаметр жили; γ – питома маса металу жили; a – глибина проникнення; k_m – відношення площі додаткових елементів конструкції жили до її номінальної площі перерізу; Ci_m – середня ціна матеріалів додаткових елементів жили; γ_m – середня питома маса матеріалів додаткових елементів жили.

У підсумку треба зазначити як найбільш очевидне:

1) збільшення електричного опору змінному струмові за рахунок впливу вихрових струмів для жил великого перерізу може досягати до 50 % від електричного опору постійному струмові, тому для жил перерізом від 400 мм² і більших застосовують жили зі скручених між собою та ізольованих один від одного окремих сегментів; це дозволяє зменшити вплив вихрових струмів у кілька разів;

2) зменшення впливу вихрових струмів на електричний опір змінному струму за рахунок застосування сегментної конструкції жил відносно однакове і для поверхневого ефекту, і для ефекту близькості; кількісно обидві складові впливу визначають експериментально і вводять у розрахункові моделі у вигляді емпіричних коефіцієнтів;

3) на зменшення ефекту близькості, крім застосування сегментної конструкції жил, суттєво впливає взаємне розташування жил, наприклад, прокладання одножильних кабелів на відстані їх зовнішнього діаметра зменшує вплив ефекту близькості втричі.

Задачі та вправи:

1. Побудувати графіки залежності відношення електричного опору змінному струму до опору постійному струму від номінальної площі перерізу круглої багатодрової ущільненої алюмінієвої жили сегментної

конструкції в діапазоні перерізів від 300 мм² до 1000 мм² для температур 40 °С і 90 °С. Три одножильні кабелі розташовані трикутником **впритул**, а діаметральна товщина всіх елементів конструкції кабелю поверх жили дорівнює 55 мм. Прийняти коефіцієнт заповнення перерізу жили $\eta = 0,95$.

Рішення. У (2.36) множник до величини опору (постійний струм) і є шукане відношення. Діаметри струмопровідних жил і електричний опір постійному струму за двох температур $R(40)$ і $R(90)$ визначаємо у заданому діапазоні перерізів за (2.18), а значення аргументів x_s і x_p , вибравши коефіцієнти k_s і k_p з табл. 2.4:

$$x_s = r (2 k_s)^{0,5} / a = x k_s^{0,5}; \quad x_p = r (2 k_p)^{0,5} / a = x k_p^{0,5},$$

де значення аргументу x за температур 40 °С і 90 °С взяті з табл. 2.3.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунків

F , мм ²	d , мм	$x_s(40)$	$x_s(90)$	$x_p(40)$	$x_p(90)$	$R_{\sim}(40)$, Ом/м	$R_{\sim}(90)$, Ом/м	$\delta R_{\sim}(40)$, %	$\delta R_{\sim}(90)$, %
300	20,05	0,739	0,680	0,681	0,626	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	0,178	0,128
400	23,15	0,851	0,779	0,784	0,717	$7,58 \cdot 10^{-5}$	$8,98 \cdot 10^{-5}$	0,323	0,226
500	25,89	0,950	0,871	0,876	0,803	$6,08 \cdot 10^{-5}$	$7,19 \cdot 10^{-5}$	0,514	0,363
600	28,36	1,043	0,975	0,961	0,882	$5,08 \cdot 10^{-5}$	$6,01 \cdot 10^{-5}$	0,761	0,541
700	30,63	1,129	1,036	1,040	0,955	$4,37 \cdot 10^{-5}$	$5,16 \cdot 10^{-5}$	1,064	0,757
800	32,74	1,201	1,102	1,107	1,015	$3,83 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$	1,388	0,987
900	34,73	1,274	1,175	1,173	1,082	$3,42 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-5}$	1,782	1,293
1000	36,61	1,346	1,234	1,240	1,137	$3,09 \cdot 10^{-5}$	$3,64 \cdot 10^{-5}$	2,254	1,597

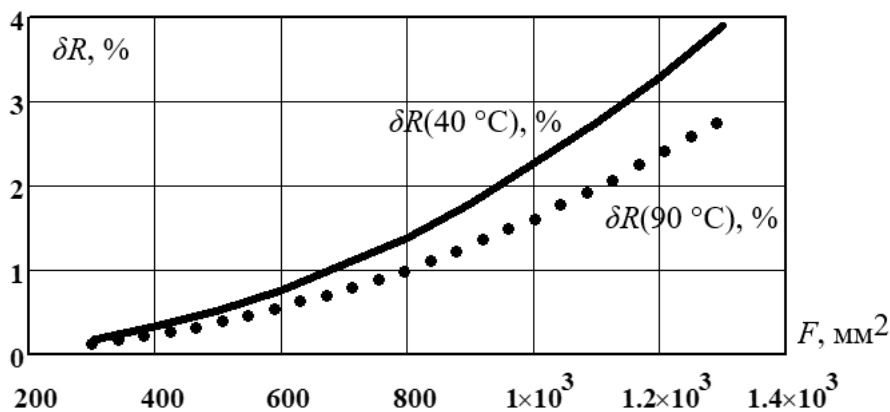


Рисунок 2.8 – Орієнтовні графіки залежності відношення електричного опору змінному струму до опору постійному струму від номінальної площі перерізу жили сегментної конструкції

Порівняння кривих на рис. 2.8 з результатами в таблиці 2.3 свідчить про те, що для жил перерізом від 600 мм² і більших, застосування жил із скручених між собою і ізольованих один від одного окремих сегментів, дозволяє значно зменшити вплив вихрових струмів у кілька разів.

2. Побудувати графіки залежності відношення електричного опору змінному струму до опору постійному струму від номінальної площі перерізу круглої багатодротової ущільненої алюмінієвої жили сегментної конструкції в діапазоні перерізів від 300 мм² до 1000 мм² для температур 40 °С і 90 °С. Три одножильні кабелі розташовані трикутником **на відстані діаметра один від одного**, а діаметральна товщина всіх елементів конструкції кабелю поверх жили дорівнює 55 мм. Прийняти коефіцієнт заповнення перерізу жили $\eta = 0,95$.

3. Побудувати графік залежності відносного збільшення електричного опору змінному струму порівняно з електричним опором постійному струму від номінальної площі перерізу круглої багатопроволочної ущільненої мідної жили в діапазоні перерізів від 300 мм² до 1300 мм² для температур 40 °С і 90 °С. Три одножильні кабелі розташовані в площині впритул, а діаметральна товщина всіх елементів конструкції поверх жили дорівнює 74 мм. Прийняти коефіцієнт укрутки $K_y = 1,11$.

2.2. Втрати в елементах конструкції кабелю

2.2.1. Загальні положення

Універсальна модель розрахунку номінального струму (1.18) відображає загальний принцип розрахунку тривало допустимого струму кабелю. Для конкретного типу кабелю має бути визначена відповідна схема заміщення теплового потоку в кабелі, яка відповідає особливостям конструкції саме цього типу. На такій схемі мають бути зазначені **всі суттєві джерела тепла в кабелі і всі суттєві теплові опори тепловому потоку**.

Крім виділення тепла в жилі, в електропровідних елементах кабелів змінного струму, таких як металева оболонка, електропровідний екран, металева броня, виділяється тепло і потужність втрат пропорційна

потужності, що виділяється в жилі, оскільки вказані втрати мають індукційну природу.

Впливом вихрових струмів на електричний опір металевих екранів, оболонок і броні за промислової частоти нехтують, якщо їх товщина значно менша за глибину проникнення електромагнітного поля в метал. Хоча через вплив вихрових струмів на втрати в жилі останні можуть опосередковано впливати на втрати в металевих елементах кабелю.

Тому в [3] загальна формула для фактора втрат:

$$k = k' + k'', \quad (2.38)$$

де k' – фактор втрат, зумовлених циркуляційними струмами, наведеними в металевому елементі k ; k'' – фактор втрат, зумовлених вихровими струмами.

Втрати, зумовлені вихровими струмами в металевих захисних елементах суттєві, якщо втрати від циркуляційних струмів дорівнюють нулю. Це можливо для такого прокладання, коли практично немає кола циркуляційного струму. Наприклад, оболонки з'єднані в одній точці чи поперечно з'єднані. У такому разі фактор втрат k'' обчислюють за формулами, наведеними в додатку.

В інших випадках впливом вихрових струмів на електричний опір металевих екранів, оболонок і броні за промислової частоти нехтують і втрати в металевому елементі $P_{\text{ел}}$ пропорційні до втрат в жилі:

$$P_{\text{ел}} = k_{\text{ел}} \cdot P_{\text{ж}} = k_{\text{ел}} I^2 R_{\text{ж}}, \quad (2.39)$$

де I – струм в жилі, визначення якого за максимальної допустимої температури (номінальний струм) є головним завданням при розрахунках навантажувальної здатності кабелю; $k_{\text{ел}}$ – коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, теплова потужність, яка виділяється в електропровідних елементах конструкції кабелю змінного струму в номінальному режимі, може бути знайдена тільки після визначення номінального струму. Для цього необхідно визначити коефіцієнти пропорційності втрат у металевих елементах до загальних втрат в усіх жилах кабелю k_1, k_2, \dots, k_q , де q – кількість металевих елементів, виділення тепла в яких є пропорційним виділенню тепла в жилі і є

суттєвим для нагрівання кабелю. Причини, за яких ці коефіцієнти можуть бути визначені тільки приблизно і для кожного конкретного кабелю:

1) очевидно, що значення коефіцієнтів k_1, k_2, \dots, k_q залежать від електричного опору відповідних елементів, який є параметром, залежним від температури (невідомо);

2) індукційні втрати залежать від конкретної схеми електричних з'єднань елементів в лінії, наприклад, металева оболонка кабелю може бути заземлена на обох кінцях лінії, на одному кінці лінії, в кількох місцях впродовж лінії і та ін.;

3) до металевих елементів, виділення тепла в яких є пропорційним виділенню тепла в жилі і є суттєвим для нагрівання кабелю, можуть належати не тільки елементи конструкції кабелю, наприклад, металева труба, в якій прокладено кабель.

Тому коефіцієнти пропорційності втрат у металевих елементах до загальних втрат в усіх жилах кабелю k_1, k_2, \dots, k_q мають бути визначені, по-перше, для конкретної конструкції і конкретного застосування кабелю і, по-друге, за відповідних припущень щодо температури відповідних елементів з подальшим уточненням (ітераційний розрахунок).

Щоб знайти втрати в металевих елементах кабелю, необхідно визначити коло струму, яке включає даний елемент, і визначити електричні параметри цього кола в даній кабельній лінії. Наприклад, якщо металеві оболонки двох одножильних кабелів в лінії з'єднані на обох кінцях лінії, то є два контури I і II з протилежно напрямленими струмами $\dot{I}_{об}$ і $\dot{I}_{ж}$ (рис. 2.9). Електромагнітний зв'язок цих контурів характеризується коефіцієнтом взаємоіндукції M_{I-II} і зумовлює появу струму $\dot{I}_{об}$ в контурі оболонок під дією струму в контурі жил $\dot{I}_{ж}$. Електрорушійна сила в контурі оболонок формується під дією електромагнітного поля обох протилежно напрямлених струмів: $j\omega M_{I-II} (\dot{I}_{ж} - \dot{I}_{об})$. Вона дорівнює падінню напруги в оболонці:

$$j\omega M_{I-II} (\dot{I}_{ж} - \dot{I}_{об}) = R_{об} \cdot \dot{I}_{об}, \quad (2.40)$$

звідки витікає, що відношення струмів в контурах:

$$\left| \dot{I}_{об} / \dot{I}_{ж} \right| = [1 + (R_{об} / \omega M_{I-II})^2]^{-0.5}. \quad (2.41)$$

За (2.41) відношення потужності втрат у контурах I і II:

$$P_{об} / P_{ж} = [1 + (R_{об} / \omega M_{I-II})^2]^{-1} R_{об} / R_{ж}. \quad (2.42)$$

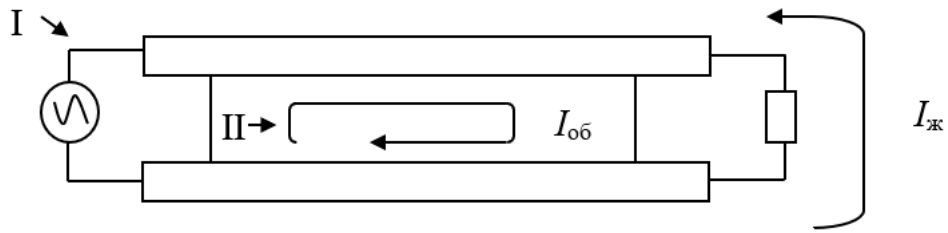


Рисунок 2.9 – Схема з'єднання металевих оболонок двох одножильних кабелів: з'єднані на обох кінцях лінії оболонки утворюють контур II, що перетинається з контуром I, в якому протікає струм $I_{ж}$

Ця схема є достатньо загальною, її застосовують і до інших металевих елементів конструкції кабелю (металевих екранів, броні), які утворюють контур, в якому наводиться струм під дією струму в контурі жил. Тому для розрахунку коефіцієнта пропорційності втрат у металевому елементі до загальних втрат в усіх жилах кабелю використовують фактор втрат – відношення потужності втрат в контурах I і II:

$$K_{II} = P_{II} / P_I = [1 + (R_{II} / \omega M_{I-II})^2]^{-1} R_{II} / R_I, \quad (2.43)$$

де P_I – втрати в жилі: $P_I = I_{ж}^2 R_{ж}$, де $R_{ж}$ визначають за (2.17).

Значення k_{II} згідно з (2.50) визначаються електричним опором відповідного металевого елемента, електричним опором жили, коефіцієнтом взаємодуції M_{I-II} , тому залежать від конструкції самого елемента і конструкції конкретного кабелю.

До кабелів із взаємно симетричним розташуванням фаз належать такі, в яких різницею між електромагнітним впливом сусідніх фаз можна знехтувати. До таких належать два одножильні кабелі і три одножильні кабелі, розташовані по вершинах правильного трикутника. За такого розташування і при з'єднанні металевих оболонок чи екранів на обох кінцях лінії коефіцієнт взаємодуції M_{I-II} однаковий для всіх фаз і дорівнює:

$$M_{I-II} = 0,5 \mu_0 \cdot \ln(2 \cdot h/d) / \pi, \quad (2.44)$$

де h – відстань між осями жил в контурі I;

d – середній діаметр оболонки чи екрана, що утворюють контур II.

Величиною k'' фактора втрат, зумовлених вихровими струмами, нехтують для всіх кабелів, крім тих, що мають жили з великою площею перерізу сегментальної конструкції. Тоді фактор втрат у металевому елементі конструкції кабелю (контур II):

$$k_{II} = P_{II} / P_I = [1 + (R_{II} / \omega [0,5 \mu_0 \cdot \ln(2 \cdot h/d)/\pi])^2]^{-1} R_{II} / R_I. \quad (2.45)$$

Задачі та вправи:

1. Обчислити електричний опір оболонки кабелю марки ОСБ 3×240-35.

Рішення. У кабелі ОСБ 3×240-35 суцільна свинцева оболонка охоплює кожну з трьох жил. Товщина оболонки в середньому дорівнює $\Delta_{об} = 1,5$ мм, тобто є значно меншою, ніж глибина проникнення a свинцю за промислової частоти і температури 20 °С (за $\rho = 0,209 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $a = 33$ мм), тому впливом вихрових струмів на опір оболонки нехтуємо. Для обчислення опору оболонки необхідні значення її площі поперечного перерізу $F_{об}$ і коефіцієнта укрутки при загальному скручуванні ізольованих жил в кабель K_u :

$$K_u = 1,007 [1]. F_{об} = 2\pi \cdot (r_{ж} + 2 \cdot \Delta_e + \Delta_{із} + \Delta_{об}/2) \cdot \Delta_{об} = 177,6 \text{ мм}^2,$$

де $r_{ж}$ – радіус неущільненої жили, $r_{ж} = (240/0,75\pi)^{0,5} = 10,1$ мм;

Δ_e – товщина екрана, $\Delta_e = 0,5$ мм;

$\Delta_{із}$ – товщина ізоляції, $\Delta_{із} = 7,0$ мм.

Електричний опір оболонки $R_{об}$

$$R_{об} = \rho \cdot K_u / F_{об} = 0,209 \cdot 10^{-6} \cdot 1,007 / 177,6 \cdot 10^{-6} = 1,185 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м.}$$

2. Яка конструкція мідного екрану кабелю ПвПЕГ 1×400-220?

Рішення. У кабелі ПвПЕГ 1×400-220 мідний екран складається з мідної стрічки, намотаної на напівпровідний екран ізольованої жили, і мідних дротів, скручених поверх мідної стрічки.

3. Знайти коефіцієнт взаємоіндукції контуру жил та контуру оболонок для двох паралельних кабелів ПвСГ 1×240-6 із зовнішнім діаметром 32,3 мм, товщиною оболонки із свинцю 1,95 мм при розташуванні кабелів на відстані рівній діаметру кабелю.

2.2.2. Втрати в металевих елементах без феромагнітних впливів
Взаємно симетричне розташування фаз

Для двох одножильних і для трьох одножильних кабелів, розташованих по вершинах правильного трикутника, за (2.44) величина коефіцієнта взаємоіндукції визначена тією частиною магнітного поля жил у металевих оболонках, яка перетинає обидва контури (заштрихована ділянка на рис. 2.14):

$$M_{I-II} = 0,5 \mu_0 \cdot \ln(2 \cdot h/d)/\pi, \quad (2.46)$$

де h – відстань між центрами жил; d – діаметр жили.

За (2.46) визначають коефіцієнт взаємоіндукції для немагнітних металевих елементів конструкції кабелів без магнітної броні. Такими є металеві оболонки та екрани. Тоді коефіцієнт індукційних втрат (фактор втрат від циркуляційних струмів k' [3]) в оболонці чи екрані дорівнює:

$$k_{об} = \frac{(\omega \cdot M_{об})^2}{R_{об}^2 + (\omega \cdot M_{об})^2} \cdot \frac{R_{об}(\theta_{об})}{R_{ж}(\theta_{ж})}, \quad (2.47)$$

де значення електричних опорів змінному струму мають бути визначені відповідно за температурою оболонки і жили. Відповідні температурні коефіцієнти свинцю й алюмінію в табл. 2.6.

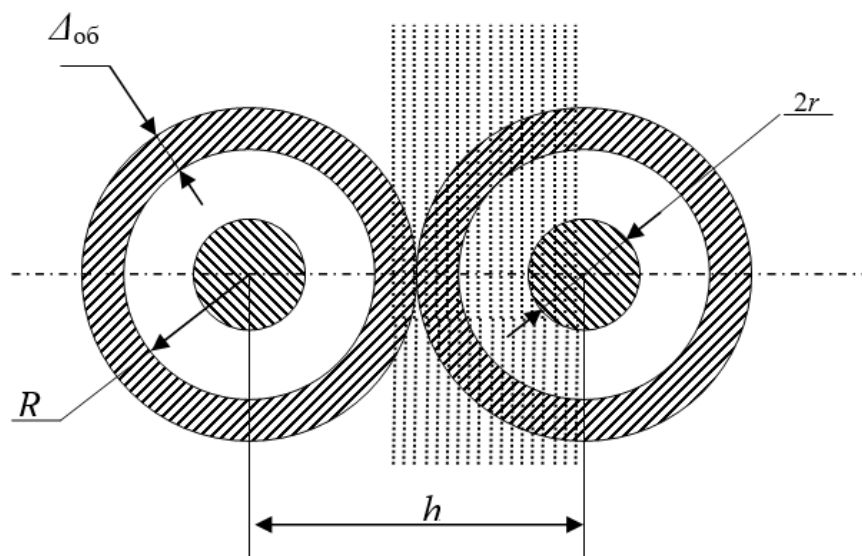


Рисунок 2.10 – Схема розташування активних елементів кабелю для розрахунку коефіцієнта взаємоіндукції між жилою та оболонкою:

$\Delta_{об}$ – товщина оболонки, R_1 – радіус під оболонку, r – радіус жили,
 h – відстань між центрами жил

Якщо кабелі мають жили з великою площею перерізу сегментної конструкції і застосовані в лінії, де спеціальними конструктивними рішеннями практично виключені втрати від циркуляційних струмів у

захисних металевих елементах, то вплив вихрових струмів в жилі на втрати у захисних металевих елементах потрібно врахувати.

Таблиця 2.6 – Електричний питомий опір і температурний коефіцієнт металів захисних металевих елементів

Матеріал	Питомий опір (ρ) Ом · м за 20 °С	Температурний коефіцієнт (α_{20}) К ⁻¹ за 20 °С
Свинець чи стоп свинцю	$21,4 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Сталь	$13,8 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Бронза	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Нержавіюча сталь	$70 \cdot 10^{-8}$	Незначний
Алюміній	$2,84 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$

Задачі та вправи:

1. Визначити ефективні товщини мідного екрана для номінальної площі перерізу F жили кабелю АПвПЕг $1 \times F-220$ в діапазоні перерізів від 300 мм^2 до 1000 мм^2 . Вибрати діаметр дротів і оцінити їх кількість.

Рішення. Діаметри струмопровідних жил в заданому діапазоні перерізів за таблицею 2.5. Товщину ізоляції беремо 22 мм, товщину напівпровідних екранів – 1 мм однаковими для всіх перерізів. Площу перерізу мідного екрана приймаємо пропорційною площі перерізу жили, коефіцієнт пропорційності $k_s = 0,2$. Мідний екран складається з мідної стрічки товщиною $\Delta_{ст}$, намотаної поверх напівпровідного екрана з ізоляції і одного повиву дроту діаметром $d_{др}$, скручених з кутом α . Площа перерізу всіх дротів екрана дорівнює $F_{др} = k_s \cdot F - 2\pi \cdot R_1 \cdot \Delta_{ст}$, де R_1 – радіус поверх напівпровідного екрана по ізоляції, який дорівнює сумі радіуса жили, товщині ізоляції, товщині двох напівпровідних екранів $R_1 = 0,5d + 22 + 2 \cdot 1$ (мм). Еквівалентна товщина дротового екрана дорівнює кореню квадратного рівняння:

$$\Delta_e^2 + 2 \cdot R_1 \cdot \Delta_e - \frac{k_s \cdot F - 2\pi \cdot R_1 \cdot \Delta_{ст}}{\pi} = 0, \quad (2.48)$$

звідки:

$$\Delta_e = -R_1 + \left[R_1^2 + 4 \cdot \left(\frac{k_s \cdot F - 2\pi \cdot R_1 \cdot \Delta_{ст}}{\pi} \right) \right]^{0,5}. \quad (2.49)$$

Наприклад, для перерізу 300 мм^2 і $k_s = 0,2$, $\Delta_{ст} = 0,04 \text{ мм}$, $R_1 \approx 34 \text{ мм}$:

$$\Delta_e = -34 + \left[34^2 + 4 \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 300 - 2\pi \cdot 34 \cdot 0,04}{\pi} \right) \right]^{0,5} = 0,24 \text{ (мм)},$$

а ефективна товщина електропровідного екрана $\Delta_{еф} = 0,24 + 0,04 = 0,28 \text{ мм}$.

Необхідна в екрані кількість дротів n з діаметром $d_{др} = 0,6 \text{ мм}$ дорівнює округленому відношенню площі перерізу дротового екрана $F_{др}$ до площі перерізу окремого дроту: $n = \text{ceil}(0,2 \cdot 300 - 2\pi \cdot 34 \cdot 0,04) / \pi \cdot 0,6^2 = 58$.

Для того щоб дроти помістились у повиві необхідно, щоб $n < n_{\max}$, де n_{\max} – округлене відношення довжини кола з діаметром $2(R_1 + \Delta_{ст}) + d_{др}$ до більшого розміру дроту в поперечному перерізі кабелю при скручуванні екрана з кутом α : $d_{др} / \sin\alpha$: $n_{\max} = \text{ceil}\{(2 \cdot 34 + 2 \cdot 0,04 + 0,6) \cdot \pi \cdot \sin\alpha / 0,6\} = 354$.

2. Визначити фактор втрат в електропровідному екрані для номінальної площі перерізу F жили кабелю АПвПЕг $1 \times F-220$ у діапазоні перерізів від 300 мм^2 до 1000 мм^2 для температур жили $40 \text{ }^\circ\text{C}$ і $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Кабелі прокладені трикутником впритул, а діаметральна товщина всіх елементів конструкції кабелю поверх жили дорівнює 55 мм . Коефіцієнт заповнення перерізу жили $\eta = 0,95$. Укрутку жил не враховувати.

Рішення. Діаметри струмопровідних жил визначаємо в заданому діапазоні перерізів за таблицею 2.5. Товщину ізоляції, товщину напівпровідних екранів для всіх перерізів, площу перерізу мідного екрана, коефіцієнт укрутки екрана приймаємо такими самими, як у попередньому завданні. До перерізу 500 мм^2 жилу приймаємо багатодровову ущільнену. Для перерізу 600 мм^2 і більших конструкція сегментна.

Електричний опір жили змінному струму $R_{\sim(40)}$ і $R_{\sim(90)}$ для перерізів до 500 мм^2 беремо з табл. 2.3, а для 600 мм^2 і більших беремо з табл. 2.5.

Електричний опір екрана обчислюємо нехтуючи впливом вихрових струмів, і приймаючи наближено температуру екрана $45 \text{ }^\circ\text{C}$ за температури жили $90 \text{ }^\circ\text{C}$ і температуру екрана $30 \text{ }^\circ\text{C}$ за температури жили $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (перегрівання екрана приблизно третина перегрівання жили).

Коефіцієнт укрутки екрана $K_y \cdot K_3 = 1,15 \cdot 1$. Наприклад, для перерізу 300 мм² і температури жили 90 °С:

$$R_e(45) = 0,0172 \cdot 10^{-6} \cdot 1,15 [1 + 4 \cdot 10^{-3} (45 - 20)] / 0,2 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 3,62 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м.}$$

Коефіцієнт взаємодукції за (2.46), наприклад, для перерізу 300 мм²: h дорівнює діаметру кабелю $h = d + 55$ (мм);

радіус під мідний екран $R_1 = 0,5 \cdot 20,05 + 22 + 2 \cdot 1 \approx 35$ мм;

еквівалентна товщина екранау 0,28 мм; для 300 мм²: $h = 20,05 + 55 \approx 75$ мм;

$M_e = 1,57 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Фактор втрат екрану за температури жили 90 °С:

$$k_e = \frac{(\omega \cdot M_e)^2}{R_e(45)^2 + (\omega \cdot M_e)^2} \cdot \frac{R_e(45)}{R_{\sim}(90)} = 0,055. .$$

Розташування фаз у площині

Для трьох одножильних кабелів, розташованих у площині так, що середній кабель знаходиться на однаковій відстані від інших кабелів, з металопоподібними оболонками, з'єднаними на обох кінцях, фактор втрат для кабелю з найбільшими втратами (оскільки інші кабелі відстають за фазою) визначають так [3]:

$$k_{об1} = \left[\frac{0,75P^2}{R_{об}(\theta_{об})^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_{об}(\theta_{об})^2 + Q^2} + \frac{2R_{об}(\theta_{об})PQX_m}{\sqrt{3}(R_{об}(\theta_{об})^2 + P^2)(R_{об}(\theta_{об})^2 + Q^2)} \right] \frac{R_{об}(\theta_{об})}{R_{ж}(\theta_{ж})},$$

$$\text{де } P = X + X_m; Q = X - X_m / 3; X = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \frac{h}{R1 + \Delta_{об}}; X_m = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln 2, \quad (2.50)$$

де X – реактивний опір оболонки чи екрана на одиницю довжини кабелю для двох суміжних одножильних кабелів (Ом/м); X_m – взаємний реактивний опір між оболонкою чи екраном зовнішнього кабелю і жилами двох інших, за розташування кабелів у площині (Ом/м).

Втратами вихрового струму в оболонках нехтують, за виключенням кабелів з великими сегментними жилами, для яких такі втрати розраховують. Якщо для зменшення втрат у металевих оболонках чи екранах одножильних кабелів застосовують рівномірну транспозицію кабелів з з'єднанням оболонок на кожній з трьох секцій транспозиції, то для трьох одножильних кабелів, розташованих у площині так, що середній кабель знаходиться на однаковій відстані від інших кабелів, то втрат визначають як за прокладання трикутником.

Задачі та вправи:

1. Визначити фактор втрат від циркуляційних струмів в електропровідному екрані від номінальної площі перерізу F в діапазоні перерізів від 300 мм² до 1000 мм² для кабелю АПвПЕг 1× F -220 за температури жили 90 °С. Діаметральна товщина всіх елементів конструкції кабелю поверх жили дорівнює 55 мм. Коефіцієнт заповнення перерізу жили $\eta = 0,95$. Укрутку жил не враховувати.

Рішення. Діаметри струмопровідних жил визначаємо в заданому діапазоні перерізів за таблицею 2.5. Товщину ізоляції приймаємо 22 мм, товщину напівпровідних екранів – 1 мм однаковими для всіх перерізів. Площу перерізу мідного екрана приймаємо пропорційною площі перерізу жили, коефіцієнт пропорційності 0,2. До перерізу 500 мм² жилу приймаємо багатодротовому ущільнену. Для перерізу 600 мм² і більших конструкція сегментна.

Електричний опір жили змінному струму $R_{\sim}(90)$ для перерізів до 500 мм² беремо з табл. 2.5, а для 600 мм² і більших беремо з табл. 2.7.

Електричний опір екрана обчислюємо за (2.6), нехтуючи впливом вихрових струмів, і приймаючи наближено температуру екрана 45 °С за температури жили 90 °С (перегрівання екрана приблизно третина перегрівання жили). Коефіцієнт укрутки екрана $K_y \cdot K_z = 1,15 \cdot 1$. Наприклад, для перерізу 300 мм² і температури жили 90 °С див. задачу № 47: $h = 20,05 + 55 \approx 75$ мм;

$R_1 = 0,5 \cdot 20,05 + 22 + 2 \cdot 1 \approx 35$ мм; $\Delta_c = 0,28$ мм; $M_c = 1,57 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Наприклад, для перерізу 300 мм² обчислення фактора втрат для кабелю з найбільшими втратами за (2.50) дає:

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 314}{2\pi} \ln 2 = 4,353 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}; \\ X &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 314}{2\pi} \ln 2 \frac{75}{35 + 0,28} = 4,736 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}; \\ P &= 9,089 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}; \\ Q &= 3,285 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}; \\ k_{el} &= 0,149, \end{aligned}$$

де X – реактивний опір екрана на одиницю довжини кабелю для двох суміжних одножильних кабелів;

X_m – взаємний реактивний опір між екраном зовнішнього кабелю і жилами двох інших, за розташування кабелів в площині без транспозиції. Якщо для зменшення втрат в екрані виконано транспозицію екранів, то фактор втрат визначають так само, як для прокладання трикутником.

2.2.3. Втрати в металевих елементах з впливом феромагнітних матеріалів

Застосування феромагнітних матеріалів у захисних елементах кабелів (наприклад сталевій броні) підсилює електромагнітну індукцію і тим самим суттєво збільшує втрати в металевих оболонках чи екранах. Тому на практиці феромагнітні матеріали у захисних елементах, як правило, використовують тільки в скручених багатожильних кабелях, в яких циркуляційні втрати практично відсутні. Якщо такий дво-жильний чи трижильний кабель має сталеву броню, то збільшуються втрати тільки від вихрових струмів в оболонках чи металевих екранах. Якщо втрати від вихрових струмів суттєві, є сталеві броня, то фактор втрат від вихрових струмів k'' має бути помножено на коефіцієнт k_ϕ [3]:

$$k_\phi = \left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}} \right]^2, \quad (2.51)$$

де d – середній діаметр оболонки чи металевого екрана;

d_A – середній діаметр броні (мм);

μ – відносна магнітна проникність сталі (зазвичай дорівнює 300);

δ – еквівалентна товщина броні, (мм);

Цей коефіцієнт застосовний для товщини броні від 0,3 мм до 1,0 мм.

Значне збільшення втрат у металевих елементах від наявності феромагнітних матеріалів спостерігають тоді, коли ці металеві елементи охоплюють кожну ізольовану жилу. У таких конструкціях втрати від циркуляційних струмів суттєві, вони визначаються загальним співвідношенням для втрат і наявність спільної сталевій броні чи спільної сталевій труби збільшує відповідний фактор втрат орієнтовно у 1,5 рази.

2.2.4. Втрати в броні

Загальний метод полягає в поєднанні розрахунку втрат у металевих захисних елементах, наприклад, у металевій оболонці і броні. У формулах для розрахунку фактора втрат замість електричного опору

оболонки (чи екрана) використовують паралельне з'єднання електричного опору оболонки (чи екрана) та електричного опору броні. Середній діаметр оболонки (чи екрана) в цих формулах замінюють на середньоквадратичну величину діаметра оболонки (чи екрана) і броні. Такий метод застосовують для одножильних, двожильних і багатожильних кабелів.

Еквівалентний електричний опір паралельних оболонки (чи екрана) і броні визначають так [3]: $R_{\Sigma} = R_{об} \cdot R_{бр} / (R_{об} + R_{бр})$, де $R_{об}$ – електричний опір оболонки (чи екрана) на одиницю довжини кабелю за максимальної робочої температури; $R_{бр}$ – електричний опір змінному струму броні на одиницю довжини кабелю за максимальної робочої температури.

Розрахунок спільних втрат енергії в металевій оболонці (чи екрані) і проволочній броні **одножильних** кабелів, якщо ці елементи з'єднані на обох кінцях, такий:

1) визначають взаємну індуктивність оболонки (чи екрана) на фазу $M_{об}$ за (2.44), орієнтовно індуктивності сталевих дротів H_1 і H_2 для кута між віссю дротів броні і віссю кабелю β , і кута відставання в часі γ наведеного повздовжнього магнітного потоку в дротах броні (окремі дроти броні не прилягають одна до одної):

$$H_1 = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{п} \cdot n}{4\pi} \left(\frac{d_{пр} \cdot \sin \beta}{d_{бр}} \right)^2 \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos \beta}, \quad (2.52)$$

якщо

$$H_2 \approx H_1, \quad (2.53)$$

де $d_{бр}$ – середній діаметр броні;

$d_{пр}$ – діаметр дротів броні;

n – кількість дротів броні;

$\mu_{п}$ – повздовжна відносна магнітна проникність дротів броні ($\mu_{п} = 400$),
то

2) визначають фактор повних втрат в оболонці і броні:

$$k_{1+2} = \frac{R_{\Sigma} (\theta_{1+2})}{R(\theta_g)} \cdot \frac{B_2^2 + B_1^2 + R_{\Sigma} \cdot B_2}{(R_{\Sigma} + B_2)^2 + B_1^2}, \quad (2.54)$$

де $B_1 = \omega \cdot (M_{об} + H_1)$; $B_2 = \omega \cdot H_2$; складові реактивного опору, Ом/м.

Магнітні властивості $\mu_{п}$ і γ можуть суттєво відрізнитись для конкретних зразків сталі і, якщо вимірювання на застосованому матеріалі

можна виконати, то треба прийняти середні одержані значення. Не зумовить грубої помилки, якщо для проволочок діаметром від 4 мм до 6 мм і розривним зусиллям приблизно 400 Н/мм² прийняти наступні значення [3]: $\mu_{\text{п}} = 400$; $\gamma = 45^\circ$.

Задачі та вправи:

1. Визначити фактор втрат в електропровідному екрані і сталевій броні для номінальної площі перерізу F жили кабелю при прокладанні під водою АПвПЕгК 1× F -220 в діапазоні перерізів від 300 мм² до 600 мм² для температури жили 90 °С. Кабелі прокладені в площині впритул без транспозиції оболонок. Діаметральна товщина всіх елементів конструкції кабелю поверх жили дорівнює 63 мм (діаметр дротів броні 3 мм, товщина подушки під броню 1 мм). Коефіцієнт заповнення перерізу жили $\eta = 0,95$. Укрутку жил не враховувати.

Рішення. Діаметри струмопровідних жил визначаємо в заданому діапазоні перерізів за таблицею 2.5 . Товщину ізоляції беремо 22 мм, товщину напівпровідних екранів 1 мм однаковими для всіх перерізів. Площу перерізу мідного екрана приймаємо пропорційною площі перерізу жили, коефіцієнт пропорційності 0,2. До перерізу 500 мм² жилу приймаємо багатодотову ущільнену. Для перерізу 600 мм² і більших конструкція сегментна.

Електричний опір жили змінному струму $R_{\sim(90)}$ для перерізів до 500 мм² беремо з табл. 2.5, а для 600 мм² і більших беремо з табл. 2.7.

Електричний опір екрану обчислюємо за (2.6), нехтуючи впливом вихрових струмів, і приймаючи наближено температуру екрана 45 °С за температури жили 90 °С (перегрівання екрана приблизно третина перегрівання жили). Коефіцієнт екрана $K_y \cdot K_z = 1,15 \cdot 1$. Наприклад, для перерізу 300 мм²:

$$h = 20,05 + 61 \approx 81 \text{ мм};$$

$$R_1 = 0,5 \cdot 20,05 + 22 + 2 \cdot 1 \approx 35 \text{ мм};$$

$$\Delta_e = 0,28 \text{ мм};$$

$$M_e = 1,775 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Середній діаметр броні $d_{\text{бр}} = 2 \cdot (35 + 0,28 + 1) + 3 \approx 75,6 \text{ мм.}$

Кількість дротів у броні для кута скручування $\alpha = 80^\circ$ і коефіцієнта

заповнення 0,75: $n = \text{ceil}\left\{0,75\pi \cdot d_{\text{бр}} / \frac{d_{\text{пр}}}{\sin(4\pi/9)}\right\} = 59$.

Складові індуктивності сталевих дротів H_1 і H_2 для кута між віссю дротів броні і віссю кабелю $\beta = \pi/18$ і кута відставання в часі $\gamma = \pi/4$ наведеного повздовжнього магнітного потоку в дротах броні (окремі дроти броні не прилягають один до одного) за (2.52):

$$H_1 = \frac{\mu_0 \cdot 400 \cdot 59}{4\pi} \left(\frac{3 \sin(\pi/18)}{75 \cdot 6} \right)^2 \cdot \frac{\cos(\pi/4)}{\cos(\pi/18)} = 8,046 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/м.}$$

Електричний опір броні :

$$R_{\text{бр}}(40) = 13,8 \cdot 10^{-8} \cdot 1,015(1 + 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 20) / 59 \cdot \pi \cdot 3^2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25 = 3,66 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м.}$$

Еквівалентний електричний опір паралельних екрана і броні:

$$R_{\Sigma} = 3,62 \cdot 10^{-4} \cdot 3,66 \cdot 10^{-4} / (3,62 \cdot 10^{-4} + 3,66 \cdot 10^{-4}) = 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м.}$$

Фактор повних втрат в екрані і броні за (2.54):

$$k_{1+2} = \frac{1,82 \cdot 10^{-4}}{1,2 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{B_2^2 + B_1^2 + 1,82 \cdot 10^{-4} \cdot B_2}{(1,82 \cdot 10^{-4} + B_2)^2 + B_1^2}.$$

F , мм ²	d , мм	$R_{\sim(90)}$, Ом/м	$R_e(45)$, Ом/м	$d_{\text{бр}}$, мм	M_e , Гн/м	n	H_1 , Гн/м	$R_{\text{бр}}(40)$, Ом/м	R_{Σ} , Ом/м	k_{1+2}
300	20,05	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$3,62 \cdot 10^{-4}$	75,6	$9,09 \cdot 10^{-5}$	59	$8,06 \cdot 10^{-8}$	$3,66 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	
400	23,15	$9,06 \cdot 10^{-5}$								
500	25,89	$7,29 \cdot 10^{-5}$								
600	28,36	$6,01 \cdot 10^{-5}$								

3. ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ

3.1. Нестационарні режими навантаження

За нестационарних режимів навантаження параметри процесів тепло- і масопереносення залежать від часу і є нелінійними. Такі режими роботи кабелів у практиці дуже поширені і їх задають, наприклад, у вигляді добових графіків навантаження. Очевидно, що таких можливих нестационарних режимів безліч. У практиці застосовують два основні підходи до характеристики можливих перевантажень кабелю в нестационарних режимах навантаження.

Перший – визначення кривих перевантажувальної здатності у вигляді залежностей кратності струму перевантаження I_p до гранично допустимого струму $I_{доп}$ в стаціонарному режимі роботи кабелю від часу перевантаження. За такими залежностями розроблюють нормативи для конкретних кабельних ліній, оскільки відповідні кратності залежать від умов прокладання. Наприклад, півгодинний (або інший, табл. 3.1) струм не повинен перевищувати струм, кратний $I_{доп}$, причому коефіцієнт кратності може бути визначений розрахунком для нестационарного теплового режиму.

Для розрахунку залежності $I_p/I_{доп}$ використовують модель **нагрівання** та охолодження однорідного провідника (рис. 3.1), що базується на рівнянні теплового балансу, згідно з яким тепло, що виділяється в провіднику при проходженні по ньому струму за малий відрізок часу, йде на нагрівання провідника та відводиться в навколишнє середовище:

$$Pdt = Cd\tau + \frac{\tau dt}{S}, \quad (3.1)$$

де P – потужність виділення тепла;

C – теплоємність проводу;

S – тепловий опір оточуючого середовища;

τ – потокове перегрівання провідника відносно температури оточуючого середовища;

dt – малий відрізок часу.

У стаціонарному режимі $P = \tau_{\max}/S$, де $\tau_{\max} = \Theta_1 - \Theta_2$, Θ_1 – максимальна температура в цьому режимі навантаження за необмежено тривалий час, Θ_2 – температура довкілля. Тоді (3.1) виглядає так:

$$\frac{\tau_{\max}}{S} dt - \frac{\tau}{S} dt = C d\tau,$$

звідки після розділення змінних і невизначеного інтегрування загальне рішення щодо потокового перегрівання:

$$dt = C \cdot S \cdot \frac{d\tau}{\tau_{\max} - \tau};$$

$$t = -C \cdot S \cdot \ln(\tau_{\max} - \tau) + C1, \quad (3.2)$$

де добуток $C \cdot S$ має розмірність часу і для багатьох конструкцій кабелів є досить сталою величиною, тому цю величину називають постійною нагрівання кабелю β . Постійну інтегрування визначено за умовами для режиму включення (тобто за температури довкілля) $t = 0$; $\tau = 0$:

$$\tau = \tau_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta}} \right), \quad (3.3)$$

де β – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності провідника на тепловий опір оточуючого середовища $\beta = C \cdot S$.

Для режиму включення попередньо нагрітого проводу, $t = 0$; $\tau = \tau_1$:

$$\tau = \tau_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta}} \right) + \tau_1 \cdot e^{-\frac{t}{\beta}}, \quad (3.4)$$

де $\tau_1 = \Theta_0 - \Theta_2$, де температура проводу в момент включення.

Для режиму охолодження при виключенні дроту, $t = 0$; $\tau = \tau_1$; $P = 0$:

$$\tau = \tau_1 \cdot e^{-\frac{t}{\beta}}. \quad (3.5)$$

Ці моделі є наближеними. Досвід їх застосування свідчить про прийнятну для практичних задач точність за умови, що за їх допомогою порівнюють характеристики подібних конструкцій кабелів. Зокрема, для теплових розрахунків кабелів у нестационарних режимах, якщо товщина ізоляції невелика щодо розмірів жили. При цьому режим навантаження є допустимим, якщо потокове перегрівання не перевищує максимально допустиме. Із цієї ж умови знаходять струм та час допустимого перевантаження.

Струм I_{Π} та час t_{Π} допустимого перевантаження при первинному включенні пов'язані співвідношенням, що впливає з (3.3):

$$I_{\Pi} = \frac{I_{\text{доп}}}{\sqrt{\left(1 - e^{-\frac{t_{\Pi}}{\beta}}\right)}} \quad (3.6)$$

Струм та час допустимого перевантаження при включенні попередньо нагрітого дроту пов'язані співвідношенням, що впливає з (3.4):

$$I_{\Pi} = \frac{I_{\text{доп}}}{\sqrt{\left(1 - e^{-\frac{t_{\Pi}}{\beta}}\right)}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\tau_1}{\tau_{\text{max}}} e^{-\frac{t_{\Pi}}{\beta}}}, \quad (3.7)$$

де $I_{\text{доп}}$ – необмежено довго допустимий (номінальний) струм.

Крім того, існує поняття допустимого перевантаження кабельної лінії на час ліквідації пошкоджень у системі електропостачання. Такі перевантаження регулюються правилами технічної експлуатації електроустановок, залежать від величини та тривалості максимуму навантаження лінії в нормальному режимові роботи, способу прокладення кабелів і прийнятої системи з'єднання. Тому такі норми (табл. 3.1) є технічною характеристикою системи електропостачання і їх необхідно порівнювати з перевантажувальною здатністю самого кабелю. Важливо, що ці норми не стосуються роботи кабелю в гранично допустимому (номінальному) режимі навантаження.

Таблиця 3.1 – Допустимі аварійні перевантаження кабельних ліній

Коефіцієнт завантаження	Вид прокладання	Коефіцієнт допустимого перевантаження за тривалості, годин		
		1	2	3
0,6	У землі	1,50	1,35	1,25
	У повітрі	1,35	1,25	1,25
	У трубах (у землі)	1,30	1,20	1,15
0,8	У землі	1,35	1,25	1,20
	У повітрі	1,30	1,25	1,25
	У трубах (у землі)	1,20	1,15	1,10

Задачі та вправи:

1. Визначити допустиме півгодинне від моменту включення перевантаження кабелю АВВГ 3×240-1, прокладеного в повітрі.

Рішення. Коефіцієнт перевантаження за (3.6)

$$I_{\text{п}} / I_{\text{доп}} = \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{п}}}{\beta}}\right)^{-0,5},$$

де $t_{\text{п}} = 1800$ с, $\beta = C \cdot S$. Теплоємність кабелю – це сума теплоємності трьох жил $C_{\text{ж}}$ і полівінілхлоридного пластикату $C_{\text{ПВХ}}$, які є добутками відповідних питомих об'ємних теплоємностей (теплофізичні властивості матеріалів за табл. 1.1) на площі перерізів (товщини фазної, поясної ізоляції та оболонки відповідно $\Delta_{\text{ф}} = 1,9$ мм; $\Delta_{\text{н}} = 0,9$ мм; $\Delta_{\text{об}} = 2,3$ мм; діаметр по трьох скручених секторних жилах $d_{\text{с}} = 35$ мм):

$$C_{\text{ж}} = 2,484 \cdot 3 \cdot 240 = 1788,5 \text{ Дж/}^{\circ}\text{С} \cdot \text{м};$$

$$C_{\text{ПВХ}} = C_{\text{ПВХ1}} + 0,5C_{\text{ПВХ2}} = \\ = 1,662 \cdot [(\pi \cdot 35^2/4) - 3 \cdot 240] + 0,5 \cdot 1,662 \cdot \pi \cdot 5,1(46 - 5,1) = 947 \text{ Дж/}^{\circ}\text{С} \cdot \text{м},$$

де теплоємність полівінілхлоридного пластикату складається з двох частин, які мають різну температуру, тому друга частина (з меншою температурою) помножена на 0,5 [1].

Тепловий опір полівінілхлориду та навколишнього середовища:

$$S_{\text{ПВХ}} = \frac{5,5}{2\pi} \ln \frac{46}{35} = 0,239 \text{ }^{\circ}\text{С} \cdot \text{м/Вт};$$

$$S_{\text{п}} = 1/\pi \cdot 0,046 \cdot 10 = 0,692 \text{ }^{\circ}\text{С} \cdot \text{м/Вт}.$$

Стала нагрівання кабелю $\beta = (1788,5 + 947) \cdot (0,239 + 0,692) = 2938$ с.

Кратність допустимого перевантаження на протязі 30 хв після включення кабелю: $I_{\text{п}} / I_{\text{доп}} = 1/\sqrt{1 - e^{-30 \cdot 60/2938}} \approx 1,5$.

2. Визначити допустиме півгодинне від моменту включення перевантаження кабелю АВВГ 3×F-1, прокладеного в повітрі, в діапазоні площі перерізу жили від 70 мм² до 300 мм². Побудувати графік залежності $I_{\text{п}} / I_{\text{доп}} = f(F)$ для цього типу кабелю. Зробити висновок щодо впливу площі перерізу жили на перевантажувальну здатність силового кабелю.

3. Визначити допустиме від моменту включення перевантаження кабелю АВВГ 3×240-1, прокладеного в повітрі, в діапазоні часу перевантаження від 10 хв до 60 хв. Побудувати графік залежності

$I_{п} / I_{доп} = f(F)$ для цього типу кабелю. Зробити висновок щодо впливу часу перевантаження на допустимий коефіцієнт перевантаження.

4. Визначити допустиме півгодинне перевантаження кабелю АВВГ 3×240-1, прокладеного в повітрі, якщо перед цим кабель необмежено довго був навантажений на 60 % номінального струму.

3.2. Метод зосереджених теплоємностей

Якщо товщина ізоляції силового кабелю значна, що характерно для високовольтних кабелів, при визначенні перевантажувальної здатності необхідно врахувати наявність в ізоляції перепаду температур. Приблизне рішення. У такому випадку використовують метод зосереджених теплоємностей [1], за яким ізоляція подана у вигляді двох зон із рівними величинами теплового опору $S_{i31} = S_{i32} = S_{i3}/2$, але з різними теплоємностями: $C_{i31} = c_{i3} \cdot \pi \cdot r(R - r)$; $C_{i32} = c_{i3} \cdot \pi \cdot R(R - r)$, де c_{i3} – питома об’ємна теплоємність ізоляції. Відповідну схему наведено на рис. 3.1. Параметри схеми заміщення визначає геометричний коефіцієнт p (коефіцієнт Ван Вормера [9]):

$$p = [\ln(R/r)]^{-1} - [(R/r) - 1]^{-1}; \quad (3.8)$$

$$S_1 = S_{i31}; S_2 = S_{i32}; C_1 = p C_{i31} + C_{ж}; C_2 = (1 - p) C_{i31} + C_{i32}.$$

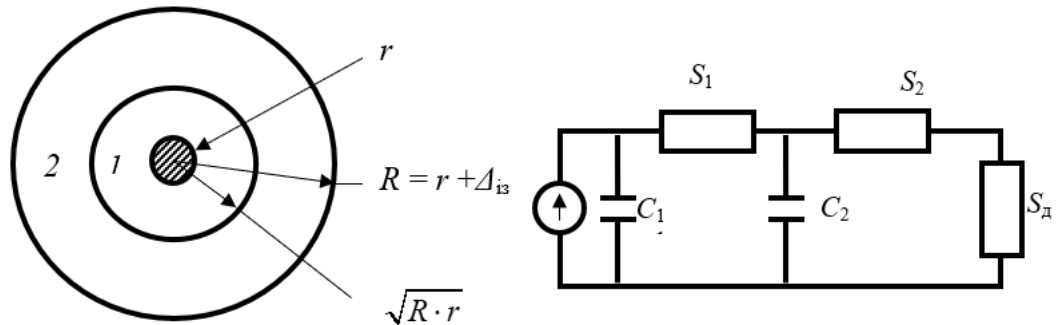


Рисунок 3.1 – Схема моделі нагрівання ізольованого проводу в повітрі та відповідна схема заміщення

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при $t = 0$, $\tau = 0$, перегрівання дроту в момент t :

$$\tau = P \left[S_g (1 - e^{-gt}) + S_f (1 - e^{-ft}) \right], \quad (3.9)$$

де $g = (M + \sqrt{M^2 - N}) / N$; $f = (M - \sqrt{M^2 - N}) / N$;

$$M = 0,5 [C_1 (S_1 + S_2 + S_{\text{ä}}) + \tilde{N}_2 (S_2 + S_{\text{ä}})]; \quad N = C_1 \cdot S_1 \cdot C_2 (S_2 + S_{\text{ä}});$$

$$S_g = (g - f)^{-1} [C_1^{-1} - f (S_1 + S_2 + S_{\text{ä}})];$$

$$S_f = (S_1 + S_2 + S_{\text{ä}}) - S_g;$$

P – потужність тепловиділення в дроті вкінці короткотермінового (менше 1 год) режиму нагрівання.

При врахуванні металеві оболонки кабелю (без виділення тепла в ній) та зовнішніх захисних покриттів:

$$S_2 = (S_{i32}/2) + S_d;$$

$$C_2 = (1-p) C_{i31} + C_{i32} + (C_{o6} + p' \cdot C_{3п}) \cdot S_{3п}^2 / S_2^2, \quad (3.10)$$

де $p' = [2 \ln(R_k / R_{o6})]^{-1} - [(R_k / R_{o6})^2 - 1]^{-1}$;

R_k – радіус кабелю;

R_{o6} – радіус оболонки.

Якщо необхідно врахувати втрати у металевій оболонці:

$$S_2 = (S_{i32} / 2) + (1 + k_{o6}) S_d;$$

$$C_2 = (1-p) C_{i31} + C_{i32} + (C_{o6} + p' \cdot C_{3п}) \cdot S_{3п}^2 / S_2^2, \quad (3.11)$$

де $k_{o6} = P_{o6} / P_{ж}$ – коефіцієнт втрат в оболонці.

Параметри g і f в (3.9) визначають динаміку нагрівання кабелю, мають одиниці вимірювання, обернені до одиниць виміру часу, а їх обернені значення доцільно співставляти з постійною нагрівання кабелю β .

Задачі та вправи:

1. Визначити за допомогою методу зосереджених теплоємностей параметри кінетики нагрівання g і f для кабелю АВВГ 3×240-1, прокладеного в повітрі. Результат порівняти з результатом задачі № 75.

Рішення. Розміри, теплові опори кабелю і довкілля, теплоємності елементів конструкції за № 75:

$$\Delta_{\phi} = 1,9 \text{ мм}; \Delta_n = 0,9 \text{ мм}; \Delta_{o6} = 2,3 \text{ мм}; \text{ діаметр по жилам } d_c = 35 \text{ мм};$$

$$S_{\text{ПВХ}} = 0,239 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}; S_{\text{п}} = 0,692 \cdot S_{\text{ПВХ}};$$

$$C_{\text{ж}} = 1788,5 \text{ Дж/}^\circ\text{C} \cdot \text{м}; C_{\text{ПВХ1}} = 402,4 \text{ Дж/}^\circ\text{C} \cdot \text{м}; C_{\text{ПВХ2}} = 1089 \text{ Дж/}^\circ\text{C} \cdot \text{м}.$$

Теплові опори двох зон ізоляції однакові:

$$S_1 = S_2 = S_{i31} = S_{i32} = S_{\text{ПВХ}}/2 = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт},$$

а теплоємності різні:

$$C_{i31} = c_{i3} \cdot \pi \cdot r(R - r) = 1,662 \cdot \pi \cdot 19,4(24,5 - 19,4) = 515,3 \text{ Дж/}^\circ\text{С} \cdot \text{м};$$

$$C_{i32} = c_{i3} \cdot \pi \cdot R(R - r) = 1,662 \cdot \pi \cdot 24,5(24,5 - 19,4) = 650,8 \text{ Дж/}^\circ\text{С} \cdot \text{м}.$$

Параметри схеми заміщення, в якій теплоємності зображені електричними ємностями (див. рис. 3.1):

$$p = \left(\ln \frac{24,5}{19,4} \right)^{-1} - \left(\frac{24,5}{19,4} - 1 \right)^{-1} = 0,5;$$

$$C_1 = p C_{i31} + C_{ж} = 0,5 \cdot 515,3 + 1788,5 + 402,4 = 2449 \text{ Дж/}^\circ\text{С} \cdot \text{м};$$

$$C_2 = (1 - p) C_{i31} + C_{i32} = 0,5 \cdot 515,3 + 650,8 = 908,3 \text{ Дж/}^\circ\text{С} \cdot \text{м}.$$

Допоміжні параметри розрахунку кривої нагрівання кабелю (3.9):

$$M = 0,5[2449(0,24 + 0,692) + 908,3(0,12 + 0,692)] = 1510;$$

$$N = 2449 \cdot 0,12 \cdot 908,3(0,12 + 0,692) = 2,167 \cdot 10^5.$$

Параметри кривої нагрівання (3.9):

$$g = 0,015; f = 0,0003; g^{-1} = 65,7 \text{ с}; f^{-1} = 3 \cdot 10^3 \text{ с}.$$

Одержане значення параметра $f^{-1} = 3 \cdot 10^3 \text{ с}$ є близьким до розраховної сталої нагрівання цього кабелю: $\beta = 2938 \text{ с}$. Одержане значення параметра $g^{-1} = 65,7 \text{ с}$ значно менше, отже, воно дає додаткову інформацію про нагрівання цього кабелю впродовж кількох перших десятків хвилин після включення і має застосовуватись при визначення короткотермінової переважувальної здатності.

2. Визначити рівняння нагрівання кабелю АВВГ 3×240-1, прокладеного в повітрі, за допомогою методу зосереджених теплоємностей, якщо струм у жилі 330 А, а електричний опір жили є нормативним. Побудувати відповідний графік.

Рішення. Параметри рівняння (3.9) нагрівання кабелю:

$$g = 0,015 \text{ с}^{-1}; f = 0,0003 \text{ с}^{-1}; \text{ (див. попереднє завдання).}$$

При струмі 330 А потужність тепловиділення в трьох жилах

$$P = 3 \cdot 330^2 \cdot 0,253 \cdot 10^{-3} \approx 82,7 \text{ Вт/м}.$$

Параметри S_g , і S_f за (3.9):

$$S_g = (0,015 - 0,0003)^{-1} [2449^{-1} - 0,0003 \cdot (0,24 + 0,692)] = 0,005;$$

$$S_f = (0,24 + 0,692) - 0,005 = 0,927.$$

Рівняння нагрівання кабелю:

$$\tau = 0,41(1 - e^{-0,015t}) + 76,6(1 - e^{-0,0003t}).$$

Відповідний графік наведено на рис. 3.2:

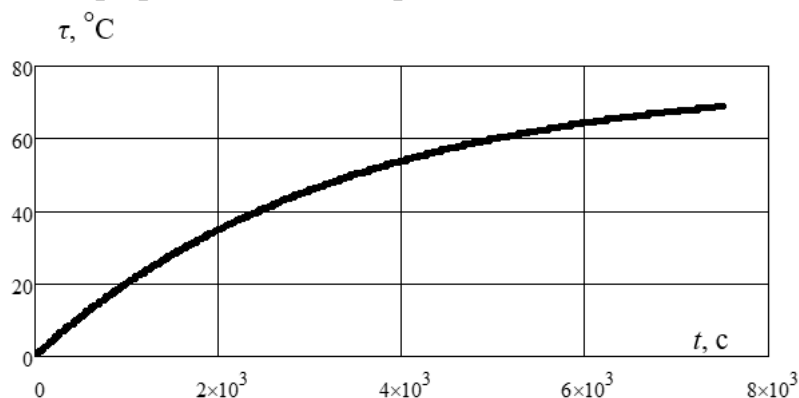


Рисунок 3.2

3. Порівняти вплив двох складових моделі (3.9) на нагрівання кабелю АПвЕгаПу - 35 кВ, прокладеного в повітрі.

Вказівка. Розглянути графіки складових перегрівання кабелю, наведені на рис. 3.3.

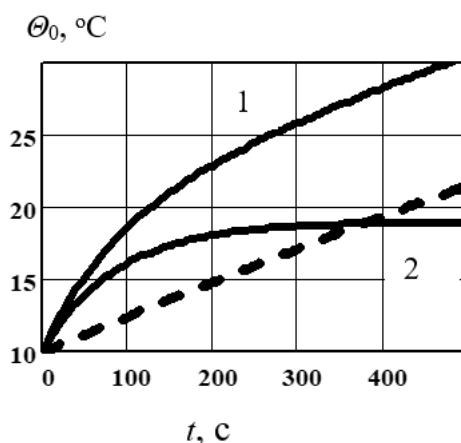


Рисунок 3.3 – Криві нагрівання кабелю АПвЕгаПу - 35 кВ прокладеного в повітрі (три кабелі в горизонтальній площині), розраховані за методом зосереджених теплоємностей: 1 – розрахунок за (3.9); 2 – складова g в (3.9); пунктир: складова f в (3.9)

4. За умовою і рішенням задачі № 2 оцінити допустиме півгодинне від моменту включення перевантаження кабелю АВВГ $3 \times 240-1$, прокладеного в повітрі.

5. За умовою і рішенням задачі № 2 оцінити допустиме півторагодинне від моменту включення перевантаження кабелю АВВГ $3 \times 240-1$, прокладеного в повітрі.

3.3. Динаміка нагрівання високовольтних кабелів із пластмасовою ізоляцією

Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією характерними особливостями є: більші, ніж у традиційних маслонаповнених кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює одножильну конструкцію кабелю, особливості їх прокладання і використання, наприклад, прокладання у площині з обов'язковою транспозицією електропровідних екранів при заземленні їх на обох кінцях лінії.

Крім того, для них характерна підвищена гранично допустима температура ізоляції, суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури.

Наприклад, питома теплоємність поліетилену за температури 20 °С становить 2300 Дж/кг · °С, а за 80 °С становить 3750 Дж/кг · °С.

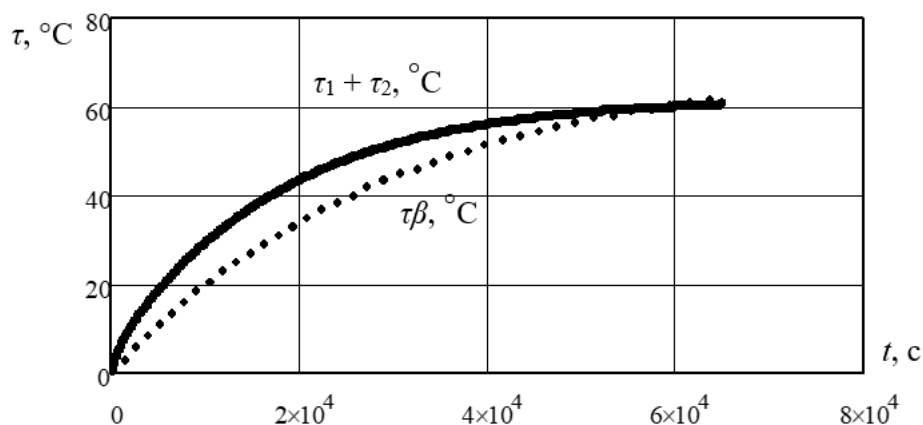


Рисунок 3.4.– Криві нагрівання кабелю АПвПЕг×1300-220 за (3.3), (3.9)

Тому доцільно при визначенні перевантажувальної здатності цих кабелів порівнювати рішення, одержані різними методами. Перш за все, необхідно порівняти вплив двох складових моделі (3.9) на нагрівання таких кабелів. У разі суттєвих розбіжностей результатів, одержаних за моделями (3.3), (3.4) і (3.9), потрібно застосовувати метод зосереджених теплоємностей [1], за яким ізоляція показана у вигляді більше, ніж двома зонами (див. підрозд. 3.2) на основі відповідної схеми заміщення.

Як приклад, для кабелю АПвПЕг 1×1300-220 результати розрахунків кривих нагрівання за моделями (3.3) і (3.9) наведені на рис. 3.4.

Цей рисунок свідчить про те, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією обидві моделі дають практично однакові результати щодо визначення тривало допустимого струму. Але для визначення перевантажувальної здатності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки динаміка нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції.

Задачі та вправи:

1. Визначити за допомогою методу зосереджених теплоємностей параметри динаміки нагрівання g і f для кабелю АПвПЕг 1×1300-220, прокладеного в повітрі.

Рішення. Розміри конструкції: переріз багатодротової алюмінієвої жили $F = 1300 \text{ мм}^2$; товщини ізоляції, напівпровідних екранів, захисних покриттів: $\Delta_{із} = 20 \text{ мм}$; $\Delta_e = 1 \text{ мм}$; $\Delta_{зп} = 5 \text{ мм}$; радіус жили $r = 20,9 \text{ мм}$.

Теплові параметри:

питомий тепловий опір ізоляції $\sigma_{із} = 3,7 \text{ }^\circ\text{С}\cdot\text{м}/\text{Вт}$,

захисних покриттів $\sigma_{зп} = 3 \text{ }^\circ\text{С}\cdot\text{м}/\text{Вт}$;

тепловий опір ізоляції $S_{із} = 0,424 \text{ }^\circ\text{С}\cdot\text{м}/\text{Вт}$;

тепловий опір довкілля $S_d = 0,93 \text{ }^\circ\text{С}\cdot\text{м}/\text{Вт}$;

коефіцієнт теплопередачі в повітря $\alpha = 8 \text{ Вт}/^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$;

теплоємність жили $C_{ж} = 3236 \text{ Дж}/^\circ\text{С}\cdot\text{м}$;

теплоємність ізоляції, прилеглої до жили $C_{із1} = 4327 \text{ Дж}/^\circ\text{С}\cdot\text{м}$;

теплоємність зовнішнього шару ізоляції $C_{із2} = 8889 \text{ Дж}/^\circ\text{С}\cdot\text{м}$.

Параметри схеми заміщення, в якій теплоємності зображені електричними ємностями (див. рис. 3.1): $S1 = S2 = 0,212 \text{ }^\circ\text{С}\cdot\text{м}/\text{Вт}$;

коефіцієнт Ван Вормера: $p = \left(\ln \frac{42,9}{20,9} \right)^{-1} - \left(\frac{42,9}{20,9} - 1 \right)^{-1} = 0,441$;

$C_1 = pC_{із1} + C_{ж} = 5143 \text{ Дж}/^\circ\text{С}\cdot\text{м}$;

$C_2 = (1 - p) C_{із1} + C_{із2} = 11310 \text{ Дж}/^\circ\text{С}\cdot\text{м}$.

Допоміжні параметри розрахунку кривої нагрівання кабелю (3.9):

$M = 9126$; $N = 1,286 \cdot 10^7$.

Параметри кривої нагрівання (3.9):

$$g = (M + \sqrt{M^2 - N}) / N = 1,362 \cdot 10^{-3}; f = (M - \sqrt{M^2 - N}) / N = 5,708 \cdot 10^{-5}.$$

2. Визначити рівняння нагрівання кабелю АПвПЕг 1×13-220, прокладеного в повітрі. Побудувати відповідний графік.

Вказівка. Прийняти параметри динаміки нагрівання за завданням № 1. При струмі 1350 А і глибині проникнення 12,6 мм потужність тепловиділення в жилі приблизно дорівнює $P = 1350^2 \cdot 2,718 \cdot 10^{-5} \approx 49,6$ Вт/м.

Параметри S_g , і S_f за (3.9): $S_g = 0,094$; $S_f = 1,161$.

3. Порівняти за допомогою відповідних графіків вплив двох складових моделі (3.9) на нагрівання кабелю АПвПЕг 1×13-220, прокладеного в повітрі.

4. Визначити за допомогою методу зосереджених теплоємностей параметри динаміки нагрівання g і f для кабелю АПвПЕг 1×625-110, прокладеного в повітрі. Записати рівняння нагрівання цього кабелю. Побудувати відповідний графік.

3.4. Експериментальне визначення кривих нагрівання

3.4.1. Дослідний зразок

Експериментальне визначення кривих нагрівання виконують на відрізку кабелю завдовжки 10 м (наприклад, для трижильного всі три жили опресовані у металеві гільзи на обох кінцях), прокладеному у відповідних умовах. Жили під'єднані до джерела змінного струму промислової частоти (рис.3.5).

На приблизно однаковій відстані від кінців кабелю (3) в його конструкцію вмонтовані спаї чотирьох однакових термопар (4), які мають лінійну залежність термо-ЕРС аж до температури 350 °С (наприклад, «мідь-константан» з коефіцієнтом термо-ЕРС 0,05 мВ/К). Термопари розташовані в жилі, в ізоляції, в оболонці, і на поверхні кабелю таким чином, щоб мінімально впливати на температуру в місці спаю.

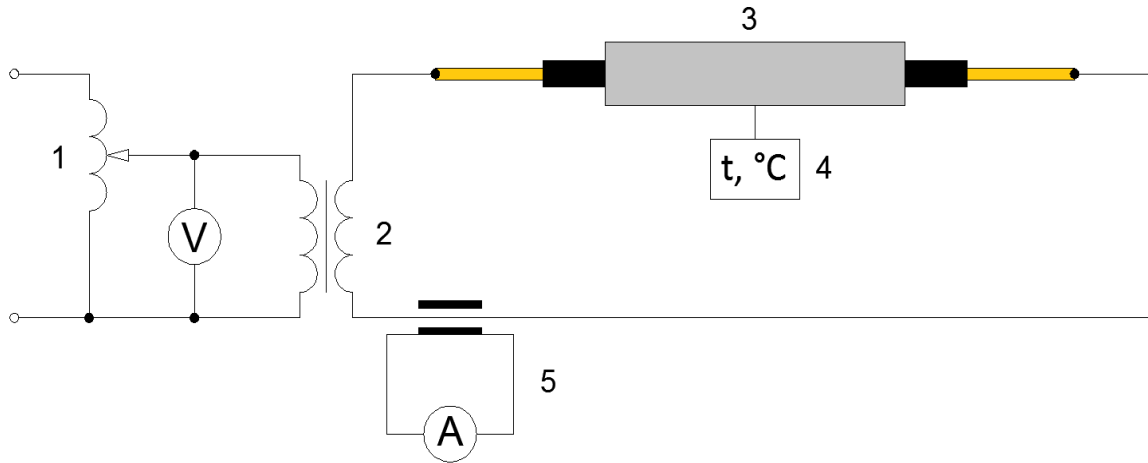


Рисунок 3.5 – Принципова схема випробувальної установки:

1 – автотрансформатор; 2 – однофазний трансформатор, первинна обмотка якого живиться від промислової мережі через автотрансформатор; 3 – дослідний зразок; 4 – термопари; 5 – вимірювальний трансформатор струму, через який підключений амперметр електромагнітної системи E140/1

Задачі та вправи:

1. Чи досягне температура поверхні кабелю значення температури жили, якщо кабель нагрівати необмежено довго? Відповідь пояснити письмово. Навести і співставити формули, які пов'язують перевантажувальну здатність кабелю зі значенням постійної нагрівання.

2. Чому при розрахунку постійної нагрівання заданого кабелю наявність металеві оболонки і броні (якщо такі є) враховують при обчисленні теплоємності, але не враховують при обчисленні теплового опору кабелю? Пояснити за допомогою конкретних значень параметрів металеві оболонки і броні

3.4.2. Проведення випробування

Для кожного з елементів конструкції кабелю вимірюють час від початку нагрівання (масив значень часу $t \in |t_1, \dots, t_n|$, де n – кількість вимірювань) і показання мілівольтметра у поділках, масиви значень:

для жили $pg \in |pg_1, \dots, pg_n|$, де n – кількість вимірювань;

для ізоляції $pi \in |pi_1, \dots, pi_n|$, де n – кількість вимірювань;

для оболонки $po \in |po_1, \dots, po_n|$, де n – кількість вимірювань;

для поверхні $pv \in |pv_1, \dots, pv_n|$, де n – кількість вимірювань.

Впродовж перших 15 хв нагрівання кабелю треба приблизно щохвилини виконувати вимірювання послідовно в жилі, в ізоляції, в оболонці, і на поверхні кабелю.

У подальшому процедуру вимірювань повторювати кожні 10 хв. Виконати не менше ніж 40 вимірювань. Вимірювання завершити, коли між наступним і попереднім показаннями мілівольтметра не буде зафіксована помітна різниця.

Задачі та вправи:

1. Чому мілівольтметр починає фіксувати зростання температури ізоляції з запізненням за відношенням до початку зростання температури жили?

2. Зобразити ескіз кабелю, використаного в роботі. Зобразити на ескізі точки розташування термопари для вимірювання температури елементів кабелю.

3.4.3. Визначення перевищення температури елемента конструкції кабелю над температурою оточуючого середовища

Термо-ЕРС, яка виникає внаслідок контактної різниці потенціалів двох металевих провідників, пропорційна різниці температур між місцями їх контакту:

$$U = КТ \cdot (T_1 - T_2), \quad (3.12)$$

де КТ – це питома термо-ЕРС, яка характеризує конкретну пару металевих провідників.

Значення КТ є постійним у діапазоні температур термопари.

За (3.12) визначають відповідні масиви перевищення температури для жили, ізоляції, оболонки і поверхні кабелю:

$$\tau_g = U_g / КТ; \tau_i = U_i / КТ; \tau_o = U_o / КТ; \tau_v = U_v / КТ. \quad (3.13)$$

Задачі та вправи:

1. Побудувати графіки експериментальних залежностей

$$\tau_g = f(t); \tau_i = f(t); \tau_o = f(t); \tau_v = f(t).$$

3.4.4. Визначення максимального перевищення температури жил кабелю над температурою оточуючого середовища

Експоненційна модель (3.3) нагрівання кабелю є двопараметричною, її параметри: τ_{\max} – максимальний перегрів жил кабелю над температурою оточуючого середовища; β – постійна нагрівання кабелю. Експериментальне оцінювання τ_{\max} виконують за графіком залежності $\tau g^* = f(t^*)$:

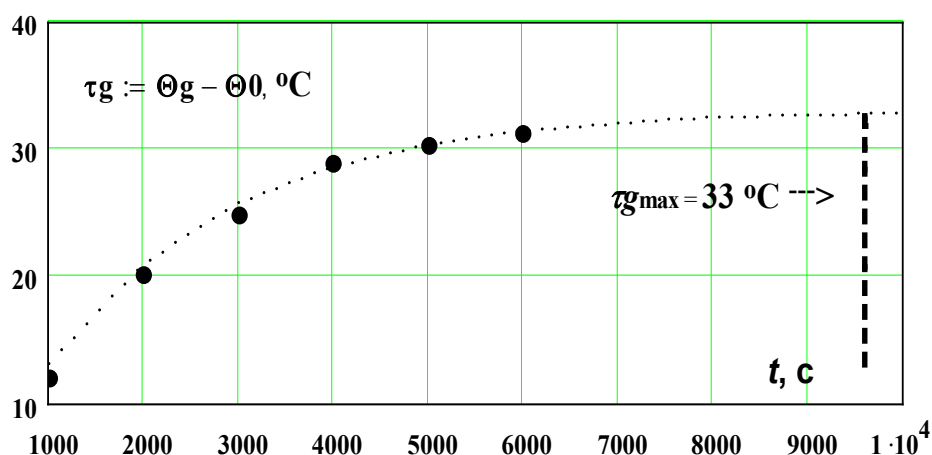


Рисунок 3.6 – Залежність $\tau g^* = f(t^*)$ за вимірюванням (точки на графіку): графічно оцінити значення τg_{\max}^* (* означає експериментальну оцінку)

Задачі та вправи:

1. Виконати оцінювання τ_{\max} за графіком залежності $\tau g^* = f(t^*)$, одержаної експериментально як діапазону можливих значень.

2. Виконати оцінювання максимальних перегрівань ізоляції, оболонки, захисного покриття кабелю за графіками залежностей $\tau i = f(t)$; $\tau o = f(t)$; $\tau v = f(t)$, одержаних експериментально.

3. Виконати оцінювання похибки при визначенні максимальних перегрівань ізоляції, оболонки, захисного покриття кабелю за графіками залежностей $\tau i = f(t)$; $\tau o = f(t)$; $\tau v = f(t)$, одержаних експериментально.

3.4.5. Визначення постійної нагрівання кабелю

Другий параметр моделі (3.3) нагрівання кабелю, а саме – постійна нагрівання β , може бути визначена як параметр лінійної функції, одержаної логарифмуванням (3.3):

$$\ln\left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\max}}\right) = \left(\frac{-1}{\beta}\right)t = b \cdot t. \quad (3.14)$$

Кутовий коефіцієнт b лінійної функції (3.14) обернено пропорційний до постійної нагрівання кабелю β . У (3.14) всі величини, крім постійної нагрівання β , визначені експериментально: t у вигляді масиву значень $t \in |t_1, \dots, t_n|$, де n – кількість вимірювань; τ – у вигляді масиву τg^* ; $\tau_{\max} = \tau g_{\max}^*$.

За цими експериментальними даними будують графік лінійної функції, відкладаючи по осі абсцис значення t^* , а по осі ординат відповідні значення $\ln\left(1 - \frac{\tau g^*}{\tau g_{\max}^*}\right)$:

$$\ln\left(1 - \frac{\tau g^*}{\tau g_{\max}^*}\right) = f(t^*) \quad (3.15)$$

і пересвідчившись в тому, що розташування експериментальних точок близьке до прямої, визначають постійну нагрівання β як кутовий коефіцієнт цієї прямої (рис. 3.7).

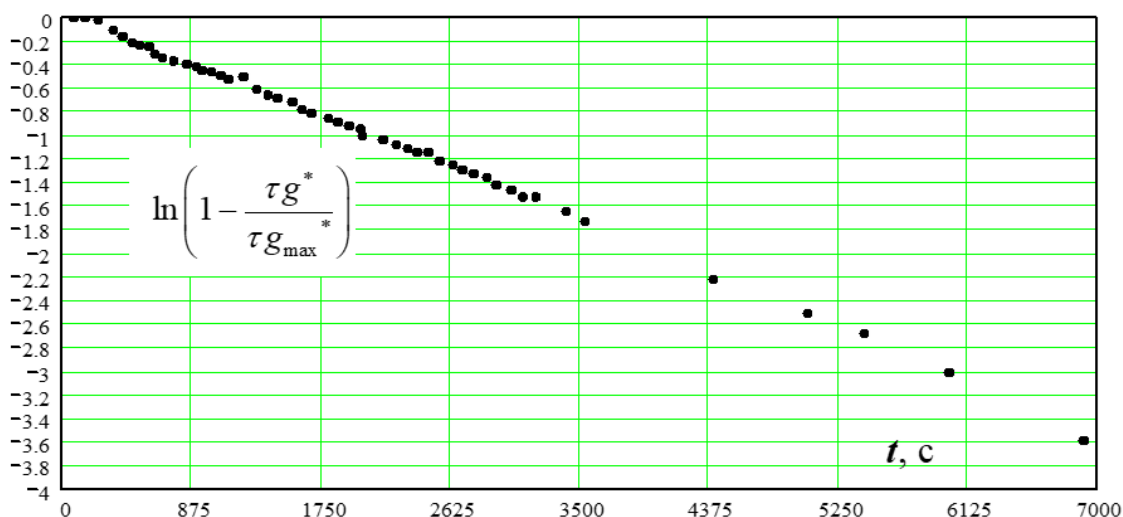


Рисунок 3.7 – Графік залежності (3.15) для експериментального визначення постійної нагрівання (для цього графіка: $\beta^* \sim 7000 / [-(3,6)]$)

Постійна нагрівання також може бути визначена за експериментальними даними аналітично, методом найменших квадратів:

$$\beta = -1 \frac{\sum_1^n (t_i - \bar{t})^2}{\sum_1^n (t_i - \bar{t}) \left[\ln \left(1 - \frac{\tau g_i}{\tau g_{\max}} \right) - \ln \left(1 - \frac{\tau g_i}{\tau g_{\max}} \right) \right]}, \quad (3.16)$$

де позначення величини з ризикою зверху означає середнє арифметичне значень цієї величини; n – кількість вимірювань; i – порядковий номер вимірювання.

Задачі та вправи:

1. Визначити розрахунком постійну нагрівання кабелю АВБШВ 1×70-6, прокладеного у приміщенні. Побудувати відповідний графік нагрівання цього кабелю від включення за (3.3).

2. Виконати розрахунки постійної нагрівання β для кабелю АВБШВ 1×70-6 для різних наступних значень коефіцієнта теплопередачі α з поверхні кабелю: $\alpha \in [8 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2, \dots, 11 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2]$. За цими розрахунками побудувати графік $\beta = f(\alpha)$. Нанести на цей графік горизонтальну лінію, відповідну до одержаного експериментально значення β . Порівняти розраховані значення з експериментальною оцінкою.

3. Проаналізувати відповідність експериментальних даних, наведених на рис. 3.6 експоненційній моделі нагрівання кабелю.

4. Виконати обчислення методом найменших квадратів, наведених на рис. 3.6 експериментальних результатів. Проаналізувати відповідність одержаної методом найменших квадратів оцінки постійної нагрівання β з одержаною графоаналітично (рис. 3.6) експериментальною з оцінкою.

5. Виконати розрахунки постійної нагрівання β для кабелю АВБШВ 1×240-6 для різних наступних значень коефіцієнта теплопередачі α з поверхні кабелю: $\alpha \in [8 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2, \dots, 11 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2]$. За цими розрахунками побудувати графік $\beta = f(\alpha)$.

4. ВТРАТИ В ІЗОЛЯЦІЇ

4.1. Загальне

Діелектричні втрати залежать від напруги і пов'язані з характеристиками використаного матеріалу ізоляції. У табл. 4.1 подано значення відносної діелектричної проникності ϵ і коефіцієнта втрат $\tan\delta$ для ізоляційних матеріалів загального застосування. Ці значення наведені для напруги, за якої діелектричні втрати мають бути відносно трижильних екранованих чи одножильних кабелів.

Немає необхідності розраховувати діелектричні втрати для неекранованих багатожильних кабелів чи кабелів постійного струму. Практично діелектричні втрати впливають на пропускну здатність кабелів змінного струму середньої і високої напруги.

Високовольтні ЗПЕ-кабелі мають ряд суттєвих особливостей, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації:

- більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, значення площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює суттєву залежність процесу нагрівання кабелю від теплоємності жили і ізоляції та від втрат в ній;

- більша, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, допустима температура ізоляції ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$), що, по-перше, зумовлює високі значення допустимого струму [1]; по-друге, збільшує втрати в елементах конструкції кабелю, що вимагає окремого розгляду втрат в ізоляції [3];

- суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури (наприклад, питома теплоємність поліетилену при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює $2300\text{ Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$, а при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $3750\text{ Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$) та наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{м/Вт}$), що змінює тепловий режим роботи ізоляції порівняно з режимом роботи традиційних маслом наповнених кабелів.

Тому дослідження втрат в ізоляції високовольтних кабелів із зшитю поліетиленовою ізоляцією, є необхідним для прийняття

технічних рішень щодо їх пропускної і перевантажувальної спроможності.

Таблиця 4.1 – Значення відносної діелектричної проникності ε і коефіцієнта втрат $\tan\delta$ для ізоляції кабелів високої і середньої напруги частоти 50 Гц

Тип кабелю	ε	$\tan\delta$
Кабелі, ізольовані імпрегнованим папером:		
до 36 кВ	3,6	0,0035
до 87 кВ	3,6	0,0033
до 160 кВ	3,5	0,0030
до 220 кВ	3,5	0,0028
В оливі під тиском, в трубі	3,7	0,0045
Гума на основі бутил-каучуку	4	0,050
Гума на основі етилен-пропіленового каучуку:		
кабелі до і включно на 18/30 (36) кВ	3	0,020
кабелі більше, ніж на 18/30 (36) кВ	3	0,005
Полівінілхлоридний пластикат	8	0,1
Поліетилен	2,3	0,001–0,0014
Хлорсульфований поліетилен:		
до і включно на 18/30 (36) кВ	2,5	0,004
більше, ніж на 18/30 (36) кВ	2,5	0,001

4.2 Основна модель

В основу розрахунків втрат в ізоляції високовольтних ЗПЕ-кабелів покладено аналогію процесів тепло-масообміну, зокрема процесів перенесення зарядів і процесу перенесення тепла. Відповідні моделі однакові за своєю структурою, вони включають як базові різницю потенціалів (електричних чи теплових), потік, опір, провідність. Відповідно всі інші елементи моделей, що описують той чи інший процес, є похідними від цих величин, і математичний опис того чи іншого процесу в системі диференційних рівнянь є досить універсальним та уніфікованим [3,13].

У циліндричних координатах (r, θ, z) , найбільш прийнятних для опису процесів тепломасообміну в кабелях, для потенціалу застосовують рівняння Пуассона, в якому, якщо потенціал φ залежить тільки від

радіуса r (радіальне поле в однорідній речовині), градієнт потенціалу обернено пропорційний до радіуса:

$$-d\varphi/dr = \varphi_0 / [r \cdot \ln(r_2/r_1)], \quad (4.1)$$

де r_1, r_2 – радіуси екіпотенціалей, між якими має місце радіальне поле в однорідній речовині, $r_1 < r_2$;

$\varphi = \varphi_0$ при $r = r_1$, і $\varphi = 0$ при $r = r_2$.

Ця модель є основною розрахунковою моделлю, що використовується в кабельній техніці для опису стаціонарних процесів перенесення зарядів чи тепла через однорідну речовину в радіальному полі.

Оскільки потенціал залежить тільки від радіуса лише за умови необмежено довгого кабелю, а речовина, в якій відбувається процес перенесення, в тій чи іншій мірі є неоднорідною, то застосування моделі (4.1) зумовлює похибку тим меншу, чим названі вище умови ближчі до реальності. Щоб уникнути суттєвої похибки, треба обчислення виконувати для інтервалів можливих значень параметрів і порівнювати результати розрахунків із результатами, що впливають з реального досвіду.

Наприклад, при розрахунку втрат у діелектрику кабелів з поліетиленовою ізоляцією треба використати інтервал значень питомого теплового опору ізоляції, оскільки цей параметр залежить від температури [17]. Використання аналогії процесів переносу зарядів і переносу тепла для визначення розподілу напруженості поля в елементах конструкції ЗПЕ-кабелю, якщо процес перенесення **стаціонарний** (параметри процесу не залежать від часу) і **лінійний**, відношення відповідних рушійної різниці потенціалів (наприклад, різниця температур τ , К) до інтенсивності потоку (для теплового потоку P , Дж/с) є сталим. Тоді для потоку через будь-який однорідний елемент конструкції кабелю:

$$\tau = P \cdot S, \quad (4.2)$$

де S – опір елемента конструкції кабелю.

Інтенсивність потоку діелектричних втрат Pa на одиницю довжини для кожної фази визначає відома формула [3]:

$$Pa = \omega CU^2 \tan\delta, \quad (4.3)$$

де ω – кругова частота, $\omega = 2\pi \cdot f$; C – ємність на одиницю довжини; U – фазна напруга.

Ємність коаксіальних циліндрів для одножильних кабелів та кабелів з круглими жилами в електропровідних екранах або металевих оболонках:

$$C = 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \ln(R/r), \quad (4.4)$$

де ε_0 – електрична константа, $\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c_0^2 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

$c_0 = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна константа;

ε – відносна діелектрична проникність ізоляції.

Наведену формулу можна використати для овальних жил, якщо замість R і r підставити середні геометричні менших і більших розмірів відповідно зовнішнього і внутрішнього провідників.

4.3 Втрати в системі ізоляції ЗПЕ-кабелю

Система ізоляції ЗПЕ-кабелю складається з послідовно розташованих шарів різних матеріалів: напівпровідного екрану по жилі, ізоляції і напівпровідного екрану по ізоляції.

Тому для розрахунку процесу перенесення зарядів при постійному струмі в такій системі необхідно врахувати різні значення питомого електричного опору всіх трьох елементів.

Напівпровідні екрани по жилі і по ізоляції складаються з композиційного матеріалу – зшитого поліетилену, наповненого ацетиленовою сажею. Такий матеріал за структурою і характеристиками можна розглядати як неідеальний діелектрик, що проводить електричний струм.

Для орієнтовного оцінювання потужності розсіювання енергії в напівпровідних екранах конкретних конструкцій кабелів можна використати різні схеми заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції».

Наприклад, використавши відому паралельну схему заміщення для кожного з елементів системи, наведену на рис. 4.1.

Схема складається з трьох послідовно з'єднаних елементів, які є схемами заміщення неідеального діелектрика, втрати в якому визначає його електропровідність.

Оскільки поліетилен є неполярним діелектриком, втрати в якому визначаються переважно електропровідністю, і саме поліетилен є діелектричним компонентом напівпровідних екранів, така схема є найпростішою, прийнятною з електрофізичних міркувань.

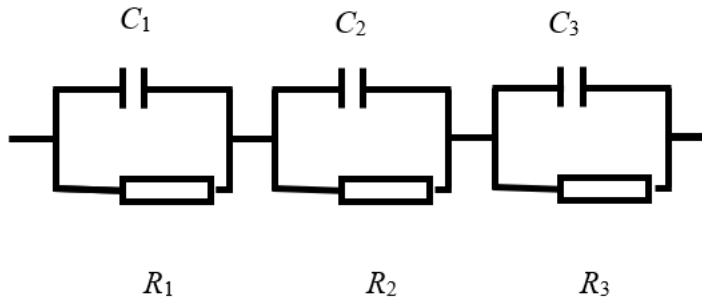


Рисунок 4.1– Схема заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції»: C_1, C_2, C_3 – ємності елементів системи; R_1, R_2, R_3 – електричні опори елементів системи

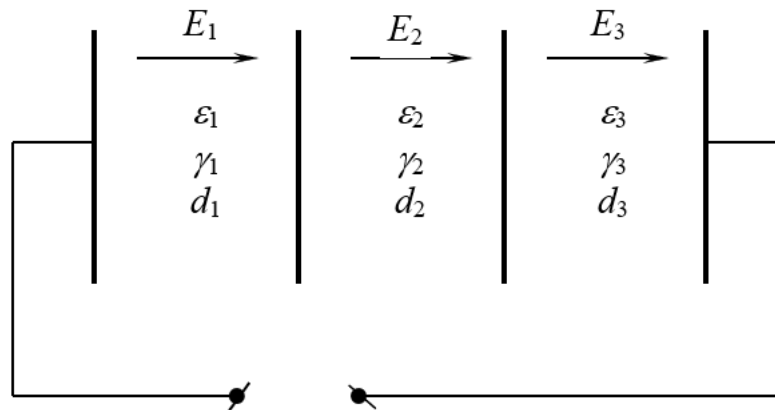


Рисунок 4.2 – Схема системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції»:
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – відносні діелектричні проникності елементів;
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – питомі електропровідності елементів;
 d_1, d_2, d_3 – товщини елементів системи

Якщо параметри схеми заміщення C_1, C_2, C_3 і R_1, R_2, R_3 визначити за відомими формулами для радіального електричного поля, то відповідні комплексні опори цих елементів визначаються формулою:

$$Z = -j \left(\frac{1}{\omega C} \right) \frac{R}{R - j \left(\frac{1}{\omega C} \right)}, \quad (4.5)$$

в яку замість Z , C , R підставлено відповідні значення для напівпровідного екрана по жилі (Z_1 , C_1 , R_1), ізоляції (Z_2 , C_2 , R_2), напівпровідного екрана по ізоляції (Z_3 , C_3 , R_3).

Струм, який протікає через ізоляцію і напівпровідні екрани кабелю визначається фазною напругою U_ϕ і сумою комплексних опорів цих елементів конструкції кабелю:

$$I = \frac{U_\phi}{Z_1 + Z_2 + Z_3}. \quad (4.6)$$

Напруги на елементах системи і активні втрати в них визначаються формулами:

$$U_1 = I \cdot Z_1; \quad Pa_1 = U_1 [R_c(I) - jIm(I)], \quad (4.7)$$

$$U_2 = I \cdot Z_2; \quad Pa_2 = U_2 [R_c(I) - jIm(I)], \quad (4.8)$$

$$U_3 = I \cdot Z_3; \quad Pa_3 = U_3 [R_c(I) - jIm(I)]. \quad (4.9)$$

Втрати в системі ізоляції визначено формулою:

$$P = U \cdot [Re(I) - jIm(I)]. \quad (4.10)$$

Таким чином, втрати в системі ізоляції P залежать від напруги, пов'язані з електрофізичними характеристиками використаного матеріалу (з відносною діелектричною проникністю ϵ , питомою електропровідністю γ) і з геометричними розмірами елементів системи ізоляції.

З іншого боку практично застосовною і рекомендованою відповідним міжнародним стандартом [3] формулою, за якою визначають втрати P_d в діелектрику силових високовольтних кабелів, є співвідношення, що включає значення тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta$:

$$P_d = \omega C U^2 \tan \delta, \quad (4.11)$$

де ω – кругова частота, $\omega = 2\pi \cdot f$; C – ємність на одиницю довжини; U – фазна напруга.

Значення тангенса кута діелектричних втрат визначають експериментально. Для зшитого поліетилену високовольтних кабелів в

[3] наведено значення $\tan \delta = 0,0015$. Відповідно потужність втрат P_d [3] у діелектрику, наприклад кабелю АПВЕВнгд 1×500 на 110 кВ за (4.11) становить $P_d = 0,33$ Вт/м.

Значення потужності втрат в системі ізоляції розраховане за формулою (4.3) для цього кабелю $P = 0,34$ Вт/м при питомій електропровідності діелектрика 10^{-11} См/м і питомій електропровідності матеріалу напівпровідних екранів в діапазоні від 10^{-1} См/м до 10^1 См/м.

Очевидно, що застосування більш складних схем заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції» кабелю може забезпечити більшу точність розрахунків. Але відповідність значень P_d і P є достатньою для вирішення за допомогою даної схеми заміщення поставленої задачі, а саме, – орієнтовної оцінки втрат у напівпровідних екранах високовольтного кабелю порівняно із втратами в його ізоляції.

За схемою заміщення на рис. 4.1 тангенс кута діелектричних втрат системи ізоляції може бути визначено як відношення дійсного струму до реактивного:

$$\tan \delta = \operatorname{Re}(I) / \operatorname{Im}(I). \quad (4.12)$$

На рис. 4.3 наведено ілюстрацію результатів розрахунків за (4.12) у вигляді залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції ЗПЕ-кабелю на напругу 110 кВ від питомої електропровідності матеріалу екрана.

Ці дані, по-перше, свідчать про те, що зменшення питомої електропровідності матеріалу екрана зумовлює збільшення втрат в екрані, але в достатньо широкому діапазоні значень питомої електропровідності матеріалу екрана, до якого належать реальні значення у відповідних конструкціях кабелю, а саме від 10^{-3} См/м до 10^2 См/м, потужністю втрат у напівпровідних екранах можна знехтувати у порівнянні з потужністю втрат в ізоляції.

По-друге, максимум на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції ЗПЕ-кабелю на напругу 110 кВ від питомої електропровідності матеріалу екрана γ_e за будь-яких значень відносної діелектричної проникності матеріалу екрана знаходиться далеко від

реальних значень γ_e (щонайменше на п'ять порядків), тобто цей максимум не має практичного значення.

По-третє, за реальних значень відносної діелектричної проникності матеріалу напівпровідних екранів в системі ізоляції високовольтних ЗПЕ-кабелів (не менше 100 при частоті 50 Гц), максимальне значення $\tan \delta$ наближається до нормативного ($\tan \delta = 0,0015$). Це свідчить про прийнятність схеми заміщення у вигляді послідовного з'єднання комплексних опорів трьох елементів системи ізоляції. Всі елементи представлені паралельним з'єднанням активного і реактивного опору.

Максимум на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції ЗПЕ-кабелю має місце за умови рівності абсолютних значень активного і реактивного опору напівпровідних екранів:

$$Re(Z_1) = -Im(Z_1); \quad (4.13)$$

$$Re(Z_3) = -Im(Z_3), \quad (4.14)$$

що свідчить про переважно ємнісний характер струму через напівпровідний екран при реальних значеннях електрофізичних характеристик матеріалу напівпровідного екрану.

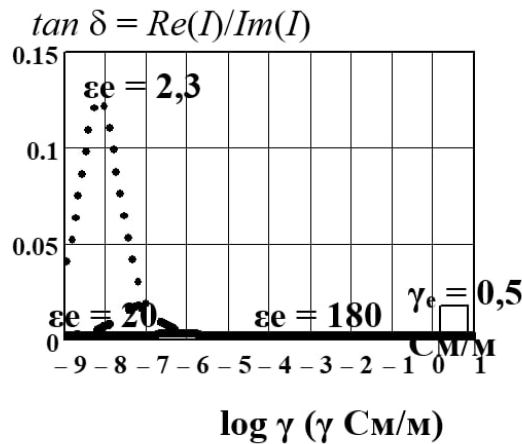


Рисунок 4.3 – Залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції ЗПЕ-кабелю на напругу 110 кВ від питомої електропровідності матеріалу екрана за різних значень відносні діелектричні проникності матеріалу екрана ϵ_e (наведені результати одержані для кабелю з товщиною ізоляції 16 мм)

4.4 Висновки

1. Для традиційних кабелів модель визначення втрат в ізоляції нормована (формула 4.3 [3]), а фактор втрат (тангенс кута діелектричних

втрат), що є складовою цієї моделі має бути визначений експериментально.

Для ЗПЕ-кабелів, які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки і які суттєво відрізняються від традиційних маслорозповнених, характерне підвищене значення допустимого струму, що збільшує втрати в елементах конструкції кабелю і вимагає окремого розгляду втрат в ізоляції.

2. Струм, який протікає через систему ізоляції ЗПЕ-кабелю (безпосередньо ізоляція і напівпровідні екрани) визначається фазною напругою і сумою комплексних опорів цих елементів конструкції кабелю. Критерієм відповідності результатів розрахунків за схемою заміщення є значення розрахованої величини втрат в ізоляції P_d за міжнародними нормативними документами [3] і значення розрахованої величини втрат в ізоляції за прийнятою схемою заміщення: $P = 0,34$ Вт/м. Відповідність значень P_d і P є достатньою для вирішення за допомогою схеми заміщення поставленої задачі, а саме, – орієнтовної оцінки необхідності врахування втрат у напівпровідних екранах високовольтного кабелю порівняно із втратами в його ізоляції.

3. В достатньо широкому діапазоні значень питомої електропровідності матеріалу екрана, до якого належать реальні значення у відповідних конструкціях кабелю, а саме від 10^{-3} См/м до 10^2 См/м, потужністю втрат у напівпровідних екранах можна знехтувати у порівнянні з потужністю втрат в ізоляції.

4. Зменшення питомої електропровідності матеріалу екрана зумовлює збільшення втрат в системі ізоляції кабелю. Відповідно на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції високовольтного ЗПЕ-кабелю спостерігається максимум. Значення питомої електропровідності матеріалу екрана γ_e , за якого є максимум втрат:

– знаходиться далеко від реальних значень γ_e (щонайменше на п'ять порядків), тобто не має практичного значення;

– за реальних значень відносної діелектричної проникності матеріалу напівпровідних екранів в системі ізоляції високовольтних ЗПЕ-кабелів

(не менше 100), максимальне значення $\tan \delta$ наближається до нормативного ($\tan \delta = 0,0015$ [3]);

–максимум на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції ЗПЕ-кабелю має місце за умови рівності абсолютних значень активного і реактивного опору напівпровідних екранів, що є властивістю прийнятої схеми заміщення.

Задачі та вправи:

1. Обчислити діелектричні втрати Pa на одиницю довжини для кожної фази кабелю ОСГ $3 \times F-35$ і ОАГ $3 \times F-35$, порівняти їх з втратами в оболонці. Побудувати графіки залежності фактора втрат в ізоляції від номінальної площі перерізу F жили кабелів ОСГ $3 \times F-35$ і ОСГ $3 \times F-20$ у діапазоні перерізів (120–300) мм².

Рішення. Діаметри жил d знаходимо для **неущільненої** конструкції багатодротової жили. Для ОСГ $3 \times 120-20$: $d = (120/0,75\pi)^{0,5} = 14,27$ мм.

Діелектричні втрати Pa на одиницю довжини для кожної фази кабелю за : $Pa = \omega \cdot U^2 \tan \delta \cdot 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / 3 \ln[(d + \Delta_e + \Delta_{iz})/(d + \Delta_e)]$,

де Δ_e – товщина напівпровідного екрана $\Delta_e = 0,5$ мм;

Δ_{iz} – товщина ізоляції $\Delta_{iz} = 6,0$ мм;

ε – відносна діелектрична проникність ізоляції даного кабелю (табл. 4.1) $\varepsilon = 3,6$;

$\tan \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат даного кабелю (табл. 4.1) $\tan \delta = 0,0035$;

відповідно $Pa = 0,017$ Вт/м.

Коефіцієнт взаємної індукції жили і оболонки $M_{об}$ за розд.2: h – діаметр фази в окремій свинцевій оболонці товщиною 1,5 мм дорівнює $h = d + 4\Delta_e + 2\Delta_{iz} + 2\Delta_o = 31,27$ мм, відповідно $M_{об} = 1,485 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Електричний опір жили змінному струму $R_{\sim(70)}$ за температури 70 °С (орієнтовно) за розд. 2 дорівнює $1,725 \cdot 10^{-4}$ Ом/м. Електричний опір оболонки змінному струму $R_{об(35)}$ за температури 35 °С (обираємо орієнтовно) дорівнює $1,617 \cdot 10^{-3}$ Ом/м. Фактор втрат у свинцевій оболонці:

$$k_{об} = \frac{(\omega \cdot M_{об})^2}{Re(35)^2 + (\omega \cdot M_{об})^2} \cdot \frac{Re(35)}{R_{\sim(70)}} = 0,008.$$

Втрати в жилі за густини струму в жилі $1,5 \text{ А/мм}^2$ не більші за $R \sim (70)200^2 = 6,9 \text{ Вт/м}$. Тоді втрати в оболонці $6,9 \cdot 0,008 = 0,55 \text{ Вт/м}$. Тобто втратами в ізоляції вже за лінійної напруги 20 кВ нехтувати не слід:

U , кВ	F , мм ²	d , мм	Pa , Вт/м	$R_{\sim(70)}$, Ом/м	$R_{об(35)}$, Ом/м	M , Гн/м	$k_{об}$	P , Вт/м
20	120	14,27	0,017	$1,725 \cdot 10^{-4}$	$1,617 \cdot 10^{-3}$	$1,485 \cdot 10^{-7}$	0,008	6,9
	150	15,96						
	185	17,72						
	240	20,18						
	300	22,57						
35	120	14,27						
	150	15,96						
	185	17,72						
	240	20,18						
	300	22,57						

2. Обчислити діелектричні втрати Pa на одиницю довжини для кабелю АПвПЕг $1 \times F-330$, побудувати графіки залежності діелектричних втрат в ізоляції від номінальної площі перерізу F жили кабелів у діапазоні перерізів від 300 мм^2 до 1000 мм^2 . Прийняти: густина струму в жилі дорівнює $1,5 \text{ А/мм}^2$; $2,0 \text{ А/мм}^2$.

5. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО ОПОРУ

5.1. Тепловий опір радіальному тепловому потоку

Відповідно до моделі стаціонарного теплового балансу (підрозд. 1.2) тепловий опір S – це коефіцієнт пропорційності між різницею температур τ («тепловою напругою») і інтенсивністю спричиненого нею теплового потоку P (1.8). Відповідно $S = \tau/P$ і одиниця вимірювання теплового опору К/Вт (тепловий Ом). У циліндричних координатах (r, θ, z) , найбільш прийнятних для опису процесів тепломасообміну в кабелях, основною розрахунковою моделлю є радіальна, в якій параметри теплового потоку залежать тільки від радіуса (радіальне поле). Така модель точна тільки за умови, що кабель – один, необмежено довгий і прямий. У такому разі градієнт температури $\frac{\partial \tau}{\partial r}$ обернено пропорційний до радіуса:

$$-\frac{\partial \tau}{\partial r} = \tau_0 / r \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (5.1)$$

де τ_0 – різниця температур між двома ізотермами з радіусами r_1 і r_2 .

Густина теплового потоку J_r через циліндричну поверхню радіусом r залежить тільки від радіуса, а її інтеграл по замкненій поверхні радіуса r дорівнює потужності теплового потоку: $\oint J_r ds = P$. Оскільки J_r по всій замкненій поверхні радіуса r є постійною величиною, а інтеграл ds по замкненій поверхні радіуса r на одиницю довжини кабелю дорівнює $2\pi r$, то:

$$J_r \cdot 2\pi r = P;$$

якщо питома теплопровідність матеріалу λ_τ не залежить від r , то:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \tau}{\partial r} \cdot \lambda_\tau \cdot 2\pi r &= P; \\ -\int_{\tau_0}^0 \partial \tau &= \frac{P}{\lambda_\tau \cdot 2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial r}{r}; \\ \tau_0 &= P \frac{1}{2\pi \lambda_\tau} \ln \frac{r_2}{r_1}, \end{aligned}$$

звідки тепловий опір S між двома ізотермами з радіусами r_1 і r_2 як коефіцієнт пропорційності між різницею температур τ_0 і інтенсивністю

спричиненого нею теплового потоку P на одиницю довжини кабелю дорівнює:

$$S = \frac{1}{2\pi\lambda_0} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (5.2)$$

де $\lambda_0 = \frac{1}{\sigma_0}$ – обернена величина до питомого теплового опору σ_0 матеріалу між двома ізотермами в Км/Вт, наведеному для деяких основних кабельних матеріалів в табл. 1.1.

Модель радіального стаціонарного потоку є основною розрахунковою моделлю, що використовується в кабельній техніці для опису процесів перенесення через однорідну речовину елемента конструкції кабелю.

Оскільки потенціал залежить тільки від радіуса лише за умови необмежено довгого кабелю з ізотермами у вигляді коаксіальних циліндрів, а речовина, в якій відбувається процес перенесення тепла в тій чи іншій мірі, є неоднорідною, формула (5.2) зумовлює похибку тим меншу, чим названі вище умови ближчі до реальності.

Якщо є очевидні відхилення від цих умов, то застосовують наближені методи розрахунку теплового опору, наприклад, для багатожильних кабелів відомі формули [3] одержані так званим методом елементарних теплових трубок. Практичний досвід у визначенні теплового опору для різних конструкцій кабелю і різних умов прокладання наданий у [1].

Приклади його застосування в наступних розділах. Загальний підхід полягає в тому, що для теплових розрахунків різні елементи подають таким чином, що металеві стрічки розглядають як складову з суцільного провідника, напівпровідникові елементи (включно з металізованими і наповненими сажею паперовими стрічками) розглядають як складову ізоляції. Відповідні складові розміри мають бути відповідно змінені на еквівалентні.

Таблиця 5.1 – Питомий тепловий опір матеріалів для захисних покриттів кабелів

Матеріал	Тепловий питомий опір (σ) °C · м/Вт
Компаундовані і волокнисті джутові матеріали	6,0
Шлангова гума	6,0
Поліхлоропрен	5,5
Полівінілхлорид: кабелі до 3 кВ включно	5,0
кабелі більше 3 кВ	6,0
Поліетилен	3,5
Бетон	1,0
Волокно	4,8
Азбест	2,0
Кераміка	1,2

Задачі та вправи:

1. Обчислити тепловий опір на одиницю довжини елементів конструкції кабелю АПвПЕг 1×F-330. Оцінити потужність теплового потоку між жилою і поверхнею кабелю, якщо в стаціонарному тепловому режимі виміряні температури жили і поверхні дорівнюють відповідно 80 °C і 42 °C. Результати розрахунків занести до таблиці.

Рішення. Оскільки напівпровідникові елементи розглядають як складову ізоляції, за радіус ізотерми, що має температуру жили, приймаємо радіус жили плюс товщина напівпровідного екрана $r_1 = d / 2 + \Delta$. Для 300 мм² $r_1 = 20,05 / 2 + 1 \approx 11$ мм. Радіус ізотерми, що має температуру мідного екрана: $r_2 = r_1 + \Delta_{із} + \Delta = 11 + 35 + 1 = 47$ мм. Питомий тепловий опір зшитого поліетилену 3,7 °C · м/Вт (табл. 1.1). Тепловий опір S_1 елемента конструкції, що складається з напівпровідного екрана, ізоляції, напівпровідного екрана за (5.2):

$$S_1 = \frac{3,7}{2\pi} \ln \frac{47}{11} = 0,855 \text{ °C} \cdot \text{м/Вт.}$$

Тепловим опором мідного екрана нехтуємо $S_2 = 0$.

$$\text{Тепловий опір захисних покриттів } S_3 = \frac{3,5}{2\pi} \ln \frac{52}{47} = 0,056 \text{ °C} \cdot \text{м/Вт.}$$

$$\text{Тепловий опір кабелю } S_k = 0,855 + 0,056 = 0,911 \text{ °C} \cdot \text{м/Вт.}$$

Для стаціонарного теплового балансу потужність теплового потоку між жилою і поверхнею кабелю дорівнює відношенню відповідної різниці температур до теплового опору кабелю: $P = (80 - 42)S_k = \text{Вт/м}$.

F , мм ²	d , мм	S_1 , °C · м/Вт	S_2 , °C · м/Вт	S_3 , °C · м/Вт	S_k , °C · м/Вт	P , Вт/м
300	20,05	0,855	0	0,056	0,911	
400	23,15					
500	25,89					
600	28,36					
700	30,63					
800	32,74					
900	34,73					
1000	36,61					

2. Побудувати графіки залежностей теплового опору S_1 елемента конструкції, що складається з напівпровідного екрана, ізоляції, напівпровідного екрана, теплового опору захисних покриттів S_3 і теплового опору кабелю S_k від площі перерізу жили за результатами розрахунків задачі № 1.

3. Побудувати графіки залежностей теплового опору кабелю S_k і потужності теплового потоку між жилою і поверхнею кабелю від площі перерізу жили за результатами розрахунків задачі № 1.

5.2. Тепловий опір не радіальному тепловому потоку

Особливістю конструкції трижильного кабелю з круглими жилами у спільних захисних покриттів є те, що теплове поле в ізоляції і у міжфазному заповненні не є радіальним: градієнт температури $\frac{\partial \tau}{\partial r}$ залежить не тільки від радіуса і модель (5.1) є неприйнятною.

У трижильних кабелях з металевою оболонкою чи екраном для кожної фази теплове поле в ізоляції радіальне, але у міжфазному заповненні не є радіальним. Тому модель (5.1) прийнятна для визначення теплового опору ізоляції, але не для визначення теплового опору міжфазного заповнення.

Найбільш застосовна модель нерадіального теплового потоку в стаціонарному режимі для таких кабелів спирається на поняття елементарної теплової трубки. Як і для моделі (5.1) кабель вважають

прямим і необмежено довгим. Геометрію теплового потоку на площині визначають шляхом його розділення на паралельні, однакові за інтенсивністю, теплові потоки в елементарних «теплових трубках». Геометрія теплового поля відображає рівність теплових опорів $S_i = \sigma \cdot l_i / F_i$ всіх елементарних трубок, де l_i – середня довжина трубки, F_i – середня площа її перерізу (рис. 5.1). Сума теплопровідностей елементарних трубок є величиною, оберненою до теплового опору ділянки між двома відповідними ізотермами. Іноді цей підхід називають методом очікуваних шляхів потоку.

Очевидно, що навіть за виконання умов щодо прямого і необмежено довгого кабелю та однорідного середовища між ізотермами, цей метод є приблизним. Тому його результати для відомих конфігурацій не радіального теплового поля кабелів у вигляді формул для розрахунку теплового опору містять багато параметрів, пов'язаних із конкретними конструкціями кабелів. До нормативних документів кабельної техніки [5] ці результати вводять у графічному вигляді.

Для конфігурації поля на рис. 5.1 і подібних до неї, тепловий опір між ізотермами θ_1 і θ_2 визначають за відомою [1], одержаною методом елементарних теплових трубок, формулою:

$$S = \frac{\sigma}{2\pi} \left\{ \left(0,85 + 0,2 \frac{\Delta}{\delta} \right) \cdot \ln \left[\left(8,3 - 2,2 \frac{\Delta}{\delta} \right) \cdot \frac{\Delta + \delta}{d} + 1 \right] \right\} \quad (5.3)$$

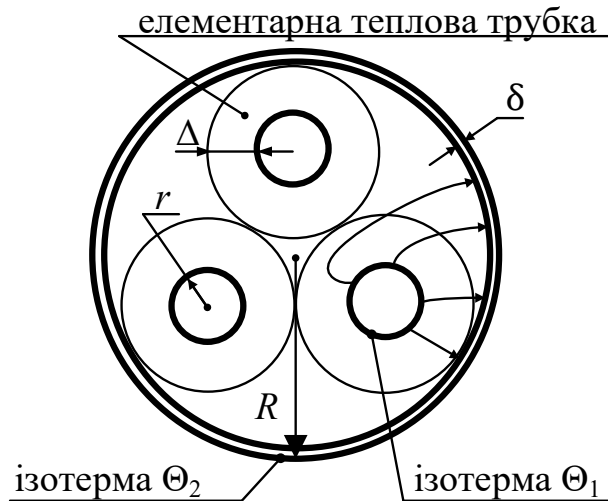


Рисунок 5.1 – Схема моделі нерадіального теплового потоку в трижильному кабелі з круглими жилами (θ_1) і спільною металевою оболонкою (θ_2):
 – відношення l_i / F_i середньої довжини трубки до її середньої площі перерізу має бути однаковим для всіх трубок;
 – симетричність конструкції кабелю дозволяє розглядати одну шосту частину всього теплового потоку

Формула (5.3) відрізняється від (5.2) безрозмірним множником у дужках, який називають геометричним коефіцієнтом теплового поля G .

Для секторних жил геометричний коефіцієнт $G_c = k_c \cdot G$, де значення k_c для різних співвідношень між розмірами жили та ізоляції при однаковій площі перерізу секторної та круглої жили наведені в такій таблиці, де $\lambda = (\Delta + \delta)/2r$:

λ	0,5	1,0	1,5	2,0
k_c	0,8	0,9	0,93	0,96

Очевидно, що геометричний коефіцієнт G теплового поля в елементах кабелів залежить від їх конструкції, тому загальну формулу для визначення теплового опору будь-якого елемента конструкції кабелю записують так [5]:

$$S = \frac{\sigma}{2\pi} G. \quad (5.4)$$

У графічному вигляді для конфігурації поля на рис. 5.1 геометричний коефіцієнт G теплового поля наведені на рис. 5.2 за [5]. На графік нанесено результати розрахунку за (5.3) для трьох конструкцій, в яких є подібне нерадіальне теплове поле. Видно, що для досить широкого

діапазону конструкцій кабелю (від АВВГ 3×25-1 до ОСБ 3×185-35) модель (5.3) є застосовною.

Для відомих кабелів з іншою конфігурацією теплового нерадіального поля рекомендоване використання відповідних графіків в [5] (приклад рис. 5.2) і розрахункових моделей, наприклад, формула для двужильних кабелів з фасонними жилами і поясною ізоляцією:

$$G = 2 \left(1 + \frac{2,2t}{2\pi(d_x + t) - t} \right) \ln \left[\frac{d_a}{2r_1} \right],$$

де d_a – діаметр по поясній ізоляції; r_1 – радіус описаного кола жил; d_x – діаметр жили з площею перерізу, як ущільнена фасонна жила, t – товщина ізоляції.

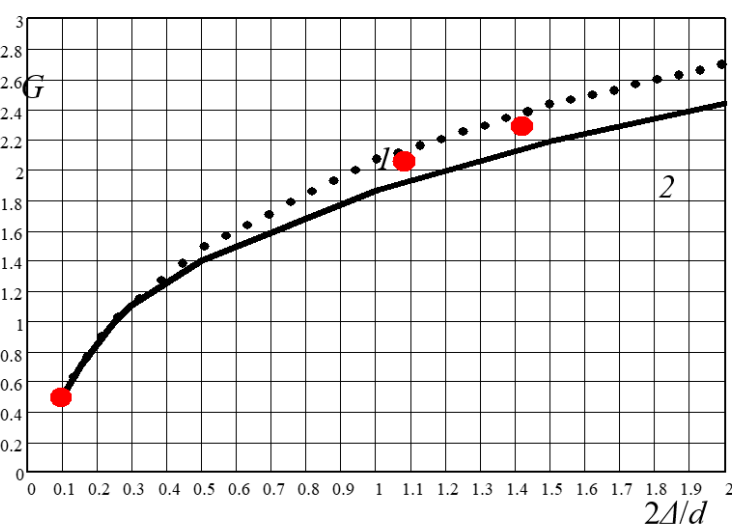


Рисунок 5.2 – Залежність геометричного коефіцієнта G в (5.4) для нерадіального теплового потоку в трижильному кабелі з круглими жилами і спільною металевою оболонкою від конструктивних розмірів кабелю:

d – діаметр жили; Δ – товщина фазної ізоляції; δ – товщина поясної ізоляції;

1 – залежність $G = f(2\Delta/d)$ для $(\Delta + \delta) / 2\Delta = 0,5$ за [5];

2 – залежність $G = f(2\Delta/d)$ для $(\Delta + \delta) / 2\Delta = 1,0$ за [5].

• – значення G , розраховані за (5.3) для кабелів

ОСБ 3×185-35 для міжфазного заповнення і подушки під броню $G = 0,49$;

АВВГ 3×25-1 для ізоляції $G = 2,06$; ААБ 3×25-10 для ізоляції $G = 2,29$

Задачі та вправи:

1. Обчислити тепловий опір кабелів ОСБ 3× F -20 і ОСБ 3× F -35 в діапазоні перерізів, наведених в таблиці:

U , кВ	F , мм ²	d , мм	σ , °С · Вт/м	G	$S_{із}$, °С · Вт/м	$S_{зп1}$, °С · Вт/м	$S_{зп2}$, °С · Вт/м	S , °С · Вт/м
20	120	14,27	5,5	0,323	0,598	0,283	0,059	0,541
	150	15,96						
	185	17,72						
	240	20,18						
	300	22,57						
35	120	14,27						
	150	15,96						
	185	17,72						
	240	20,18						
	300	22,57						

Рішення. Схема заміщення теплового потоку цього типу кабелів наведена на рис. 1.4. Тепловий опір потоку від всіх трьох жил дорівнює сумі третини теплового опору ізоляції і теплового опору захисних покриттів: $S_{із}/3 + S_{зп}$. Металева оболонка має високу теплопровідність і тому є ізотермою. Тепловий опір ізоляції за (5.2) для площі перерізу 120 мм² і напруги 20 кВ: $S_{із} = \frac{\sigma_{із}}{2\pi} \ln \frac{d + 4\Delta_e + 2\Delta_{із}}{d}$, де $d = (120/0,75\pi)^{0,5} = 14,27$ мм; Δ_e – товщина напівпровідного екрана $\Delta_e = 0,5$ мм; $\Delta_{із}$ – товщина ізоляції $\Delta_{із} = 6,0$ мм (див. № 52), звідки $S_{із} = 0,598$ °С · м/Вт. Тепловий опір захисних покриттів складається з двох частин – до броні $S_{зп1}$ (міжфазне заповнення і подушка) та після броні $S_{зп2}$ (зовнішнє захисне покриття): $S_{зп} = S_{зп1} + S_{зп2}$. Броню як металевий елемент з високою теплопровідністю вважають ізотермою, тому $S_{зп2}$ за (5.2) для радіального теплового поля: $S_{зп2} = \sigma_{зп2} \ln \left(\frac{d_{\text{е}}}{(d_{\text{е}} - 2\Delta_{зп2}) / 2\pi} \right)$, де $\sigma_{зп2}$ – питомий тепловий опір зовнішнього захисного покриття, $d_{\text{е}}$ – діаметр кабелю, $\Delta_{зп2}$ – товщина захисного покриття: $S_{зп2} = \frac{5,5}{2\pi} \ln \frac{76,6}{76,6 - 2 \cdot 2,5} = 0,059$ °С · м/Вт. $S_{зп1}$ за (5.3) як для нерадіального теплового поля у трижильному кабелі з круглими жилами, де σ – питомий тепловий опір заповнення між фазами; Δ – товщина обмотки ізоляційними стрічками по оболонці $\Delta = 0,24$ мм; δ – товщина подушки під броню $\delta = 1,5$ мм; d – діаметр по оболонці $d = 31,3$ мм. Звідки $G = 0,323$; $S_{зп1} = 0,283$ °С · м/Вт. Тепловий опір кабелю ОСБ 3×120-20: $S = 0,598/3 + 0,283 + 0,059 = 0,541$ °С · м/Вт.

2. Порівняти значення геометричного коефіцієнта G , одержані в попередній задачі з даними рис. 5.2 для нерадіального теплового потоку в трижильному кабелі з круглими жилами і спільною металевою оболонкою. Зробити висновок щодо використання формули (5.3) чи емпіричних кривих за [5] для кабелів типу ОСГ, ОСБ і подібних (кабелі в типу SL і SA).

3. Знайти тепловий опір для ААБ 3×F-10, $F = (16 - 240) \text{ мм}^2$.

5.3. Тепловий опір довкілля

5.3.1. Кабелі, прокладені в землі

Тепловий опір довкілля при прокладанні в землі визначають за загальною формулою для нерадіального теплового поля (5.4), де σ – питомий тепловий опір ґрунту, а геометричний коефіцієнт залежить для одного кабелю від його діаметра d_k і глибини прокладання L :

$$S_{\text{гр}} = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \frac{4L}{d_k}. \quad (5.5)$$

Якщо глибина прокладання перевищує діаметр кабелю у п'ять і більше разів, ця формула визначає геометричний коефіцієнт з похибкою менше однієї тисячної. Якщо кабелі прокладені в землі групою, то використовують принцип суперпозиції, приймаючи, що нагрівання кожної кабельної лінії збільшує температуру оточення інших кабелів. Обчислення такого підвищення температури біля поверхні кабелю $\Delta\tau$, спричинене іншими кабелями групи, віднімають від величини $\Delta\theta$, використаної в рівнянні для номінального струму (1.18). Таким чином підвищення температури $\Delta\theta_p$ навколо поверхні кабелю p , номінальне навантаження якого визначається, спричинене розсіянням потужності інших $(q - 1)$ кабелів групи, таке:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{qp}, \quad (5.6)$$

де $\Delta\theta_{qp}$ – перевищення температури навколо поверхні кабелю p спричинене розсіянням потужності P_q на одиницю довжини кабелю q :

$$\Delta\theta_{qp} = \frac{\sigma}{2\pi} P_q \ln \frac{L'_{qp}}{L_{qp}}, \quad (5.7)$$

де L_{qp} і L'_{qp} – відстані від центра кабелю p до центра кабелю q і до центра відображення кабелю в повітрі над поверхнею землі (рис. 5.3).

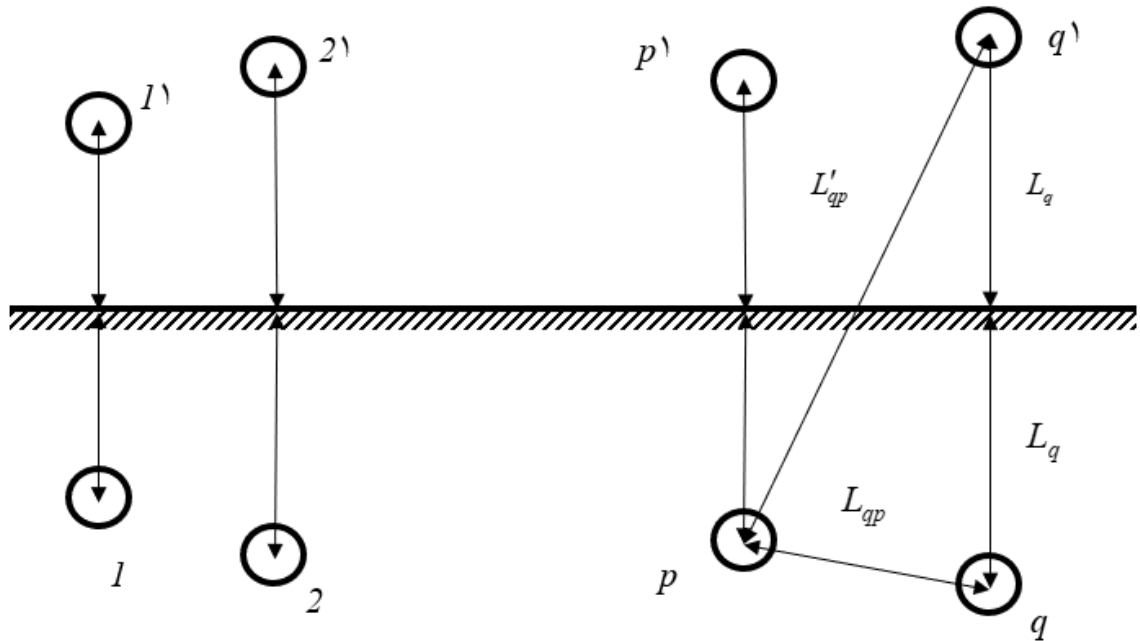


Рисунок 5.3 – Схема вимірювання відстаней до кабелів групи та їх дзеркальних зображень для визначення за (5.7) перевищення температури навколо поверхні кабелю p , спричиненого розсіянням потужності інших кабелів

Оцінювання потужності розсіяння на одиницю довжини кожного кабелю має бути виконано наперед і може потім коригуватись за результатами обчислень коли це необхідно. Сума одержаних за (5.7) значень $\Delta\theta_p$ впливу всіх кабелів групи, крім того, підвищення температури довкілля якого визначають, підставляють у рівняння (1.18) як від'ємник для різниці температур.

Таке обчислення має бути виконано для всіх кабелів групи і повторене за необхідності, щоб уникнути можливості перегрівання будь-якого кабелю.

Для простих конфігурацій розташування кабелів, які часто застосовують, є готові формули, одержані тим самим методом суперпозиції, при цьому обчислюють змінену величину теплового опору довкілля і залишають незмінною величину $\Delta\theta$ у рівнянні для номінального струму [3]. Наприклад, для двох кабелів з однаковими втратами, розташованих в горизонтальній площині тепловий опір ґрунту на одиницю довжини:

$$S_{гр} = \frac{\sigma}{2\pi} \left\{ \ln \left(\frac{2L}{d_k} + \sqrt{\left(\frac{2L}{d_k} \right)^2 - 1} \right) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{h} \right)^2 \right] \right\}, \quad (5.8)$$

де L – відстань між поверхнею землі і віссю кабелю; d_k – зовнішній діаметр кабелю; h – відстань між центрами двох сусідніх кабелів.

Для трьох кабелів з однаковими втратами, розташованих у горизонтальній площині, тепловий опір ґрунту на одиницю довжини визначають для кабелю, розташованого посередині, за (5.8), але без коефіцієнта $\frac{1}{2}$ перед другим логарифмом у дужках.

Для трьох кабелів з однаковими втратами, розташованих трикутником, L в (5.8) вимірюють від поверхні землі до центра групи у вигляді трикутника і d_k є зовнішній діаметр одного кабелю. Тепловий опір ґрунту на одиницю довжини визначають для будь-якого кабелю за (5.8) без коефіцієнта $\frac{1}{2}$ перед другим логарифмом у дужках.

Задачі та вправи

1. Обчислити тепловий опір довкілля на одиницю довжини кабелю АПвПЕг $1 \times 300-330$, прокладеного в ґрунті. У лінії три таких кабелі, розміщених у площині на відстані зовнішнього діаметра один від одного.

Рішення. Радіус мідного екрана такого кабелю $r_2 = 47$ мм. Якщо товщина захисних покриттів поверх мідного екрана складає 5 мм, то зовнішній діаметр кабелю $d_k = (47 + 5) \cdot 2 = 104$ мм. Відстань h між центрами двох сусідніх кабелів $h = 104 \cdot 2 = 208$ мм. Якщо глибина прокладання 1 м, то за (5.8) для трьох кабелів з однаковими втратами, розташованих у горизонтальній площині, тепловий опір ґрунту з питомим тепловим опором $1,2 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}$:

$$S_{\text{гр}} = \frac{1,2}{2\pi} \left\{ \ln \left(\frac{2 \cdot 1000}{104} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 1000}{104} \right)^2 - 1} \right) + \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot 1000}{208} \right)^2 \right] \right\} = 1,827 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}.$$

2. Обчислити тепловий опір довкілля на одиницю довжини кабелю АПвПЕг $1 \times F-330$, прокладеного в ґрунті. У лінії три таких кабелі, розміщених в площині: а) впритул; б) на відстані зовнішнього діаметра один від одного. Значення F див. табл 2.5, діаметральна товщина всіх елементів конструкції кабелю поверх жили дорівнює 55 мм.

5.3.2. Кабелі, прокладені в повітрі

Якщо кабель, прокладений у повітрі, захищений від дії прямого сонячного випромінювання, то тепловий опір довкілля є обернено пропорційним до площі поверхні кабелю πd_{κ} (на одиницю довжини), коефіцієнту теплопередачі α від поверхні кабелю в оточуюче повітря:

$$S_{\pi} = \frac{1}{\pi d_{\kappa} \alpha}, \quad (5.9)$$

де коефіцієнт α залежить від багатьох факторів, зокрема від умов конвекції, матеріалу поверхні кабелю, різниці температур $\Delta\theta_{\text{пов}}$ між поверхнею кабелю і оточуючим повітрям, тому при визначенні навантажувальної здатності використовують умовні середні значення, підтвержені експериментально.

Якщо немає конкретної інформації про значення α , в [1, 5] рекомендоване значення для силових кабелів $\alpha = 10 \text{ Вт/}^{\circ}\text{С} \cdot \text{м}^2$. Залежність α від різниці температур $\Delta\theta_{\text{пов}}$ між поверхнею кабелю і оточуючим повітрям:

$$\alpha = h_{\text{пов}} \cdot (\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4} \quad (5.10)$$

де $h_{\text{пов}}$ – коефіцієнт тепловиділення в $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}^{5/4}$, наведений на рис. 5.4 для кабелів з чорною поверхнею за [5] для різних конфігурацій прокладання кабелів у повітрі (рис. 5.5). При цьому кабелі в зовнішньому захисному покритті і кабелі з неметалевою поверхнею розглядають як кабелі з чорною поверхнею. Для кабелів без зовнішнього захисного покриття, освинцьованих чи броньованих, значення $h_{\text{пов}}$ має бути прийнято 88 % від значення для чорної поверхні.

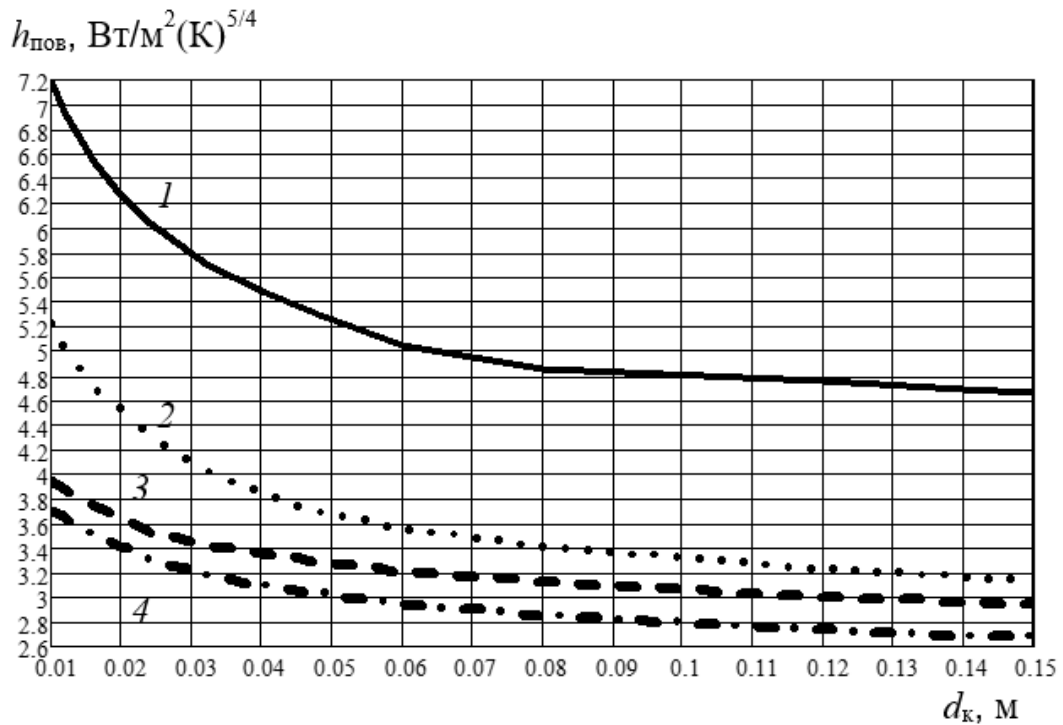


Рисунок 5.4 – Залежності коефіцієнта тепловиділення в (5.10) від діаметра кабелю з чорною поверхнею за різних конфігурацій прокладання в повітрі

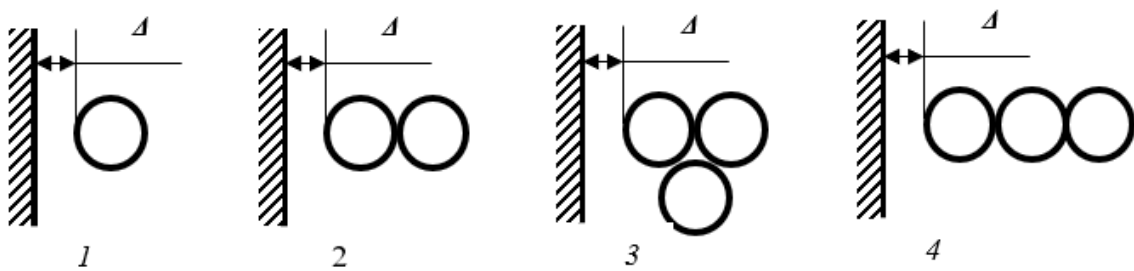


Рисунок 5.5 – Конфігурації прокладання кабелів у повітрі:

- 1 – кабель на відстані Δ від вертикальної поверхні, не меншої за $0,3 d_k$;
- 2 – два кабелі горизонтально впритул один до одного на відстані Δ від вертикальної поверхні, що не менша за $0,5 d_k$;
- 3 – три кабелі впритул один до одного по вершинах правильного трикутника на відстані Δ від вертикальної поверхні, що не менша за $0,5 d_k$;
- 4 – три кабелі розташовані в горизонтальній площині впритул один до одного на відстані Δ від вертикальної поверхні, що не менша за $0,5 d_k$.

Значення $(\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4}$ в (5.10) входить до рівняння для номінального струму (1.18) як невідоме і може бути обчислене за [5] ітераційним рішенням системи двох рівнянь з двома невідомими: (1.18) і $\Delta\theta_{\text{пов}} = I^2 \cdot n \cdot Rg(\theta_1)$. Відповідне розрахункове співвідношення таке:

$$(\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4}_{k+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + (\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4}_{k+1} \frac{\pi d_{\text{к}} h_{\text{пов}}}{k_1 + k_1 + k_2} \left[\frac{S_1}{n} + S_2(1+k_1) + S_3(1+k_1+k_2) \right]} \right]^{0.25} \quad (5.11)$$

де $\Delta\theta_d = Pa \left[\left(\frac{1}{1+k_1} - \frac{1}{2} \right) \cdot S_1 - \frac{n \cdot k_2 \cdot S_2}{1+k_1+k_2} \right]$, позначення відповідні до (1.18), а ітерації продовжують допоки $\Delta\theta_d = Pa \cdot \left[\left(\frac{1}{1+k_1} - \frac{1}{2} \right) \cdot S_1 - \frac{n \cdot k_2 \cdot S_2}{1+k_1+k_2} \right]$.

Якщо на кабель діє пряме сонячне випромінювання, то в (5.10) слід врахувати зменшення допустимої різниці температур $\Delta\theta_i$ за рахунок прямого сонячного випромінювання. Для цього в чисельник формули (5.11) треба додати $\Delta\theta_i$ і виконати ітераційне обчислення. $\Delta\theta_i$ визначає зменшення допустимої різниці температур за рахунок прямого сонячного випромінювання:

$$\Delta\theta_i = \frac{\sigma \cdot d_{\text{е}} \cdot H}{1+k_1+k_2} \left[\frac{S_1}{n} + S_2(1+k_1) + S_3(1+k_1+k_2) \right], \quad (5.12)$$

де σ – коефіцієнт поглинання сонячної радіації поверхнею кабелю, наведений у табл. 5.2; H – інтенсивність сонячної радіації, яку приймають 10^3 Вт/м^2 , якщо не зазначено інше.

Таблиця 5.2 – Коефіцієнт абсорбції сонячного випромінювання для поверхні кабелів

Матеріал	σ
Бітум/джутовий захисне покриття	0,8
Поліхлоропрен	0,8
Полівінілхлорид	0,6
Поліетилен	0,4
Свинець	0,6

Задачі та справи

Приклад 1. Обчислити тепловий опір довкілля на одиницю довжини кабелю АПвПЕг $1 \times 300-330$, прокладеного в повітрі. У лінії три таких кабелі, розміщених у горизонтальній площині впритул один до одного. Кабелі прокладені вздовж вертикальної стіни. Відстань до стіни від найближчого до неї кабелю 60 мм.

Рішення. Радіус мідного екрана такого кабелю $r_2 = 47$ мм. Якщо товщина захисних покриттів поверх мідного екрана складає 5 мм, то

зовнішній діаметр кабелю $d_k = (47 + 5) \cdot 2 = 104$ мм. Відстань від стіни найближчого кабелю більша за половину його діаметра. Поверхня кабелю пластмасова, отже, чорна. Коефіцієнт тепловиділення $h_{\text{пов}}$ рис. 5.5(4) дорівнює $h_{\text{пов}} = 2,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^{5/4}$. Для виконання ітерацій за (5.11) приймаємо перше значення $(\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4} = 2$. Теплові опори елементів конструкції кабелю такі:

$$S_1 = 0,855 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}; S_2 = 0; S_3 = 0,056 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}.$$

Електричний опір жили змінному струму $R_{\sim}(90)$ для перерізу 300 мм^2 беремо з табл. 2.5: $R_{\sim}(90) = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}$.

Електричний опір екрана обчислюємо як опір постійному струмові нехтуючи впливом вихрових струмів, і приймаючи наближено температуру екрана $45 \text{ }^\circ\text{C}$ за температури жили $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (перегрівання екрана приблизно третина перегрівання жили). Коефіцієнт укрутки екрана $K_y \cdot K_3 = 1,15 \cdot 1$.

Для перерізу 300 мм^2 : відстань між центрами жил дорівнює діаметру кабелю $d_k = h = 20,05 + 37 \cdot 2 + 5 \cdot 2 \approx 104$ мм; радіус мідного екрана $R_1 = 0,5 \cdot 20,05 + 35 + 2 \cdot 1 \approx 47$ мм; $\Delta_e = 0,28$ мм; $M_e = 1,59 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$. Для перерізу 300 мм^2 обчислення фактора втрат для кабелю з найбільшими втратами за (2.50) дає:

$$X_m = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 314}{2\pi} \ln 2 = 4,353 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м};$$

$$X = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 314}{2\pi} \ln \frac{104}{47 + 0,28} = 4,986 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м};$$

$P = 9,34 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}; Q = 3,531 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}$, де X – реактивний опір екрана на одиницю довжини кабелю для двох суміжних одножильних кабелів; X_m – взаємний реактивний опір між екраном зовнішнього кабелю і жилами двох інших, за розташування кабелів у площині без транспозиції.

Для середнього кабелю фактор втрат за (2.50):

$$k_1 = \frac{Q^2}{R_e(\theta_e)^2 + Q^2} \cdot \frac{R_e(\theta_e)}{R_{ж}(\theta_{ж})} = 0,028,$$

де опір екрану:

$$R_e(45) = 0,0172 \cdot 10^{-6} \cdot 1,15[1 + 4 \cdot 10^{-3}(45 - 20)] / 0,2 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 3,62 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}.$$

Фактор втрат $k_2 = 0$.

Таким чином формула для ітерацій спрощується:

$$(\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4}_{k+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + (\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4}_k \frac{\pi d_k h_{\text{пов}}}{1+k_1} \left[\frac{S_1}{n} + S_3(1+k_1) \right]} \right]^{0.25},$$

де $\Delta\theta_d = Pa \left(\frac{1}{1+k_1} - \frac{1}{2} \right) S_1$, де втрати в ізоляції $Pa = 1,004$ Вт/м.

Ітераційна процедура для $x = (\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4}$ починаючи з $x = 2$ для рівняння

$$x + 0,001 = \left[\frac{70 + (1,028^{-1} - 0,5)0,855}{1 + x \cdot \pi \cdot 0,104(0,855 + 0,056 \cdot 1,028) \cdot 1,028^{-1}} \right]^{0.25}$$

дає рішення $x = 2,524$.

Тепловий опір довкілля за (5.9), (5.10):

$$S_{\text{п}} = \frac{1}{\pi d_k \cdot h_{\text{пов}} \cdot (\Delta\theta_{\text{пов}})^{1/4}} = \frac{1}{\pi \cdot 0,104 \cdot 2,8 \cdot 2,524} = 0,433 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}.$$

У цьому прикладі важливим є те, що в заданих умовах прокладання, для кабелю АПВПЕг $1 \times 300-330$ коефіцієнт теплопередачі α від поверхні кабелю в оточуюче повітря в (5.9) є суттєво меншим ($2,8 \cdot 2,524 \approx 7$ Вт/°С · м²) за середній рекомендований [1] для силових кабелів: $\alpha = 10$ Вт/°С · м². Це зумовлює більший тепловий опір довкілля, що природно для розташування впритул трьох потужних кабелів.

5.3.3. Кабелі, прокладені в кабельних спорудах

При прокладанні кабелів у спеціальних спорудах, таких як жолоби, блоки, труби, загальний підхід до обчислення теплового опору довкілля S_4 полягає в тому, що зовнішній за відношенням до кабелю тепловий опір складається з трьох частин:

а) тепловий опір повітря, розташованого між поверхнею кабелю і внутрішньою поверхнею споруди S'_4 ;

б) тепловий опір самої споруди, S''_4 , тепловий опір металевої труби не враховують;

в) тепловий опір довкілля споруди S'''_4 .

Величина S_4 в рівнянні (1.18) для допустимого струму навантаження має бути замінена на суму складових, тобто:

$$S_4 = S'_4 + S''_4 + S'''_4. \quad (5.13)$$

Складові (5.13) визначають за співвідношеннями, наведеними в наступному прикладі.

Приклад. Лінія прокладена трьома кабелями АВВГ 1×120-6 в азбоцементних трубах, розташованих у площині впритул, у траншеї на глибині 800 мм. Обчислити зовнішній за відношенням до кабелю тепловий опір.

Рішення. Діаметр кабелю складається з діаметра суцільної жили, подвоєної товщини ізоляції і екрана з ізоляції, подвоєної товщини оболонки: $d_{\epsilon} = 12,36 + 2(3,4 + 0,5 + 2) = 24,16$ мм.

Тепловий опір S'_4 – це тепловий опір повітря в трубі. Формула (5.9) є застосовною, значення коефіцієнта теплопередачі α від поверхні кабелю в оточуюче повітря, якщо воно не визначене експериментально, потрібно взяти рекомендоване ($\alpha = 10$ Вт/°С · м²), а результат порівняти з доступними емпіричними оцінками. У [5] наведено таке емпіричне співвідношення для кабелів в азбоцементних трубах: $S'_4 = 5,2 / (1 + 0,1(1,2 + 0,006 \cdot \theta) d_{\epsilon})$, яке за $\theta = 30$ °С дорівнює $S'_4 = 1,2$ °С·м/Вт. За (5.9): $S'_4 = 1/\pi d_k \cdot \alpha / \pi \cdot 0,02416 \cdot 10 = 1,3$ °С · м/Вт. Оцінки достатньо близькі і вибрати доцільно більшу, щоб не зумовити перевищення допустимого нагрівання кабелю.

Тепловий опір труби за (5.2) $S''_4 = \frac{\sigma_{\text{тр}}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_{\text{тр}} + 2\Delta_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}}$, де за внутрішнього діаметра труби $d_{\text{тр}} \approx 1,7 \cdot d_k = 40,8$ мм, питомого теплового опору азбоцементу (табл. 5.2) 2 °С · м/Вт і її товщини 5 мм, $S''_4 = 0,07$ °С · м/Вт.

Тепловий опір ґрунту S'''_4 визначаємо як для кабелів прокладених в ґрунті впритул:

$$S'''_4 = \frac{\sigma}{2\pi} \cdot \left\{ \ln \left(\frac{2 \cdot L}{d_{\text{тр}}} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot L}{d_{\text{тр}}} \right)^2 - 1} \right) + \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot L}{d_{\text{тр}}} \right)^2 \right] \right\},$$

де σ – питомий тепловий опір ґрунту, $\sigma = 1,0$ °С · м/Вт; L – відстань між поверхнею землі і віссю труби, $L = 800$ мм; $d_{\text{тр}}$ – зовнішній діаметр труби $d_{\text{тр}} = 40,8$ мм. $S'''_4 = 1,862$ °С · м/Вт. Зовнішній за відношенням до кабелю тепловий опір:

$$S_4 = 1,3 + 0,07 + 1,862 = 3,232 \text{ °С} \cdot \text{м/Вт.}$$

Одержаний результат свідчить про те, що умови охолодження найбільш нагрітого середнього кабелю при прокладанні в площині впритул суттєво погіршені. Доцільне застосування спеціальної засипки з малим питомим тепловим опором.

5.3.4. Особливості охолодження ЗПЕ-кабелів у повітрі

Сучасна тенденція переходу від традиційної паперової імпрегнованої ізоляції до сучасної твердої полімерної ізоляції, найбільш поширеними з яких є ЗПЕ-кабелі із суттєвим підвищенням допустимої температури нагріву (90 °С) і відповідно підвищенням пропускної здатності, зумовила цілий ряд додаткових вимог до випробувань і діагностики цих кабелів.

Зокрема це стосується застосовності емпіричної складової нормативних документів щодо визначення параметрів їх охолодження з огляду на суттєво більші значення площі перерізу більш нагрітої жили, так і відсутності у більшості конструкцій ЗПЕ-кабелів для прокладання у повітрі масивних випресуваних металевих оболонок, які ефективно відводять тепло в оточуюче середовище.

Високий порівняно із традиційним коефіцієнт заповнення перерізу багатопроволочної жили, підвищена допустима температура ізоляції і вплив конструкції захисних покривів на відведення тепла з їх поверхні вимагають додаткового аналізу визначення теплового опору оточуючого середовища порівняно із рекомендаціями для традиційних кабелів.

Для кабелів відносно великого діаметру з підвищеною температурою поверхні коефіцієнт теплопередачі у повітрі α в (5.9) визначається як конвекцією, так і випромінюванням: внеском випромінювання в охолодження кабелю в повітрі не можна знехтувати.

Відповідно до двох основних процесів охолодження кабелю в повітрі, – конвективного теплообміну і випромінювання, α може бути представлено сумою:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_b, \quad (5.14)$$

де α_b – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням ;

α_k – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, інтенсивність якої характеризує спеціальний критерій Нуссельта Nu .

Значення Nu в свою чергу визначається порядком добутку двох інших теплофізичних критеріїв, – Грассгофа Gr і Прандтля Pr , значення яких традиційно використовують для визначення параметрів охолодження кабелів у повітрі [дис. Гонтар]:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / d = C_1 (Gr \cdot Pr)^m \cdot \lambda / d; \quad (5.15)$$

$$Gr = \beta \cdot \Delta \Theta_s \cdot d^3 g / \nu^2; \quad (5.16)$$

$$Pr = \nu c / \lambda, \quad (5.17)$$

де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря, $\beta = 1/T_{\text{ср}}$, K^{-1} , де $T_{\text{ср}}$ – середня абсолютна температура повітря;

$\Delta \Theta_s$ – різниця температур поверхні кабелю Θ_s і довкілля Θ_{oc} :

$$\Delta \Theta_s = \Theta_s - \Theta_{\text{oc}};$$

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

ν – кінематична в'язкість повітря, $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

c – питома теплоємність повітря, $c = 1,01 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

C_1 , m – параметри критерію Нуссельта, які залежать від добутку двох інших критеріїв теплофізики, а саме критерію Грассгофа Gr і Прандтля Pr , і в широкому діапазоні значень $Gr \cdot Pr \in [5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7]$ дорівнюють $C_1 = 0,54$; $m = 0,25$.

В (5.14) параметр α , залежить від різниці температур $\Delta \theta_{\text{пов}}$ між поверхнею кабелю і оточуючим повітрям [5]:

$$\alpha = h_{\text{пов}} \cdot (\Delta \theta_{\text{пов}})^{1/4},$$

де $h_{\text{пов}}$ – коефіцієнт тепловиділення в $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^{5/4}$, наведений на рис. 5.4 для кабелів з чорною поверхнею за [5].

Відповідно коефіцієнт теплового розсіяння з поверхні кабелю $h_{\text{пов}}$ з урахуванням складових конвекції h_k і випромінювання h_b є сумою:

$$h_{\text{пов}} = h_b + h_k. \quad (5.18)$$

В підрозділі 5.3.2 наведено рекомендації діючого стандарту [5] щодо визначення h_k (з припущення, що випромінюванням можна знехтувати) у вигляді графіків (рис. 5.4 і рис. 5.5) і формули для визначення $x = (\Delta \theta_{\text{пов}})^{1/4}$ ітераційною процедурою (5.11).

Всі вони обумовлені цілим рядом припущень, за якими розгляд тільки конвективного охолодження кабелю, а різні конструкції кабелів об'єднані однаковими емпіричними (з досвіду) рекомендаціями, вираженими графічно (рис. 5.4 і рис. 5.5) або алгоритмом відповідного

ітераційного розрахунку. Підсумковою в [1, 5] є рекомендація: якщо немає конкретної інформації про значення α , рекомендоване значення для силових кабелів $\alpha = 10 \text{ Вт/}^\circ\text{С} \cdot \text{м}^2$.

Очевидно, що з огляду на суттєво більші значення площі перерізу більш нагрітої жили, так і відсутність у більшості конструкцій ЗПЕ-кабелів для прокладання у повітрі масивних випресуваних металевих оболонок, які ефективно відводять тепло в оточуюче середовище, рекомендації в [1, 5] можуть бути застосовані лише після теоретичної і експериментальної перевірки основних припущень.

Першим кроком є приклад 1 підрозділу 5.3.2, за яким виконання рекомендацій [5] для кабелю АПВПЕГ 1×300-330 при розташуванні впритул трьох кабелів. Коефіцієнт теплопередачі α від поверхні найбільш нагрітого кабелю в оточуюче повітря одержано суттєво меншим ($2,8 \cdot 2,524 \approx 7 \text{ Вт/}^\circ\text{С} \cdot \text{м}^2$) за середній рекомендований $\alpha = 10 \text{ Вт/}^\circ\text{С} \cdot \text{м}^2$. Це зумовлює суттєво більший тепловий опір довкілля і доцільність перевірки.

Приклад 2. Найперше теоретично (не потребує тривалих і затратних досліджень) слід перевірити нехтування випромінюванням з поверхні ЗПЕ-кабелю.

Якщо вирази за (5.15), (5.16), (5.17) для теплофізичних критеріїв підставити у (5.9) і (5.10), то одержимо вираз,

$$h_k = C_1 (\beta \cdot d^3 g v^{-1} \cdot c \cdot \lambda^{-1})^m \cdot \lambda/d = \left(\frac{c p \cdot d^3 \cdot g \cdot v^{-1} \cdot \lambda^{-1}}{273 + \Theta_{oc} + \Delta\Theta_s/2} \right)^m \cdot \frac{\lambda \cdot C_1}{d}. \quad (5.19)$$

Важливо те, що це дає можливість виразити аналітично коефіцієнт теплового розсіяння при конвекції як функцію різниці температур $\Delta\Theta_s$ між поверхнею кабелю і віддаленим від кабелю повітряним середовищем який є необхідним параметром для визначення навантажувальної здатності.

Відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням описує закон Стефана-Больцмана, за яким коефіцієнт теплопередачі випромінюванням $\alpha_{в}$:

$$\alpha_{в} = \varphi \cdot \varepsilon_t \cdot C_0 (T_{п}^4 - T_{oc}^4)/(T_{п} - T_{oc}), \quad (5.20)$$

де C_0 – постійна Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4)$;

ϕ – коефіцієнт, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю дорівнює одиниці;

ε_t – коефіцієнт чорноти, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній оболонці знаходиться в діапазоні від 0,8 до 0,9;

$T_{\text{п}}, T_{\text{ос}}$ – абсолютні температури нагрітого тіла і середовища.

Оскільки $\alpha_{\text{к}}$ і $\alpha_{\text{в}}$ є функціями різниці температур поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища, позначеної в теплофізичному критерії Грасгофа Gr як $\Delta\Theta_s$ зручно для подальших розрахунків записати формулу для $\alpha_{\text{в}}$ як функцію $\Delta\Theta_s$:

$$\alpha_{\text{в}} = \varepsilon_1 \cdot C_0 \Delta\Theta_s^{-1} \cdot [(\Theta_{\text{ос}} + \Delta\Theta_s + 273)^4 - (\Theta_{\text{ос}} + 273)^4]. \quad (5.21)$$

У підсумку коефіцієнт теплового розсіяння h при конвекції і випромінюванні, а також його дві складові $h_{\text{в}}$ і $h_{\text{к}}$ для горизонтально розташованого окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній зовнішній оболонці діаметром d визначає формула, до якої входять крім відомих класичних теплофізичних параметрів: $\Theta_{\text{ос}}$ – температура оточуючого середовища і змінна $\Delta\theta_{\text{пов}}$:

$$h = h_{\text{в}} + h_{\text{к}} = h_{\text{в}}(I, \Delta\theta_{\text{пов}}) + h_{\text{к}}(I, \Delta\theta_{\text{пов}}), \quad (5.22)$$

при цьому змінна $\Delta\Theta_s$ узгоджена з струмом навантаження I за заданої температури Θ_m в тривалому режимі експлуатації.

Таким чином коефіцієнт теплового розсіяння h при конвекції і випромінюванні, а також його дві складові $h_{\text{в}}$ і $h_{\text{к}}$, можуть бути визначені аналітично рішенням системи рівнянь, що пов'язує класичні теплофізичні параметри, температуру оточуючого середовища $\Theta_{\text{ос}}$ в $^{\circ}\text{C}$ (зовнішній надійно визначений параметр) і змінну $\Delta\theta_{\text{пов}}$, яка залежить від струму навантаження I за заданої температури $\Delta\Theta = \Theta_m - \Theta_{\text{ос}}$ в тривалому режимі експлуатації:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \sqrt{\frac{\Delta\Theta}{R \cdot \left(\sum_{i=1}^n S_i + \frac{(h \cdot \Delta\Theta_s^{0,25})^{-1}}{\pi \cdot d} \right)}}, \end{array} \right. \quad (5.23.1)$$

$$\Delta\Theta_s = \Delta\Theta - I^2 \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n S_i, \quad (5.23.2)$$

$$h = h_{\text{в}}(I, \Delta\theta_{\text{пов}}) + h_{\text{к}}(I, \Delta\theta_{\text{пов}}), \quad (5.23.3)$$

де три параметри: I – допустимий струм в [3]; h – коефіцієнт теплового розсіяння ($\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}^{5/4}$); $\Delta\Theta_s$ – різниця температур між

поверхнею кабелю і оточуючим повітрям є шуканими змінними системи, визначення всіх інших параметрів системи забезпечене усталеними процедурами [3] і перевірене досвідом в техніці силових кабелів.

Використання наведеної системи рівнянь для практичних розрахунків можливе шляхом ітераційних розрахунків, виконання яких за допомогою комп'ютера не викликає труднощів за умови достатньо реального визначення початкових значень шуканих змінних.

Результати розрахунку за (5.20) і (5.21) технічно виправданих значень для визначення діапазону змінних h і $\Delta\Theta_s$ ЗПЕ-кабелю в широкому діапазоні діаметрів ілюструє рис.5.6.

Крім визначення технічно виправданих значень діапазону змінних h і $\Delta\Theta_s$ рис. 5.6 ілюструє важливу інформацію про те, що коефіцієнт теплового розсіяння h_b практично не залежить ні від діаметру кабелю d , ні від $\Delta\Theta_s$ (нижня крива), а сумарний коефіцієнт теплового розсіяння практично не залежить від $\Delta\Theta_s$, але зменшується із збільшенням діаметру кабелю. І це тільки підготовка до вирішення системи (5.23).

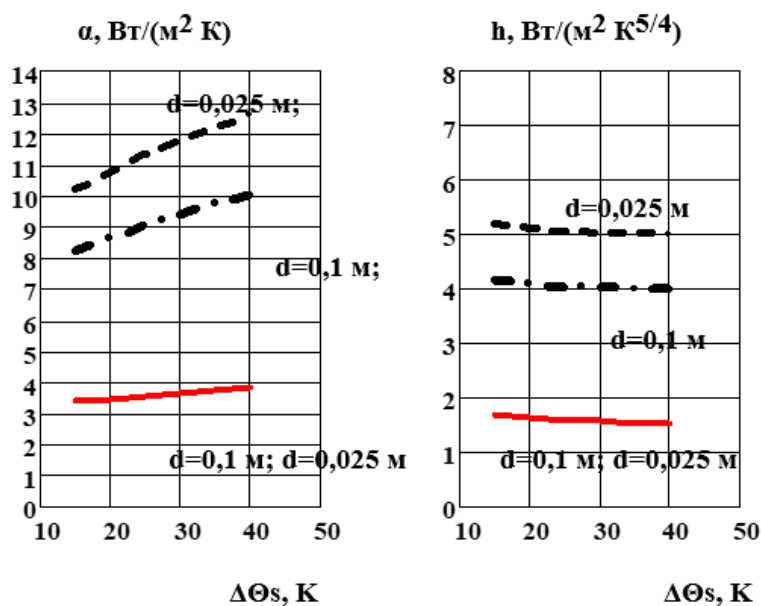


Рисунок 5.6 – Залежності теплофізичних параметрів охолодження кабелю в полімерній зовнішній оболонці від різниці температур $\Delta\Theta_s$ між поверхнею кабелю і повітрям оточуючого середовища при горизонтальному розташуванні окремо прокладеного кабелю в полімерній зовнішній оболонці діаметром d : складова випрмінювання в коефіцієнті теплопередачі α практично не залежить ні від діаметру кабелю d , ні від $\Delta\Theta_s$ (нижня крива), а сумарний коефіцієнт теплопередачі зростає із збільшенням $\Delta\Theta_s$, але зменшується із збільшенням діаметру кабелю

Задачі та вправи

1. Визначити коефіцієнт теплопередачі конвекцією за (5.15) – (5.17) для кабелю діаметром 0,05 м в діапазоні значень змінної $\Delta\Theta_s$ на рис. 5.6. Побудувати відповідний графік.

2. Визначити коефіцієнт теплопередачі випромінюванням за (5.21) для кабелю діаметром 0,05 м за температур повітря 10 °С і 40 °С в діапазоні значень змінної $\Delta\Theta_s$ на рис. 5.6. Побудувати відповідний графік.

3. Визначити коефіцієнт теплового розсіяння при конвекції за (5.19) як функцію різниці температур $\Delta\Theta_s$ між поверхнею кабелю і віддаленим від кабелю повітряним середовищем в діапазоні значень змінної $\Delta\Theta_s$ на рис. 5.6. Побудувати відповідний графік.

6. СТРОК СЛУЖБИ КАБЕЛЮ

6.1. Загальні положення

Фундаментальними в сучасній теорії надійності є поняття відмови та безвідмовності. Під відмовою розуміють втрату виробом здатності виконувати свої функції впродовж заданого відрізка часу в заданих умовах [2].

Наприклад, відмова ізоляції силового кабелю – це її пробій, подія чітко визначена в часі, а значить, така, для якої може бути зафіксована тривалість безвідмовної роботи.

Практика застосування високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією (ЗПЕ-кабелі), які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки, свідчить про те, що, порівняно з традиційними маслом наповненими кабелями, для ЗПЕ-кабелів характерні суттєві особливості, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації:

Поєднання високої робочої напруженості електричного поля (до 8 кВ/мм і більше) з тривалою підвищеною температурою ізоляції (до 90 °С і більше) зумовлюють застосування тривалих і дорогих випробувань (long-term test) [3], за якими ЗПЕ-кабелі піддають сотням циклів нагріву (кожний по 8 годин) з одночасною дією підвищеної напруги $1,7U_n$; в процесі циклів контролюють всі основні параметри:

- електричні (тангенс кута діелектричних втрат, рівень часткових розрядів);
- теплові (температура в елементах конструкції кабелю і на його поверхні).

В той же час пропускна спроможність силових кабелів визначається виключно розрахунком в номінальних умовах, тобто в стаціонарному режимі навантаження (100 % -ний коефіцієнт навантаження) [3]. Відповідно, номінальний струм I_n , - необмежене тривалий, за якого встановлюється максимальна температура жили при номінальних умовах оточуючого середовища. Практично застосовні розрахункові моделі для визначення I_n включають велику кількість припущень і експериментально визначених оцінок конкретних параметрів моделі. Рекомендація щодо доцільності прямого

експериментального чи опосередкованого визначення значень параметрів моделі для розрахунку допустимого струму конкретних кабелів присутня практично в усіх міжнародних і відповідних національних стандартах серії 60287. Оскільки способи виконання цих рекомендацій не нормовані, а в умовах експлуатації кабель практично ніколи не працює в стаціонарному гранично допустимому режимі, то для перевірки працездатності конкретних кабелів використовують або спеціальні лабораторії, або кабель приймають під гарантії виробника.

Таким чином, проблема перевірки працездатності конкретних високовольтних ЗПЕ-кабелів є однією з найбільш актуальних, загальних для всіх світових виробників цих кабелів, проблем, робота над вирішенням якої триває і зумовлює необхідність створення у виробника відповідних методів і лабораторій.

Ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ використовувати як переважну характеристику надійності технічних об'єктів. Математичний зміст цієї характеристики - ймовірність того, що до заданого моменту t відмов не буде:

$$p(t) = P\{\tau \geq t\}, \quad (6.1)$$

де τ , t - напрацювання до відмови та задане напрацювання.

Відповідно ймовірність відмови $q(t)$ - це ймовірність протилежної події, тобто того, що до заданого моменту відмова відбудеться:

$$q(t) = P\{\tau < t\}. \quad (6.2)$$

Функції $p(t)$ і $q(t)$ є відповідно незростаючою і неспадною функціями.

З (6.2) видно, що ймовірність відмови є функцією розподілу напрацювань на відмову за її визначенням. Відповідно до змісту величини t ця функція розподілу визначена на додатній півосі:

Серед нормативних показників надійності в практиці кабельної техніки використовують так званий параметр потоку відмов $\omega(t)$, який є похідною від функції середнього числа відмов за напрацювання t (функції відновлення).

Статистично параметр потоку відмов оцінюють як кількість відмов в одиницю напрацювання на одиницю обладнання:

$$\omega^*(t) = \Delta n / n \Delta t, \quad (6.3)$$

де Δn – кількість відмов за напрацювання Δt ;
 n – кількість працюючих об'єктів на початку Δt ;
 Δt – відрізок напрацювання.

При застосуванні методів класичної теорії ймовірностей і математичної статистики на її основі завжди виникає запитання про достовірність одержаних оцінок і висновків на їх основі.

Класичні ймовірнісні моделі корисні тим, що дозволяють обробляти і вводити в інформаційне поле великі і різноманітні статистичні масиви даних, але правда і те, що при використанні класичних статистичних моделей є досить значним ризик помилкових оцінок і невірних висновків.

Оцінюючи точність експериментальних результатів необхідно пам'ятати, що реальна похибка вимірювання включає цілий ряд складових, які окремо оцінити неможливо і в практиці склалася вимога статистичної сталості статистичного ансамблю, яка має бути перевірена експериментально.

З цього приводу дотепер точаться дискусії, суть яких при використанні програмного забезпечення розрахунків на сучасних комп'ютерах тільки загострилася, оскільки статистичні оператори інтегрованих пакетів програм, в першу чергу, спираються на методи класичних ймовірнісних моделей.

При їх використанні необхідно чітко усвідомлювати аксіоматику цих моделей, яка з часом розвивалася і суддею був досвід розвитку науки і практики їх застосування. Саме практичним прикладам початкового застосування статистичних операторів інтегрованих пакетів програм при обробленні результатів вимірювань в умовах виробництва присвячений цей лабораторний практикум.

Якщо статистичний ансамбль (отже і саме явище) не відповідає трьом основним елементам класичних ймовірнісних моделей, результати бездоганних комп'ютерних розрахунків можуть в кращому разі не вплинути на висновки; а в гіршому спотворити їх. Тому для запобігання появі грубих помилок при аналізі статистичних ансамблів сучасна концепція статистичного оброблення результатів експерименту має використовувати при обробленні статистичних ансамблів даних

операторами інтегрованих пакетів програм, щонайменше три додаткових вимоги :

1) ансамбль вихідних даних має бути достатньо статистично сталий:

2) для статистичних параметрів всіх складових ансамблю даних мають бути наведені систематичні похибки (*inaccuracy*) і середньоквадратичні відхилення (*imprecision*);

3) статистичні параметри всіх складових ансамблю даних мають бути проаналізовані на відповідність відомим перевіреним залежностям (наприклад, для фізичних спостережень на відповідність законам фізики).

Тим не менше, беззаперечним є те, що через вплив різних зовнішніх факторів, через похибки при вимірюваннях, через вибірковість вимірювань в переважній більшості реальних задач контролю продукції при прийнятті технічних рішень завжди залишається невизначеність (див. рис.6.1).

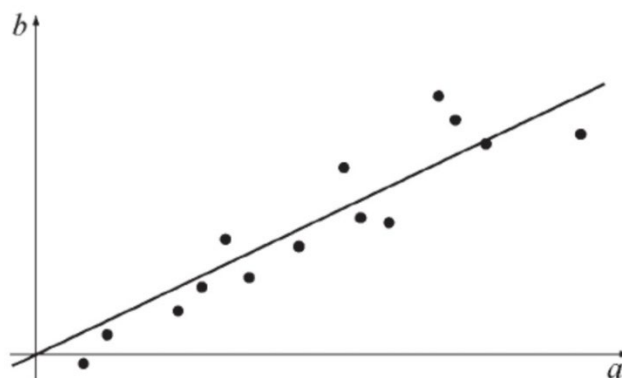


Рисунок 6.1 – Приклад візуальної перевірки придатності для апроксимації експериментальних даних застосування лінійної функції, що проходить через начало координат:

- 1: розсіяння точок відносно прямої зростає – відхилення не є сталим;
- 2: розташування точок не дає підстав для застосування лінійної функції, що проходить через начало координат.

Робота над створенням моделі невизначеності триває переважно в напрямі розроблення інтервальних моделей, які зменшують невизначеність. Ілюстрація застосування інтервальної моделі наведена на рис.6.2.

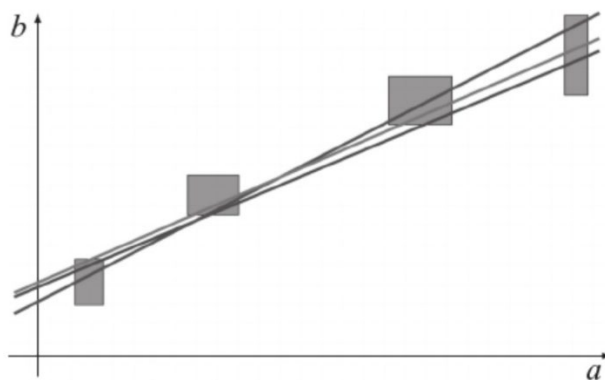


Рисунок 6.2 – Приклад ілюстрації узгодження параметрів лінійної моделі і інтервальних даних вимірювань: замість окремих точок визначено інтервали, кожен з яких включає ряд вимірювань

Наприклад, в системі спостереження за відмовами силових кабелів середньої напруги у США [1] кількість відмов оцінюють для одиниці довжини (100 км) та за один рік. Тобто оцінюють параметр потоку відмов Ω , який використовують і користувачі силових кабелів (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Дані про кількість пробоїв кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією, у свинцевій оболонці, на напругу 5—45 кВ у США[1]

Рік	Загальна довжина, км	Кількість пробоїв за рік		Загальна кількість пробоїв з 1923 року	
		всього	на 100 км	всього	на 100 км
1950	25589	244	0,95	6724	26,28
1951	26071	261	1,00	6985	26,79
1952	26876	245	0,91	7230	26,90
1953	2784,2	260	0,93	7490	26,90
1954	28807	253	0,88	7743	26,88
1955	29612	366	1,24	8109	27,38
1956	30504	319	1,04	8428	27,63
1957	30899	287	0,93	8715	28,20
1958	32090	320	0,99	9035	28,15
1959	32755	330	1,01	9365	28,59
1960	34400	481	1,40	9846	28,62
1961	35441	464	1,31	10310	29,09
1962	36046	542	1,50	10852	30,11
1963	37374	506	1,35	11358	30,39
1964	38677	483	1,25	11841	30,61
1965	39551	455	1,15	12296	31,01
1966	36339	456	1,26	12752	35,09

За цими даними можна оцінити значення параметру потоку відмов за формулою (6.3) для кабелів середньої напруги з паперовою імпрегнованою ізоляцією у свинцевій оболонці впродовж 16 років експлуатації. Результати, представлені на рис. 6. 3. Середній строк служби цих кабелів в експертному середовищі орієнтовно вважається до 30 років.

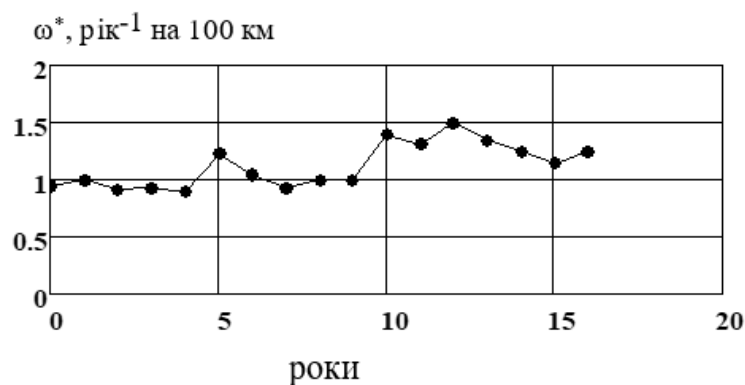


Рисунок 6.3 – Значення параметру потоку відмов за формулою (6.3) для кабелів середньої напруги з паперовою імпрегнованою ізоляцією.

Рис. 6.3 свідчить про очевидну стаціонарність потоку відмов впродовж років. Ці дані і розрахунки на їх основі використані в подальшому для орієнтовної оцінки середнього строку служби традиційних кабелів середньої напруги в експлуатації.

6.2 Роль спостережень за відмовами кабелів середньої напруги в експлуатації

Для традиційних кабелів середньої напруги з паперовою ізоляцією це число протягом десятків років стабільне і дорівнює 1,1–1,2 рік⁻¹ на 100 км кабелю (рис.6.3). Така стабільність величини $\omega^*(t)$ спостерігається досить часто для елементів енергосистем, відповідний потік відмов називають стаціонарним.

Цей підхід, що полягає в оцінюванні параметру потоку відмов для одиниці довжини 100 км за один рік експлуатації є поширеним [1, 2].

Є суттєва розбіжність між даними наведеними в таблиці 6.1 і іншими (див. табл.1 у вступі). Тим не менше, в експертному середовищі орієнтовно вважається середній строк традиційних кабелів середньої

напруги з паперовою ізоляцією близьким до 30 років. На рис. 1.9 було наведено число пробоїв n за рік на 100 км кабелю середньої напруги в експлуатації для кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією (рис.б.3), кабелів з ізоляцією із лінійного поліетилену і кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену. За цими даними період спостережень за відмовами кабелів середньої напруги з твердою полімерною ізоляцією значно менший, ніж для традиційних кабелів.

Очевидно, що надійність кабелів із зшитим поліетиленом вища, ніж для кабелів із термопластичним поліетиленом, однак кількісна оцінка і порівняння параметру потоку відмов щодо кабелів із зшитим поліетиленом і з паперовою імпрегнованою ізоляцією було б передчасним, оскільки час спостережень від вводу в масову експлуатацію для них відрізняється більш ніж на пів століття і кількість прокладених кабелів відрізняється суттєво (в середньому в 5 разів).

До сьогодні для оцінки середнього строку служби силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену накопиченого досвіду недостатньо, тому в разі особливо високих вимог до надійності в екстремальних умовах прокладання (в складних геологічних умовах) використовують кабелі з традиційною паперовою імпрегнованою ізоляцією.

Досвід впровадження відносно інноваційних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену (ЗПЕ-кабелі) свідчить про те, що в типових умовах прокладання ЗПЕ-кабелі широко застосовують, але спостерігається тенденція прокладання їх під гарантії виробника. Відповідно виробники цих кабелів (зокрема високовольтних) використовують так звані кваліфікаційні довготривалі випробування реальних кабелів в умовах гранично допустимих номінальних навантажень.

Таким чином, по-перше, вірогідне оцінювання показників надійності силових кабелів низької та середньої напруги, які є самою масовою кабельною продукцією, потребує постійно діючої системи спостережень за відмовами в експлуатації.

По-друге, роль виробників ЗПЕ-кабелів в забезпеченні їх кваліфікаційних ресурсних випробувань для конкретних конструкцій цих кабелів в сучасних умовах зростання граничних номінальних навантажень (до 90 °C на жилі) різко зростає.

Відомо [2], що для експоненційної функції розподілу $F(t)$ напрацювань до відмови t в разі постійної інтенсивності відмов λ відповідний потік відмов є стаціонарним і параметр потоку відмов дорівнює їх інтенсивності, тобто:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\omega t}. \quad (6.4)$$

Таким чином, за експоненційного закону розподілу напрацювань до відмови, потік відмов є стаціонарним при будь-яких значеннях t , такий потік називають найпростішим.

Відповідно за формулою (6.4), за даними про кількість відмов в експлуатації при стаціонарному потоку відмов (табл.1) і формулою (6.3) оцінка ймовірності безвідмовної роботи впродовж року експлуатації на 100 км кабелю:

$$p^*(1) = \exp[-\lambda^*(1)] = \exp[-\omega^*(1)] = \exp[-n_1/n_0], \quad (6.5)$$

де n_1 – кількість відмов за рік спостережень;

n_0 – кількість працюючих мереж по 100 км на початок року.

Очевидно, що подібні розрахунки є орієнтовними. Тим не менше саме для цього необхідні тривалі спостереження за відмовами кабелів в експлуатації і саме вони дозволяють оцінювати строк служби даного типу кабелів.

6.3 Орієнтовна оцінка показників надійності кабелів середньої напруги

Результати розрахунків за (6.5) з даними табл. 6.1 представлені на рис.6.6 в діапазоні значень параметру потоку відмов на рис.3.

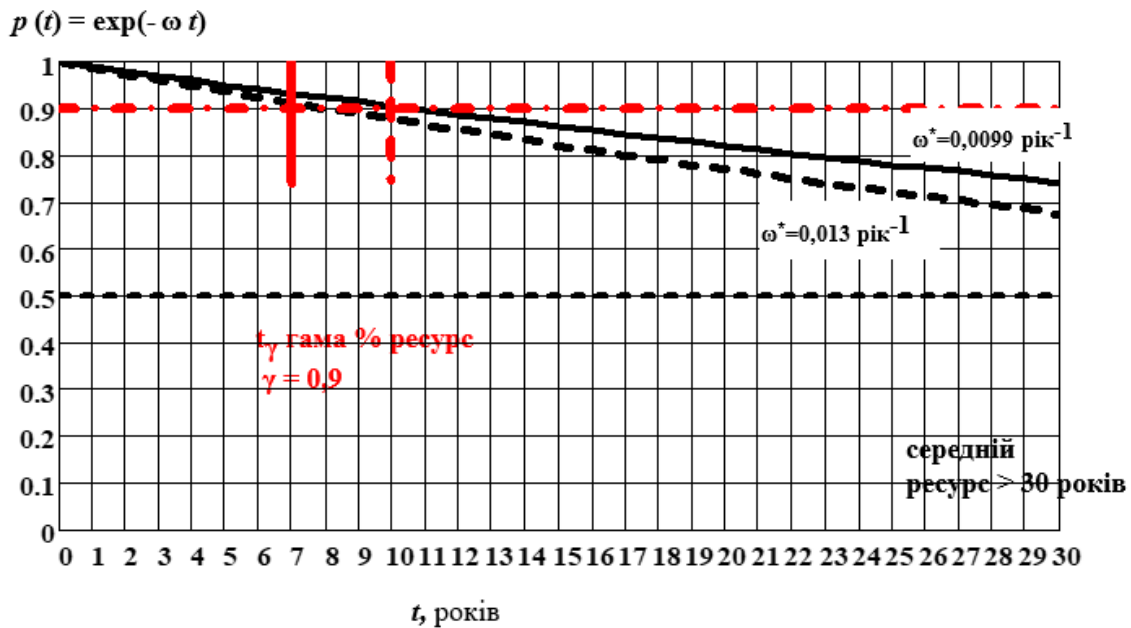


Рисунок 6.4 – Ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ впродовж t років експлуатації для 1 км кабелю в діапазоні значень параметру потоку відмов ω^* , визначених за результатами багаторічних спостережень за відмовами в експлуатації: середній ресурс ($p(t) \approx 0,5$) більший 30 років; гама відсотковий ресурс t_γ ($\gamma = 0,9$) не менше 3 років (червоні вертикальні відрізки)

Перший очевидний висновок з результатів розрахунків представлених на рис.6.6 в діапазоні значень параметру потоку відмов від $0,0099 \text{ рік}^{-1}$ до $0,013 \text{ рік}^{-1}$ на 1 км кабелю:

якщо під середнім ресурсом розуміти напрацювання до значення ймовірності безвідмовної роботи 0,5, то середній ресурс більший 30 років незалежно від значення параметру потоку відмов в діапазоні спостережень впродовж 10 років.

Другий: впродовж терміну експлуатації 30 років ймовірність безвідмовної роботи знаходиться в діапазоні від 0,68 до 0,74 при тобто працездатними є орієнтовно 70 % кабелів.

При цьому необхідно відрізнити поняття середній ресурс (середнє напрацювання до відмови) і середній строк служби (середній строк експлуатації), які не є тотожними.

Якщо врахувати, що строк служби (включає і профілактику, і перерви в навантаженні, і т.ін.) в цілому ймовірно більший за ресурс, а використані дані стосуються саме часу експлуатації, то можна прийти до

висновку, що одержані дані підтверджують відому орієнтовну експертну оцінку середнього строку служби силових кабелів середньої напруги з паперовою імпрегнованою ізоляцією.

В такому разі результати розрахунків представлених на рис.6.6 дозволяють орієнтовно оцінювати рекламацийний потенціал цього типу кабелів залежно від значення параметру потоку відмов.

Наприклад за $\omega = 0,0099 \text{ рік}^{-1}$ гама-відсотковий ресурс при $\gamma = 0,9$ становить 10 років, а за $\omega = 0,013 \text{ рік}^{-1}$ гама-відсотковий ресурс при $\gamma = 0,9$ становить лише 7 років.

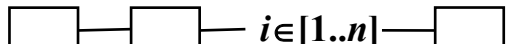
Важливо те, що впродовж першого року експлуатації ймовірність безвідмовної роботи $p^*(1) = \exp[-\omega^*(1)] = 0,98$, тобто лише дві побудовні довжини із сотні ймовірно відмовлять незалежно від значення параметру потоку відмов в даному діапазоні.

Можливість об'єктивної оцінки економічних гарантій виробника є рушійною силою функціонування системи спостережень за відмовами силових кабелів в експлуатації.

6.4 Орієнтовне оцінювання показників надійності кабельних ліній

Головними видами з'єднання елементів у схемах надійності є два: послідовне і паралельне з'єднання.

Послідовним з'єднанням групи елементів в схемах надійності називають таке, коли відмова хоча б одного елемента зумовлює відмову всієї групи. У такому разі для безвідмовності групи необхідно і достатньо щоб були безвідмовними всі її елементи (переріз випадкових подій відсутності відмов). Ймовірність безвідмовної роботи такої групи дорівнює добутковій ймовірностей безвідмовної роботи всіх її елементів:

$$p(t) = \prod_{i \in [1..n]} p_i(t), \quad (6.6)$$


де i, n – відповідно номер елемента в групі та кількість елементів в ній.

З (6.6) випливають дві очевидні і важливі властивості послідовного з'єднання елементів: чим більша кількість елементів у групі, тим менша ймовірність її безвідмовної роботи і якщо напрацювання до відмови елементів розподілені експоненційно

(нормальний період експлуатації), то напрацювання до відмови групи елементів теж розподілені експоненційно.

Приклад. Умовна лінія довжиною 1 км. Оцінити ймовірності відмови $q(1)$, безвідмовної роботи $p(1)$ і кількість відмов n_B впродовж 1 року для кабелів середньої напруги з паперовою ізоляцією довжиною 1 км. Значення параметра потоку відмов на 100 км $\omega = 1,2 \text{ рік}^{-1}$ [1]:

Рішення. За стабільного потоку відмов для напрацювання t ймовірність відмови $q(t)$ описують експоненційним законом $q(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$, в якому значення інтенсивності відмов λ дорівнює параметру потоку відмов ω . Для довжини лінії $L = 1$ км кількість ліній n в мережі 100 км кабелю становить 100. Ймовірність відмови одного довжиною $L = 1$ км:

$$q(t) = 1 - \exp(-\omega t/n),$$

для $t = 1$ рік:

$$q(1) = 1 - \exp(-1,2/100) = 0,012,$$

відповідно ймовірність безвідмовної роботи

$$p(1) = 1 - 0,012 = 0,988.$$

Вартість кабелів для заміни тих, що відмовили в мережі на 100 км
Затр:

$$\text{Затр} = 1000 \text{ у.о./км} \cdot 0,012 \cdot 100 = 1200 \text{ у.о.}$$

(реально від 1000 у.о. до 2000 у.о., оскільки кількість відмов – ціле число).

Відомо, що в кабельних лініях причиною відмов частіше є кабельні муфти, ніж самі кабелі тобто параметру потоку відмов ω є суттєво більшим. Приймемо, що більший вдвічі: параметр потоку відмов муфти $\omega_M = 2\omega$.

Наприклад, в кабельній лінії довжиною 3 км є дві кінцеві муфти і дві з'єднувальні і очевидно, що відмова хоча б одного елемента зумовлює відмову всієї лінії, отже на схемі для розрахунку надійності всі сім елементів з'єднані послідовно (рис.6.5) і формула (6.6) є застосовною до розрахунку ймовірності безвідмовної роботи лінії $p_L(t)$:

$$p_L(t) = \prod p_i(t), i \in [1..7], \quad (6.7)$$

де ймовірність безвідмовної роботи однієї побудовної довжини кабелю (1 км)

$$p_k(1) = \exp(-\omega t/n) = \exp(-1,2 \cdot 1/100) = 0,988,$$

а для трьох побудовних довжин

$$p_{k3}(1) = [p_k(1)]^3 = 0,965.$$

Для чотирьох муфт відповідно:

$$p_{m4}(1) = [p_m(1)]^4 = [\exp(-2\omega t/n)]^4 = 0,908.$$

Для лінії довжиною 3 км з трьох побудовних довжин по 1 км кожна з муфтами (6.7):

$$p_l(1) = p_{k3}(1) \cdot p_{m4}(1) = 0,965 \cdot 0,908 = 0,876; q_l(1) = 0,124;$$

Кількість ліній що відмовили в мережі 100 км за рік:

$$n_l(1) = q_l(1) \cdot 100 / (3+1) = 0,124 \cdot 100 / 4 = 3,091;$$

Вартість для заміни тих, що відмовили в мережі на 100 км, якщо в разі відмови замінюють в двічі дешевшу муфту і один прилеглий до неї кабель Затр:

$$\text{Затр} = 1,5 \cdot 1000 \text{ у.о./км} \cdot 0,124 \cdot 100 / (3+1) = 4,637 \cdot 10^3 \text{ у.о.}$$

(реально від 4000 у.о. до 5000 у.о., тому що кількість відмов – ціле число).

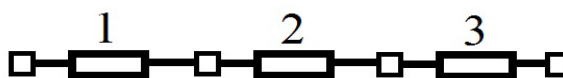


Рисунок 6.5 – Схема лінії довжиною 3 км з муфтами

Задачі та вправи

1. Оцінити ймовірності відмови $q(1)$ і безвідмовної роботи $p(1)$ впродовж 1 року для умовної лінії довжиною L км з кабелю середньої напруги з паперовою ізоляцією і кількість відмов n_B впродовж 1 року в

мережі 100 км таких ліній. Значення параметра потоку відмов на 100 км $\omega = 1,2 \text{ рік}^{-1}[1]$. 1.1 $L = 2$ км. 1.2 $L = 4$ км; 1.3 $L = 5$ км; 1.4 $L = 10$ км.

2. За результатами виконання завдання 1 побудувати графіки залежностей $q(1) = f(L)$; $p(1) = f(L)$; $n_B = f(L)$; проаналізувати залежність цих показників надійності від середньої довжини кабельних ліній в мережі загальною довжиною 100 км кабелів.

3. Запропонувати схему (див. рис. 6.5) для розрахунку показників надійності в мережі кабельних ліній кабелю середньої напруги з паперовою ізоляцією загальною довжиною 100 км з необхідними муфтами (побудовну довжину прийняти 1 км) для лінії довжиною L км:

3.1 $L = 2$ км. 3.2 $L = 4$ км; 3.3 $L = 5$ км; 3.4 $L = 10$ км.

Оцінити ймовірності відмови $q(1)$ і безвідмовної роботи $p(1)$ впродовж 1 року для цих ліній і кількість відмов n_B впродовж 1 року в мережі 100 км таких ліній.

ДОДАТОК 1

Базові характеристики міді і алюмінію

Мідь є найкращим матеріалом для струмопровідних жил силових кабелів. Вона має в звичайних умовах найменший питомий опір (менший лише у срібла), сполучення досить високої механічної міцності з пластичністю, порівняно високу корозійну стійкість. Для виготовлення струмопровідних жил використовують мідь марки не нижче МІ. Деякі властивості м'якої міді наведені в табл. Д.1.1

Для силової електротехніки важливим є те, що під впливом різних факторів характеристики провідника суттєво змінюються і ці зміни можуть спричинити протилежні тенденції ефективності провідника у конкретному пристрої. Так зменшення питомої електропровідності (збільшується виділення тепла в провіднику) внаслідок підвищення температури супроводжується підвищенням теплоємності міді, що підвищує стійкість ізолюваного провідника до короточасних перевантажень.

За зменшення питомої електропровідності (збільшується виділення тепла в провіднику) внаслідок технологічних деформацій кристалічної структури міді суттєво збільшується механічна міцність міді, її твердість (збільшується стійкість до стирання) і пружність.

Таблиця Д1.1 – Характеристики відпаленої стандартної міді за 20 °С

Питомий опір, мкОм · м	0,01724
Температурний коефіцієнт ^a питомого опору, °С ⁻¹	0,0043
Питома теплопровідність, Вт/м · °С	394,3
Питома теплоємність, Дж/кг · °С	385,5
Температура відпалення, °С	500–700
Руйнівна напруга при розтягуванні, МПа	239
Відносне видовження при розриві, %	47,2

Примітка. Середній температурний коефіцієнт питомого опору – визначають за лінійною залежністю питомого опору від температури, допустимою у відносно вузькому діапазоні температур, за яких відбувається експлуатація кабелів.

Основними факторами, що змінюють характеристики міді, є:

1) наявність домішок, які підвищують питомий опір, знижують

пластичність та корозійну стійкість; особливо небажаними є домішки кисню, свинцю, сірки, вісмуту; всього домішок не повинно бути більше 0,1 %, а вміст кисню не повинен перевищувати 0,06 %; серед поширених домішок найбільше знижують електропровідність міді домішки фосфору, кремнію, та заліза, наприклад, кілька тисячних процента фосфору (P) зменшують питому електропровідність міді на 20 % (рис. Д1.1); найбільш шкідливими домішками для механічних параметрів міді є вісмут і свинець, – ці метали майже не змішуються з міддю і утворюють прошарки між кристалами міді; тисячні частки процента вісмуту (Bi) чи соті частки процента свинцю (Pb) роблять мідь ламкою, що є непридатним для кабельної технології; сучасні спектрофотометри дозволяють контролювати вміст домішок за кількома десятками елементів;

2) залишкові деформації, які збільшують питомий опір міді на величину до 3–4 %, різко зменшують пластичність, але збільшують механічну міцність; відповідні властивості міді можуть бути відновлені шляхом рекристалізації при нагріванні вище 200 °С (рис. Д1.2);

3) нагрівання в повітрі при температурі до 200 °С приводить до поступового окиснення міді, а при більших температурах до інтенсивного її окиснення, тому відпалення міді виконують без доступу кисню.

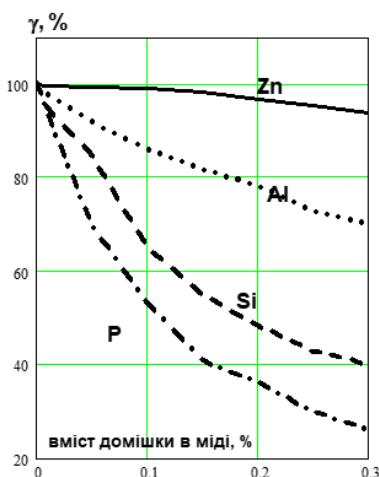


Рисунок Д1.1 – Залежність відносної питомої електропровідності міді від вмісту в ній домішок

Серед домішок, вплив яких на електропровідність міді ілюструє рис. Д1.1, найбільший вплив спричиняє фосфор, а найменший – цинк. Тим не менше, для міді М1 гранично допустимий вміст цих елементів досить близький. Для цинку не більше 0,003 %, а для фосфору не більше 0,002 %. Отже допустимий вміст елементів зумовлений не тільки їх впливом на характеристики провідника, а й реальними можливостями забезпечення чистоти метал: що економічно вигідніше, – забезпечити додаткове очищення міді, чи забезпечити необхідне обмеження електричного опору жили за збільшення площі її перерізу.

На практиці площу перерізу жил кабелю вибирають залежно від двох:

- 1) нагрівання необмежено довгим робочим струмом;
- 2) нагрівання короткочасним струмом короткого замикання (КЗ).

Інші фактори враховують як додаткові, якщо це передбачене технічними умовами. Після вибору перерізів вибирають найближчий стандартний переріз, який задовольняє одночасно вимогам двох основних факторів, тобто забезпечує необхідне обмеження температури кабелю як у робочому режимі, так і в режимі КЗ.

Складний характер деформацій кристалічної структури металу при волочінні відображує відома формула Зібеля для зусилля волочіння P :

$$P = \sigma \cdot F \cdot \left(\ln \mu + \frac{f}{\alpha} \cdot \ln \mu + \frac{2}{3} \alpha \right), \quad (\text{Д1.1})$$

де σ – напруження волочіння; F – площа поперечного перерізу калібруючої зони волокни; μ – витяжка; f – коефіцієнт тертя в робочому конусі волокни; α – півкут робочого конуса волокни.

Формула (Д1.1) відображає три складові механічного напруження, а отже, і деформацій кристалічної структури металу при волочінні:

- одноосьове розтягування центральної частини заготовки;
- напруження зсуву в поверхневому шарі металу;
- об'ємне напруження стискання і зсуву в кільцевій зоні заготовки, що є прилеглою до робочого конуса волокни.

Очевидно, що відновлення кристалічної структури провідника за допомогою відпалення відбувається більш чи менш повно і деяка залишкова деформація цієї структури має місце завжди. Причому за

характером залишкові деформації є суттєво різними в різних місцях провідника.

Тому залишкові деформації кристалічної структури металу, які збільшують його питомий опір, збільшують механічну міцність металу і значно зменшують його пластичність, є неоднорідними по перерізу готового провідника. Така неоднорідність визначається конструкцією виробу, технологією його виготовлення і початковими характеристиками металу, а отже, може бути визначена тільки експериментально, а результати визначення проаналізовані статистично.

При цьому аналіз впливу різних факторів на характеристики металу провідника на його пропускну здатність завжди має на меті пошук економічно прийнятної технічної рішення щодо вибору температурного режиму конструкції, в якій застосовано конкретний провідник.

Тому, крім технічного аналізу, паралельно має виконуватись економічний аналіз відповідно собівартості виробу, залежно від температурного режиму роботи конструкції чи його складових.

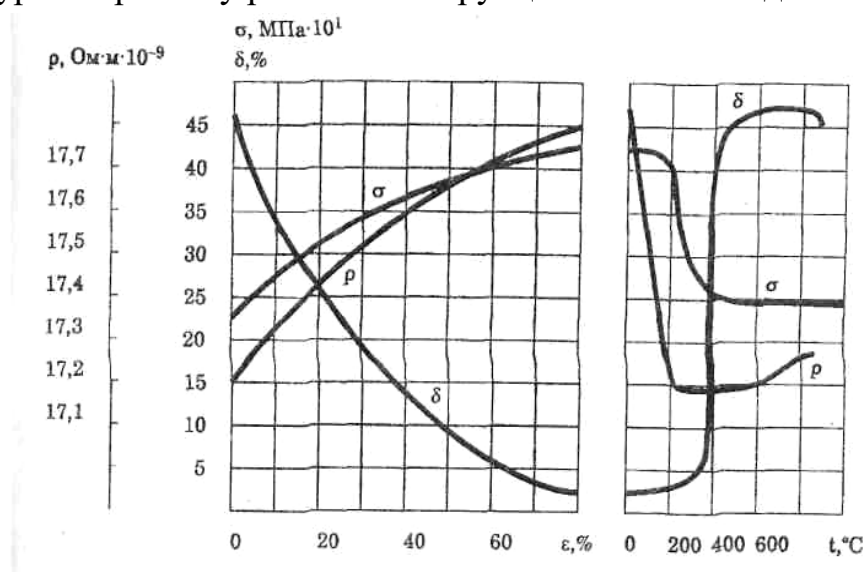


Рисунок Д1.2. – Залежності механічних властивостей та питомого електричного опору провідникової міді марки МІ від деформованості та температури відпалення:

- σ – границя міцності при розриві, яка дорівнює відношенню максимального навантаження перед розривом до площі перерізу зразка;
- δ – відносне видовження при розриві; ρ – питомий електричний опір;
- ϵ – деформація обтиску, відносна зміна площі поперечного перерізу;
- t – температура відпалення

Алюміній у 3,3 рази легший за мідь, але має електропровідність у 1,65 рази меншу. Поступається алюміній і механічною міцністю та пластичністю. Крім того, цей метал має досить високий електрохімічний потенціал і тому для захисту від корозії йому потрібна спеціальна ізоляція, особливо у присутності вологи та при можливості контакту, прямого або опосередкованого, з іншими металами.

Важливою особливістю алюмінію є активне окиснення його поверхні з утворенням тонкої плівки оксиду алюмінію Al_2O_3 , яка має об'ємну густину $3,2 \text{ Мг/м}^3$, тобто суттєво більшу, ніж у самого алюмінію ($2,7 \text{ Мг/м}^3$). Ця плівка запобігає подальшій корозії металу, але має діелектричні властивості, що зумовлює значний перехідний електричний опір у місцях з'єднання алюмінієвих провідників. Крім того, здатність до утворення тонкої плівки оксиду алюмінію зумовлює вплив конструкції багатодротової жили на її електричний опір. І цей вплив суттєво більший, ніж для відповідних мідних струмопровідних жил.

Основними факторами, що змінюють характеристики алюмінію, є:

1) наявність домішок, які підвищують питомий опір, знижують пластичність та корозійну стійкість; так домішка міді у кількості 0,4 % зменшує питому електропровідність алюмінію на 10 %, ще сильніше впливають домішки титану і марганцю; тому особливо небажаними є домішки міді, срібла, магнію, титану і марганцю; всього домішок не повинно бути більше 0,5 %, ще більш чистий алюміній (домішок не повинно бути більше 0,03 %) потрібен для виготовлення алюмінієвої фольги (алюмополімерні захисні покриття);

2) залишкові деформації, які збільшують питомий опір алюмінію на величину до 1–1,5 %, тобто менше ніж міді, але різко зменшують пластичність, яка і без впливу деформацій є меншою; залишкові деформації дещо збільшують механічну міцність алюмінію; відповідні властивості алюмінію можуть бути відновленими шляхом відпалення (рекристалізації) при нагріванні вище $150 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. Д1.3);

Для виготовлення струмопровідних жил застосовують алюміній марки не нижче А5Е, що має 99,5 % алюмінію. Деякі властивості м'якого алюмінію, що застосовується для виготовлення струмопровідних жил, наведені в табл. 2.2. Залишкові деформації, що виникають при холодній

обробці алюмінію порівняно з міддю менше впливають на його питомий електричний опір, який збільшується при цьому на величину до 1,5 %. Однак на механічні властивості алюмінію залишкові деформації впливають суттєво.

Так, руйнівна напруга при розтягуванні збільшується після холодної обробки з (80–90) МПа до (150–250) МПа, а відносне видовження зменшується при цьому з (25–33) % до (5–14) %. Температура початку рекристалізації алюмінію менша, ніж у міді, і знаходиться поблизу 150 °С, тому температура відпалення відповідно менша (рис. Д1.3).

Особливістю алюмінію є його значно більша, ніж у міді теплоємність. Тому для рекристалізації алюмінію потрібно значно більше затрат енергії і часу, ніж для такої ж кількості міді. Тому залишкове нагартування алюмінієвих жил суттєво більше за відповідне для мідних.

Якщо є контакт мідного і алюмінієвого провідників, то в місці контакту виникає гальванічна пара з доволі високою електрорушійною силою, під дією якої алюмінієвий провідник може бути зруйнований корозією. Особливо небезпечним це явище стає при найменшому зволоженні місця контакту.

Таблиця Д1.2. – Характеристики відпаленого стандартного алюмінію за температури 20 °С

Питомий опір, мкОм · м	0,028
Температурний коефіцієнт ^a питомого опору, °С ⁻¹	0,004
Питома теплопровідність, Вт/м · °С	209
Питома теплоємність, Дж/кг · °С	922
Температура відпалення, °С	350–400
Руйнівна напруга при розтягуванні, МПа	90
Відносне видовження при розриві, %	33

Примітка. Середній температурний коефіцієнт питомого опору визначають за лінійною залежністю питомого опору від температури, допустимою у відносно вузькому діапазоні температур, за яких відбувається експлуатація кабелів.

Тому висновок щодо необхідності інтервального визначення електричного опору кабельних провідників є принциповим. При цьому

вихідні параметри сировини для виготовлення струмопровідних жил теж інтервальні (табл. Д1.3).

Таблиця Д1.3 – Базові характеристики кабельних провідників за 20 °С

Характеристика, одиниці вимірювання	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Питомий опір, мкОм·м	0,0179– 0,0182	0,0172–0,0176	0,029–0,030	0,027–0,028
Міцність при розтягуванні, МПа	360–390	239–280	160–170	80–90
Відносне видовження при розриві, %	0,5–2,5	18–48	1,5–2,0	10–35
Температурний коефіцієнт електричного опору, К ⁻¹	3,8 · 10 ⁻³ – 3,84 · 10 ⁻³	3,9 · 10 ⁻³ – 3,95 · 10 ⁻³	4,00 · 10 ⁻³ – 4,01 · 10 ⁻³	4,02 · 10 ⁻³ – 4,04 · 10 ⁻³

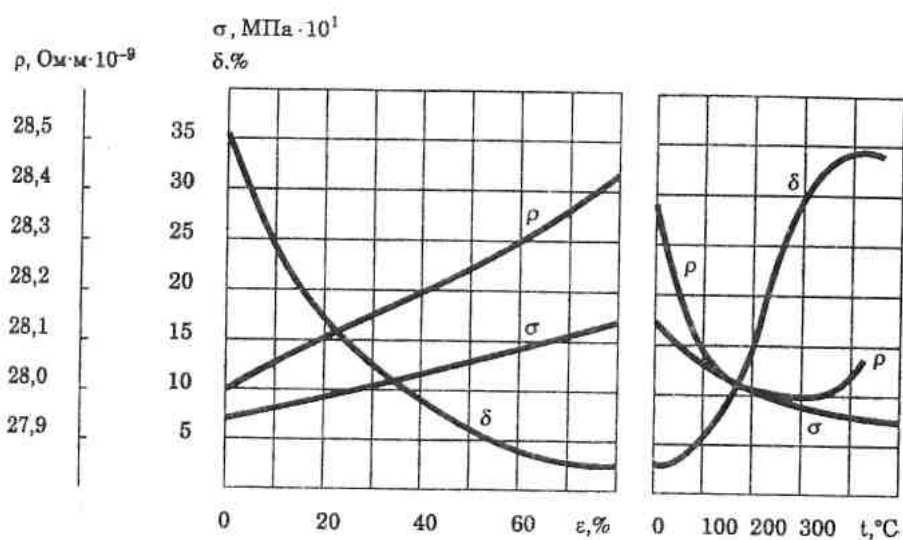


Рисунок Д1.3. – Залежність механічних властивостей і питомого електричного опору алюмінію марки А5Е від технологічної деформації та температури відпалення: σ – границя міцності при розриві; δ – відносне видовження при розриві; ρ – питомий електричний опір; ε – деформація обтиску; t – температура відпалення.

ДОДАТОК 2

Додаткові нормативні моделі

1) за ІЕС 60287-1-1[3]:

Для кабелів змінного струму, прокладених у ґрунті, коли його висихання немає, або кабелів у повітрі допустимий струм навантаження визначений у розділі 1.

Допустимий номінальний струм кабелю постійного струму до 5 кВ обчислюють за допомогою такої спрощеної, порівняно до змінного струму, формули:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R' \cdot T_1 + nR' \cdot T_2 + nR' \cdot (T_3 + T_4)} \right]^{0.5}, \quad (\text{Д2.1})$$

де R' – опір постійному струму на одиницю довжини жили за максимальної робочої температури (Ом/м).

Якщо кабель прокладений у землі за часткового висихання навколишнього ґрунту, то для кабелю змінного струму застосовують метод, який базується на поданні фізичної моделі ґрунту у вигляді двох зон: сухої зони, прилеглої до кабелю, і другої зони, що зберігає сталий тепловий опір, границя зони є ізотермою.

Змінення зовнішнього теплового опору, внаслідок утворення сухої зони навколо одиночного ізольованого кабелю чи лінії, може бути враховано за допомогою такої формули:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + vT_4)] + (v-1)\Delta\theta_x}{R \cdot [T_1 + n \cdot (1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + vT_4)]} \right]^{0.5}, \quad (\text{Д2.2})$$

де v – відношення питомих теплових опорів сухої і вологої зон ($v = \rho_d / \rho_w$); R – опір провідника змінному струму за максимальної робочої температури (Ом/м); ρ_d – питомий тепловий опір сухого ґрунту (К · м/Вт); ρ_w – питомий тепловий опір вологого ґрунту (К · м/Вт); θ_x – критична температура ґрунту, температура границі між зонами (°С); θ_a – температура оточуючого середовища (°С); $\Delta\theta_x$ – критичне перевищення температури ґрунту. Це перевищення температури на границі між зонами

над температурою навколишнього ґрунту ($\theta_x - \theta_a$); θ_x і ρ_d мають бути визначені з інформації про стан ґрунту.

Коли міграції вологи вдається уникнути за допомогою обмеження перевищення температури поверхні кабелю не більше ніж $\Delta\theta_x$, відповідно номінальний струм має бути визначений за формулою:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x + nW_d \cdot T_4}{nRT_4 (1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5}. \quad (\text{Д2.3})$$

Однак залежно від величини $\Delta\theta_x$ це може дати результат, за якого температура жили перевищує максимально допустиму величину. За номінальний струм має бути прийнято меншу з двох визначених величин. За цих же умов для кабелю постійного струму до 5 кВ допустимий номінальний струм обчислюють за допомогою такої спрощеної, порівняно до змінного струму, формули:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta + (v-1)\Delta\theta_x}{R' \cdot [T_1 + nT_2 + n \cdot (T_3 + vT_4)]} \right]^{-0,5}, \quad (\text{Д2.4})$$

де R' – опір постійному струму жили за максимальної робочої температури (Ом/м).

2) за ІЕС 60287-3-3 [9]

Якщо зовнішнє джерело тепла перетинає лінію розрахункового кабелю, перевищення температури є найбільшим в місці перетину і зменшується з віддаленням від місця перетину. Відстань від перетину вздовж кабельної лінії, на якій повздовжнім тепловим потоком нехтують, позначена z_{\max} .

Джерело тепла може бути розташовано вище чи нижче розрахункового кабелю з кутом перетину в межах від паралельного розташування до перпендикулярного. Приклад такого розташування наведено на рисунку Д2.1. Як наслідок, перевищення температури змінюється вздовж кабелю, що спричиняє повздовжній тепловий потік у провіднику, який зумовлює зменшення температури провідника в місці перетину порівняно з випадком, коли цей повздовжній потік ігнорують.

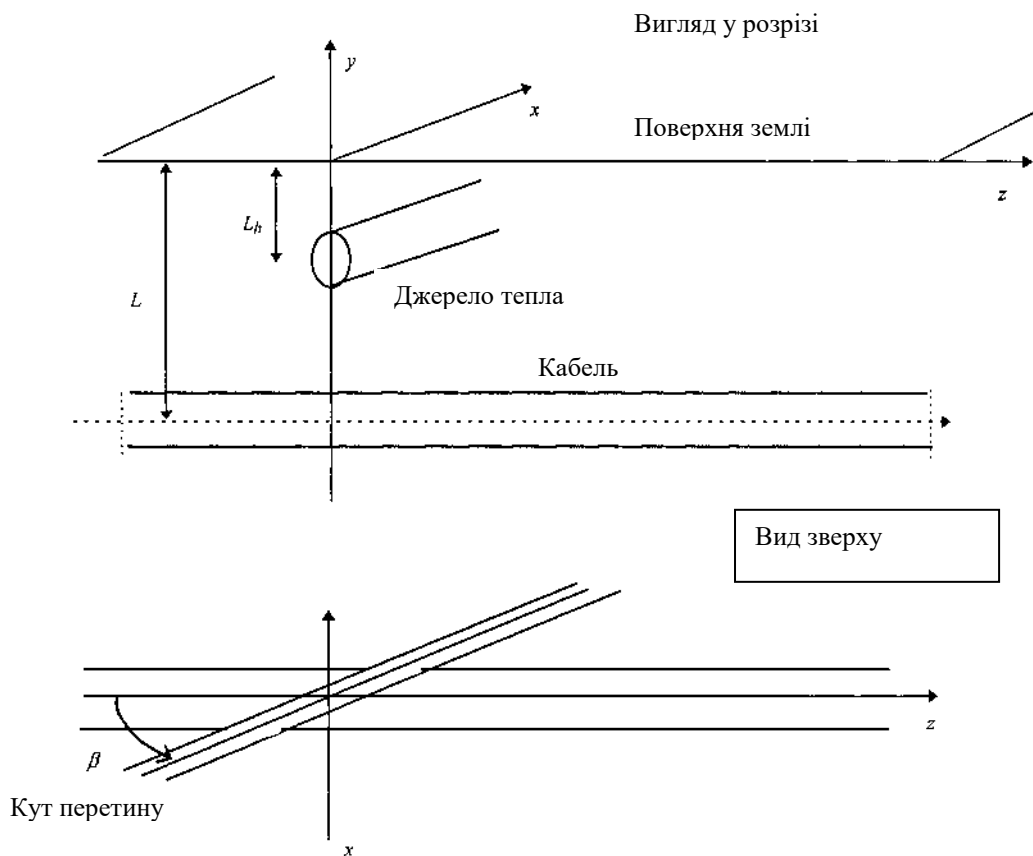


Рисунок Д2.1 – Ілюстрація перетину джерела тепла і розрахункового кабелю

Максимальний допустимий струм кабелю, який є номінальним, з огляду на вплив джерела тепла, що перетинає цей кабель, отримують множенням номінального, встановленого без джерела тепла, на коефіцієнт зменшення DF , визначений нагріванням від джерела тепла:

$$DF = \sqrt{1 - \frac{\Delta\theta(0)}{\Delta\theta_{\max} - \Delta\theta_d}}, \quad (Д2.5)$$

де $\Delta\theta(0)$ перевищення температури провідника, спричинене джерелом тепла в місці перетину з кабелем.

Коефіцієнт зменшення, формула (Д2.5) має узагальнити вплив окремих джерел тепла, що перетинають розрахунковий кабель, за допомогою принципу суперпозиції. Для цього приймають точку $z = 0$ в місці, де температура розрахункового кабелю є максимальною.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / В. П. Карпушенко, Л. А. Щебенюк, Ю. О. Антонєць, О. А. Науменко. – Х. : Регіон-інформ, 2000. – 376 с.
2. Л.А.Щебенюк, О.В.Голик. Математичні основи надійності ізоляції електрообладнання. Навчально-методичний посібник – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005- 102с.
3. IEC 60287-1-1 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1–1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General.
4. Конструкции и Электрическое поле кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена: уч. пособие / В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко и др. – Х: Майдан, 2014. – 188 с.
5. IEC 60287-2-1 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2–1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance.
6. IEC 60287-3-1: 1999 Electric cables – Calculation of the current rating- Part 3–1: Sections on operating conditions – Reference operating conditions and selection of cable type
7. IEC 60287-3-2:1996 + Am 1:1996 Electric cables - Calculation of the current rating - Part3: Sections on operating conditions -Section 2: Economic optimization of power cable size
8. Обчислення у MATHCAD: Навчальний посібник / В.О. Коцаренко, Ю.Ф. Селіхов. – Харків.: «Підручник НТУ «ХПІ», 2011. – 192 с.
9. IEC 60287-3-3: Electric cables – Calculation of the current rating- Part 3-3: Розділи щодо умов експлуатації. Кабелі, що перетинають зовнішні джерела тепла.
10. Випробування для визначення механічних властивостей кабельних провідників. Методичні вказівки до лабораторних робіт за курсом «Кабельна техніка»/ [Уклад. В.М. Золотарьов, О.В. Голик]. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 22 с.
11. Випробування для визначення механічних властивостей кабельних пластмас. Методичні вказівки до лабораторних робіт за курсом «Кабельна техніка»/ [Уклад. В.М. Золотарьов, О.В. Голик]. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 22 с.
12. IEC 60840 –Ed.3.0. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated Voltage above 30 kV – Test methods and requirements. – 2004.

13. CIGRE Technical 303: Revision of qualification procedures for high voltage and extra high voltage AC extruded underground cable systems. CIGRE Working Group B1-06; 2006.

14. M. Bostrom. PP insulation technology for MV, HV, EHV cables. Maillefer Group, Finland // The scientific and technical symposium. – Belgrade, Serbia, November 16–17, 2021. URL: <https://www.interkabel.com> (access date: 20.12.2021).

15. IEC 62067 – Ed.1.1. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated Voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements. – 2006.

16. HD 632 S1:1998 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ($U_m = 42$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) Part 2: Additional test methods.

17. Гонтар Ю. Г. Метод контролю струмових перевантажень в силових кабелях середньої напруги [Електронний ресурс] : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.13 : галузь знань 15 / Юлія Григорівна Гонтар ; наук. керівник Гурін А. Г. ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2021. – 141 с. – Бібліогр.: с. 122-133. – укр.

18. Л.А. Щепенюк, Т.Ю. Антоненць . До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. // Вістник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип.42.– С. 43 – 46.

19. <http://library.khpi.kharkov.ua/>

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. РОЗРАХУНОК НОМІНАЛЬНОГО СТРУМУ	15
1.1. Номінальний струм силового кабелю.....	15
1.2. Модель радіального теплового потоку.....	17
1.3 Модель стаціонарного теплового балансу	19
1.4 Використання нормативних моделей	28
1.5 Основні параметричні моделі.....	32
1.6 Визначення параметрів системи рівнянь	40
2. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ НАВАНТАЖУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ	46
2.1. Електричний опір струмопровідних жил	46
2.1.1. Загальні положення	46
2.1.2. Фактори впливу на електричний опір кабельних провідників	46
2.1.3 Основні розрахункові моделі	57
2.2. Втрати в елементах конструкції кабелю	71
2.2.1. Загальні положення	71
2.2.2. Втрати в металевих елементах без феромагнітних впливів...75	
3. ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ	85
3.1. Нестационарні режими навантаження.....	85
3.2. Метод зосереджених теплоємностей.....	89
3.3. Динаміка нагрівання високовольтних кабелів із пластмасовою ізоляцією	93
3.4. Експериментальне визначення кривих нагрівання	95
3.4.1. Дослідний зразок	95
3.4.2. Проведення випробування.....	96
3.4.3. Визначення перевищення температури елемента конструкції кабелю над температурою оточуючого середовища.....	97
3.4.4. Визначення максимального перевищення температури жил кабелю над температурою оточуючого середовища.....	98
3.4.5. Визначення постійної нагрівання кабелю	99
4. ВТРАТИ В ІЗОЛЯЦІЇ	101

4.1. Загальне.....	101
4.2 Основна модель.....	102
4.3 Втрати в системі ізоляції ЗПЕ-кабелю	104
4.4 Висновки.....	108
5. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО ОПОРУ.....	112
5.1. Тепловий опір радіальному тепловому потоку	112
5.2. Тепловий опір не радіальному тепловому потоку	115
5.3. Тепловий опір довкілля.....	120
5.3.1. Кабелі, прокладені в землі	120
5.3.2. Кабелі, прокладені в повітрі	123
5.3.3. Кабелі, прокладені в кабельних спорудах.....	127
5.3.4. Особливості охолодження ЗПЕ-кабелів у повітрі.....	129
6. СТРОК СЛУЖБИ КАБЕЛЮ	135
6.1. Загальні положення	135
6.2 Роль спостережень за відмовами кабелів середньої напруги в експлуатації	140
6.3 Орієнтовна оцінка показників надійності кабелів середньої напруги.....	142
6.4 Орієнтовне оцінювання показників надійності кабельних ліній.....	144
ДОДАТОК 1	148
ДОДАТОК 2	155
ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ.....	158

Навчальне видання

Навчально-методичний посібник для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка» / Кессаєв О.Г., О.В. Голик, Ю.Г. Гонтар, Щебенюк Л.А. – Х. : НТУ «ХП», 2024. – 162 с.

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ

Відповідальний за випуск Кессаєв О.Г.
Роботу до видання рекомендував Безпрозванних Г.В.

В авторській редакції
План 2024 р., поз. 13

Підп. до друку Формат 60x84 1/16.
Папір офсет. Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 8,0.
Обл.вид. арк.
Наклад 50 прим. Замовлення №

Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія