

Гонтар Юлія Григорівна, майстер виробн. навч. кафедри Електроізоляційної та кабельної техніки;
Тел. (+38)066-795-58-65; E-mail: gontar.yuliya@gmail.com

Щебенюк Леся Артемівна, канд. техн. наук, професор;
Тел. (+38)066-815-99-49; E-mail: Lesia.Shchebeniuk@khpri.edu.ua

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 21, Харків, Україна, 61002

Антонєць Станіслав Юрійович, канд. техн. наук;
Тел. (+38)050-083-02-86; E-mail: antonets.uves@yuzhcable.com.ua

ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», вул. Автогенна, 7, Харків, Україна, 61099

ТЕПЛОФІЗИЧНІ АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ІЗ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ В СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

***Анотація.** У даний час тенденції розвитку світових кабельних мереж середньої напруги спрямовані на впровадження кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Такі кабелі мають підвищену робочу температуру, що дозволяє збільшити їхню пропускну здатність, та підвищену стійкість при роботі в умовах перевантажень і коротких замикань. Визначити допустимі теплові та електричні навантаження можливо лише за умови дотримання теплового балансу. Принципово важливою для вирішення задач теплового балансу є суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури. Встановлено, що пропускна спроможність кабелю, визначена за нормативними моделями і середніми параметрами оточуючого середовища, надає лише попередню інформацію про його нагрівання. Для певних вимог і для інноваційних конструкцій кабелю необхідною умовою для визначення навантажувальної здатності в реальних стаціонарних режимах експлуатації є використання моделі теплового балансу. Запропоновано систему математичних рівнянь, яка за рахунок поєднання конструктивних і теплофізичних параметрів кабелю з умовами зовнішнього середовища дозволяє визначити параметри стаціонарного теплового режиму кабелю за будь якого струму навантаження.*

***Ключові слова:** силовий кабель середньої напруги, ізоляція із зшитого поліетилену, пропускна здатність, модель теплового балансу, допустимий струм, теплофізичні параметри.*

Гонтарь Юлия Григорьевна, мастер произв. обучения кафедры электроизоляционной и кабельной техники,

Тел. (+38)066-795-58-65; E-mail: gontar.yuliya@gmail.com

Щебенюк Леся Артемовна, канд. техн. наук, профессор кафедры электроизоляционной и кабельной техники,;
Тел. (+38)066-815-99-49; E-mail: Lesia.Shchebeniuk@khpri.edu.ua

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 21, Харьков, Украина, 61002

Антонєць Станіслав Юрьевич, канд. тех. наук,
Тел. (+38)050-083-02-86; E-mail: antonets.uves@yuzhcable.com.ua

ПАО «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ», ул. Автогенная, 7, Харьков, Украина, 61099

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

***Аннотация.** В настоящее время тенденции развития мировых кабельных сетей среднего напряжения направлены на внедрение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Такие кабели имеют повышенную рабочую температуру, что позволяет увеличить их пропускную способность, и повышенную устойчивость при работе в условиях перегрузок и коротких замыканий. Определить допустимые тепловые и электрические нагрузки возможно только при условии соблюдения теплового баланса. Принципиально важной для решения задач теплового баланса является существенная зависимость теплопроводности и теплоемкости полиэтиленовой изоляции от температуры. Установлено, что пропускная способность кабеля, определяемая нормативными моделями и средними параметрами окружающей среды, дает лишь предварительную информацию о его нагреве. Для определенных требований и для инновационных*

конструкцій кабеля необхідним умовою для визначення навантажувальної спроможності в реальних стаціонарних режимах експлуатації є використання моделі теплового балансу.

Предложена система математических уравнений, которая за счет сочетания конструктивных и теплофизических параметров кабеля с условиями внешней среды позволяет определять параметры стационарного теплового режима кабеля при любом токе нагрузки.

Ключевые слова: силовой кабель среднего напряжения, изоляция из сшитого полиэтилена, пропускная способность, модель теплового баланса, допустимый ток, теплофизические параметры.

Gontar Yuliya, Master of Production, Department of Electrical Insulation and Cable Engineering,
Tel. (+38) 066-795-58-65; Email: gontar.yuliya@gmail.com

Shchebenyuk Lesya, Ph. D. (Tech.), Professor Department of Electrical Insulation and Cable Engineering,;
Tel. (+38)066-815-99-49; Email: Lesia.Shchebeniuk@khpі.edu.ua

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», st. Kirpychova, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002

Antonets Stanislav, Ph. D. (Tech.), tel. (+38) 050-083-02-86; Email: antonets.uves@yuzhcable.com.ua

PJSC «PIVDENKABEL PLANT», Avtogenneya str. 7, Kharkov, 61099, Ukraine

THERMAL PHYSICAL ASPECTS OF DETERMINATION OF LOAD CAPACITY MEDIUM VOLTAGE POWER CABLES WITH CROSS-POLYETHYLENE INSULATION IN STATIONARY OPERATING MODES

Annotation. Currently, the development trends of global medium voltage cable networks are aimed at the introduction of cables with cross-linked polyethylene insulation. Such cables have a higher operating temperature, which allows to increase their throughput, and increased stability when working in conditions of overload and short circuits. It is possible to determine the allowable heat and electrical loads only if the heat balance is observed. Fundamentally important for solving the problems of heat balance is the significant dependence of thermal conductivity and heat capacity of polyethylene insulation on temperature. It is established that the capacity of the cable, determined by regulatory models and average environmental parameters, provides only preliminary information about its heating. For certain requirements and for innovative cable designs, a necessary condition for determining the load capacity in real stationary modes of operation is the use of the heat balance model. A system of mathematical equations is proposed, which due to the combination of structural and thermophysical parameters of the cable with the conditions of the external environment allows to determine the parameters of the stationary thermal regime of the cable at any load current.

Keywords: medium voltage power cable, cross-linked polyethylene insulation, throughput, heat balance model, allowable current, thermophysical parameters.

Постановка проблеми. Тенденції розвитку кабельних мереж середньої напруги протягом останніх років спрямовані на впровадження кабелів з теплостійкою екструдованою ізоляцією XLPE (зшитий поліетилен, ЗПЕ-кабелі) і заміну ними силового кабелю з паперовою просоченою ізоляцією. В промислово розвинених країнах Європи і Америки практично весь ринок силових кабелів займає високовольтний кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену XLPE [1]. Такі кабелі у порівнянні з кабелями з паперовою просоченою ізоляцією мають низку переваг, серед яких: підвищена робоча температура, що дозволяє збільшити пропускну здатність; можливість прокладки на трасах з необмеженою різницею рівнів; спрощений монтаж та експлуатація (через відсутність масла, бітуму, свинцю); вища надійність експлуатації та менші витрати на реконструкцію та утримання кабельних ліній; підвищена стійкість при роботі в умовах перевантажень і коротких замикань.

Основою технічних рішень в стаціонарних, перехідних і аварійних режимах роботи електроізоляційних пристроїв і систем є вимога дотримання теплового балансу. Ключовим параметром для застосування моделі теплового балансу є струм в жилі кабелю, а для визначення пропускну здатності – необмежено тривалий допустимий (номінальний I_n) струм. Застосування такої моделі дозволяє визначити навантажувальну здатність кабелю в реальних стаціонарних режимах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з фундаментальних моделей електроізоляційної і кабельної техніки є модель енергетичного балансу, в першу чергу,

теплого: гранично допустима потужність тепловиділення обмежена потужністю, що може бути відведена в оточуюче середовище. Вимога дотримання такого балансу є основою прийняття технічних рішень. За допомогою моделей теплового балансу визначають як допустимі теплові, так і електричні навантаження. Принципово важливою для вирішення задач теплового балансу є суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури. Наприклад, питома теплоємність поліетилену при температурі 20 °С дорівнює 2300 Дж/кг · °С, а при 80 °С 3750 Дж/кг · °С. Тобто в різних режимах експлуатації теплофізичні параметри ізоляції різні, а в нестационарних режимах змінюються у часі. Застосування нормованих методів визначення пропускної здатності для ЗПЕ-кабелів в режимах реальної експлуатації вимагає не тільки експериментальної, а й розрахункової перевірки. Для застосування моделі теплового балансу мають бути визначені три основні складові: потужність тепловиділення; потужність теплового потоку, який може бути переданий в конструкції кабелю; потужність теплового потоку, який може бути переданий з поверхні кабелю в оточуюче середовище. Всі ці складові є взаємопов'язаними і по суті є системою математичних моделей, яка спрямована на визначення тривало допустимого струму I_n .

Мета дослідження. Визначити стаціонарні струмові навантаження при експлуатації силових кабелів середньої напруги з ізоляцією із зшитого поліетилену з урахуванням теплофізичних аспектів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Тепловий потік від поверхні кабелю до оточуючого середовища не є ні симетричним, ні стабільним в часі чи в просторі. Він включає процеси теплопередачі через теплопровідність (міжмолекулярний процес передачі тепла), конвективний теплообмін (перемішування часток речовини з різною температурою в просторі), випромінювання (передача електромагнітної енергії від більш нагрітого тіла). За даними [5] для кабелів відносно великого діаметру коефіцієнт теплопередачі α з поверхні горизонтально розташованого кабелю в повітрі визначається як конвекцією, так і випромінюванням. Значення α нелінійно залежить від різниці температур поверхні кабелю і довкілля Θ_s , і тому не може використовуватися в теплових розрахунках кабелю як незмінний параметр. Це підтверджує, що для визначення коефіцієнту теплопередачі α з поверхні ЗПЕ-кабелів у повітрі є застосовними рекомендації відповідних міжнародних стандартів саме у вигляді емпіричних графічних залежностей ключових теплофізичних параметрів від конкретних умов прокладання кабелю в умовах конвективного охолодження [10].

Розрахунок потужності тепловиділення кабелю, що складається з втрат в жилі, діелектричних втрат та електромагнітних втрат в металевих захисних елементах конструкції визначений нормативною міжнародною документацією для широкого спектру конкретних конструкцій силових кабелів [4]. При використанні [4] для ЗПЕ-кабелю, ізоляція яких є неполярною, діелектричними втратами за промислової частоти (десяті долі Вт/м) можна знехтувати порівняно із втратами в жилі (кілька сотень Вт/м). Відтак потужність тепловиділення кабелю P_k є сумою втрат в жилі P_g і в металевих елементах конструкції, серед яких обов'язковим є мідний екран, втрати в якому пропорційні втратам в жилі, оскільки за своєю природою є індукційними втратами:

$$P_k = P_g + P_e = I^2 R_g(\Theta_g) + I^2 R_g(\Theta_g) k_e, \quad (1)$$

де k_e – коефіцієнт взаємоіндукції між жилою та екраном,

$$k_e = \frac{P_e}{P_g} = \omega^2 \cdot M^2 \cdot R_e / (R_e^2 + \omega^2 \cdot M^2) R_g;$$

ω – кругова частота;

R_e – електричний опір мідного екрану за температури екрану в даному режимі навантаження.

$R_g(\Theta_g)$ – електричний опір жили за температури жили в даному стаціонарному режимі навантаження.

Розрахунок потужності теплового потоку, який може бути переданий від кабелю до оточуючого середовища традиційно виконують за аналогією процесів переносу зарядів і процесу переносу тепла. Оскільки потенціал залежить тільки від радіусу лише за умови необмежено довгого кабелю, а речовина, в якій відбувається процес переносу в тій чи іншій мірі є неоднорідною, ця традиційна модель зумовлює похибку тим меншу, чим вищезазнані умови ближчі до реальності.

Для розрахунку потужності теплового потоку, який може бути переданий від кабелю до оточуючого середовища є застосовними методи розрахунку електричних ланцюгів. Якщо елементи конструкції кабелю – це послідовно нанесені радіальні шари різних матеріалів, а границі між ними є ізотермами, то різниця температур τ_i (різниця потенціалів) на i -тому елементі конструкції дорівнює добутку потужності теплового потоку P_i через цей елемент на його тепловий опір S_i : $\tau_i = P_i \cdot S_i$, а сума різниць температур на всіх коаксіальних елементах конструкції є різницею температур між жилою Θ_g і поверхнею кабелю Θ_s :

$$\Theta_g - \Theta_s = \sum_{i=1}^n P_i \cdot S_i . \quad (2)$$

Якщо в кабелі є кілька джерел тепла, то потужності теплового потоку через елементи конструкції можуть бути різними. В ЗПЕ-кабелях, щонайменше, є два джерела тепла: жила і мідний екран, тому через елементи конструкції, розташовані поверх металевго екрану, протікає сума двох потужностей:

$$\Theta_g - \Theta_s = P_g \sum_{i=1}^m S_i + (P_e + P_g) \cdot \sum_{i=m+1}^n S_i ; \quad (3)$$

де m – кількість коаксіальних елементів конструкції кабелю, розташованих між жилою і мідним екраном;

n – загальна кількість коаксіальних елементів конструкції кабелю.

Формула (3) визначає різницю температур між жилою Θ_g і поверхнею кабелю Θ_s для конструкцій ЗПЕ-кабелю без металевої герметизуючої оболонки і металевої броні. Оскільки експериментальне визначення температури поверхні кабелю є достатньо реальною технічною процедурою в умовах виробництва, до того ж неруйнівною, вона може бути використана в цих умовах для експрес-контролю потужності теплового потоку, який може бути переданий через конструкцію кабелю в різних стаціонарних режимах навантаження.

За проведення такого контролю в нормованих умовах він може слугувати надійному порівняльному оцінюванню навантажувальної здатності різних конструктивних рішень для ЗПЕ-кабелів. Для цього достатньо до такого експерименту додати спільне рішення рівнянь (1) і (2) відносно двох змінних I , Θ_g :

$$\begin{cases} P_k = P_g + P_e = I^2 R_g(\theta_g) + I^2 R_g(\theta_g) k_e; \\ \theta_g - \theta_s = P_g \sum_{i=1}^m S_i + (P_e + P_g) \cdot \sum_{i=m+1}^n S_i. \end{cases} \quad (4)$$

Процес теплопередачі від поверхні кабелю в оточуюче середовище є складним і багатовимірним. Традиційно для спрощення задачі цей процес розділяють на елементарні, а саме на теплопровідність, випромінювання і конвекцію. Відповідно до двох основних процесів охолодження кабелю в повітрі, – конвективного теплообміну і випромінювання, α може бути представлено сумою:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_v, \quad (5)$$

де α_v – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням;

α_k – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, інтенсивність якої характеризує спеціальний критерій Нуссельта Nu .

В практичних задачах складні процеси теплопередачі вважається за доцільне розглядати як одне ціле [3] і використовувати так званий коефіцієнт теплопередачі з поверхні твердого тіла α , Вт/°С·м², а тепловий опір повітряного середовища S_{oc} визначати формулою:

$$S_{oc} = (\pi \cdot d \cdot \alpha)^{-1}, \quad (6)$$

де рекомендується приймати $\alpha = 10$ [6] за відсутності іншої інформації або визначати його для конкретних умов за теплофізичними критеріями подібності:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda/d, \quad (7)$$

d – діаметр циліндричного горизонтально розташованого твердого тіла,

λ – питома теплопровідність повітря, $\lambda=0,025$ Вт/(м·К),

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 [2]:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda/d = C_1 (Gr \cdot Pr)^m \cdot \lambda/d \quad (8)$$

$$Gr = \beta \cdot \Delta\theta_s \cdot d^3 \cdot g/v^2; \quad (9)$$

$$Pr = v c/\lambda \quad (10)$$

де β – температурний коефіцієнт об’ємного розширення повітря, $\beta=1/T_{cp}$, K^{-1} , де T_{cp} – середня абсолютна температура повітря ;

$\Delta\Theta_s$ – різниця температур поверхні кабелю Θ_s і довкілля Θ_{oc} : $\Delta\Theta_s = \Theta_s - \Theta_{oc}$,

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

ν – кінематична в’язкість повітря, $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

c – питома теплоємність повітря, $c = 1,01 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

C_1, m – параметри критерію Нуссельта (8), 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 $C_1 = 0,54$; $m = 0,25$ [2].

За (8) і (9) критерій Нуссельта є пропорційним $\Delta\Theta_s^m$ і для даного d коефіцієнт пропорційності h_k визначений відомими фізичними параметрами і середньою температурою оточуючого повітря ($\beta=1/T_{cp}$). Параметр h_k є основою визначення навантажувальної здатності силових кабелів у повітрі. За стандартом міжнародної електротехнічної комісії [10] тепловий опір оточуючого вільного повітря S_{oc} за умови відсутності нагрівання кабелю прямим сонячним випромінюванням визначено формулою:

$$S_{oc} = (\pi d h_k \cdot \Delta\Theta^{1/4})^{-1}, \quad (11)$$

де h_k і $\Delta\Theta$ рекомендовано знаходити складними ітераційними розрахунками на основі емпіричних параметрів або з відповідних наведених у додатках номограм.

Якщо вирази за (8), (9), (10) для теплофізичних критеріїв підставити у (7) і прирівняти праві частини формул (11) і (6), то одержимо вираз,

$$h_k = C_1 (\beta \cdot d^3 \cdot g \nu^{-1} c \lambda^{-1})^m \cdot \lambda / d = \left(\frac{cp \cdot d^3 \cdot g \cdot \nu^{-1} \cdot \lambda^{-1}}{273 + \Theta_{oc} + \Delta\Theta_s / 2} \right)^m \cdot \frac{\lambda \cdot c_1}{d} \quad (12)$$

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 α_b [3]:

$$\alpha_b = \varphi \cdot \varepsilon_0 \cdot C_0 (T_{\Pi}^4 - T_{oc}^4) (T_{\Pi} - T_{oc}) \quad (13)$$

де C_0 – постійна Стефана-Больцмана), $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

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_{Π}, T_{oc} – абсолютні температури поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища.

Оскільки α_k і α_b є функціями різниці температур поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища, позначеної в (9) як $\Delta\Theta_s$ зручно для подальших розрахунків записати формулу (13) як функцію $\Delta\Theta_s$:

$$\alpha_B = \varepsilon_1 \cdot C_0 \cdot \Delta\theta_s^{-1} \cdot [(\theta_{oc} + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_{oc} + 273)^4] \quad (14)$$

де θ_{oc} – температура оточуючого середовища в °С.

Відповідно коефіцієнт теплового розсіяння при випромінюванні h_B (Вт/м²·К^{5/4}), який є основою визначення навантажувальної здатності силових кабелів у повітрі за стандартом міжнародної електротехнічної комісії [10] запишеться як функція $\Delta\theta_s^m$:

$$\alpha_B = h_B \cdot \Delta\theta_s^m,$$

звідки

$$h_B = \varepsilon_1 \cdot C_0 \cdot \Delta\theta_s^{-1} \cdot [(\theta_{oc} + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_{oc} + 273)^4] \cdot \Delta\theta_s^{-m}. \quad (15)$$

У підсумку коефіцієнт теплового розсіяння при конвекції і випромінюванні для горизонтально розташованого окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній зовнішній оболонці діаметром d :

$$h = h_B + h_k = \varepsilon_1 \cdot C_0 \cdot \Delta\theta_s^{-1} \cdot [(\theta_{oc} + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_{oc} + 273)^4] \cdot \Delta\theta_s^{-m} + \left(\frac{cp \cdot d^3 \cdot g \cdot \nu^{-1} \cdot \lambda^{-1}}{273 + \theta_{oc} + \frac{\Delta\theta_s}{2}} \right)^m \cdot \frac{\lambda \cdot c_1}{d}, \quad (16)$$

де невизначеною є лише одна, але ключова для визначення навантажувальної здатності змінна $\Delta\theta_s$, яка визначає тепловий опір навколишнього середовища.

Формування на основі системи рівнянь (4) і формули (16) системи трьох перевірених досвідом практики кабельної техніки рівнянь дає можливість визначення навантажувальної здатності кабелю у повітрі без застосування складних ітераційних процедур спільно з графічними номограмами, передбачених стандартом міжнародної електротехнічної комісії [***]:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R \cdot \left(\sum_{i=1}^n S_i + \frac{(h \cdot \Delta\theta_s^{0,25})^{-1}}{\pi \cdot d} \right)}} \\ \Delta\theta_s = \Delta\theta - I^2 \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n S_i \\ h = \left(\frac{cp \cdot d^3 \cdot g \cdot \nu^{-1} \cdot \lambda^{-1}}{273 + \frac{\Delta\theta_s}{2}} \right)^m \cdot \frac{\lambda \cdot c_1}{d} + \\ \varepsilon_1 \cdot \frac{\phi \cdot C_0}{\Delta\theta_s^{1,25}} \cdot \left[(\theta_m - I^2 \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n S_i + 273)^4 - (\theta_{oc} + 273)^4 \right] \end{array} \right. \quad (17.1-3)$$

де три параметри: I – тривало допустимий струм в жилі (номінальний): current rating equations, 100 % load factor [10]; h – коефіцієнт теплового розсіяння (Вт/м²·К^{5/4}); $\Delta\theta_s$ – різниця температур між поверхнею кабелю і повір'ям оточуючого середовища є шуканими змінними системи, оскільки визначення всіх інших параметрів системи забезпечене усталеними процедурами і перевірене досвідом використання в техніці силових кабелів. Використання наведеної системи рівнянь для практичних розрахунків можливе шляхом ітераційних розрахунків, для виконання яких за допомогою комп'ютера не викликає труднощів за

умови достатньо реального технічно виправданого визначення початкових значень шуканих змінних.

Результати аналізу достатньо реальних технічно виправданих значень для визначення початкових значень шуканих змінних h і $\Delta\Theta_s$ ілюструє рис. 1.

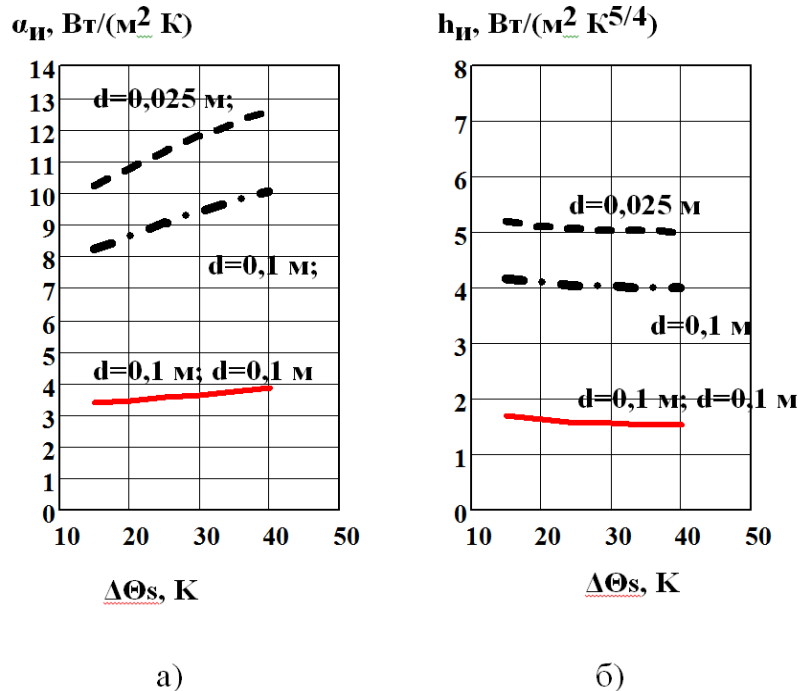


Рис. 1 – Залежності теплофізичних параметрів охолодження кабелю в полімерній зовнішній оболонці від різниці температур $\Delta\Theta_s$ між поверхнею кабелю і повітрям оточуючого середовища при горизонтальному розташуванні окремо прокладеного кабелю в полімерній зовнішній оболонці діаметром d

а) складова випромінювання 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;

б) коефіцієнт теплового розсіяння h через випромінювання практично не залежить ні від діаметру кабелю d , ні від $\Delta\Theta_s$ (нижня крива), а сумарний коефіцієнт теплового розсіяння випромінюванням h практично не залежить від $\Delta\Theta_s$, але зменшується із збільшенням діаметру кабелю

Використання системи рівнянь (17.1-17.3) дозволяє визначити параметри стаціонарного теплового режиму кабелю за будь якого струму навантаження. Це суттєво розширює можливості аналізу параметрів теплового балансу в реальних умовах експлуатації, оскільки практично ніколи кабелі тривало не використовують в гранично допустимому режимі навантаження.

На рис. 2 наведені криві нагрівання кабелю впродовж тривалого часу за різних значень струму навантаження, які розраховані за відомим [1, 6] методом зосереджених теплоємностей, за яким ізоляція розділена на дві зони: прилеглу до жили з більш високою температурою і віддалену менш нагріту зону. Доцільність використання цього методу для аналізу динаміки нагрівання високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією підтверджена експериментально [7-9].

Але очевидна залежність теплофізичних параметрів охолодження кабелю від режиму навантаження робила такий аналіз швидше якісним, ніж кількісним. Визначення

теплофізичних параметрів охолодження кабелю в різних конкретних стаціонарних режимах навантаження за допомогою запропонованої системи рівнянь дозволила зробити такий аналіз кількісним.

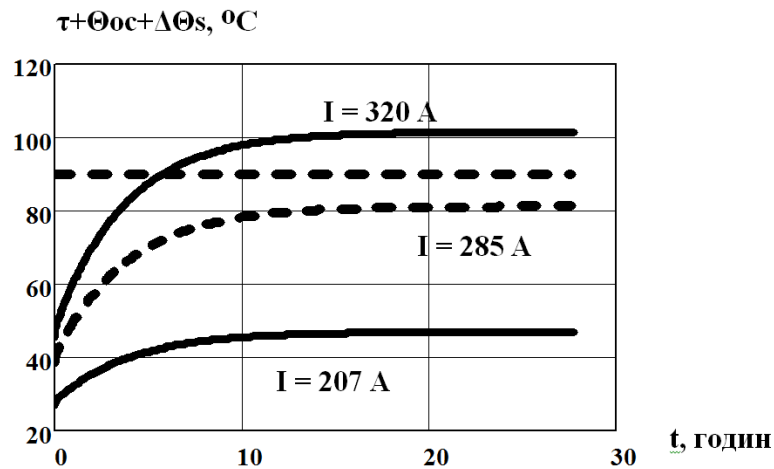


Рис. 2 – Криві нагрівання кабелю АПвЕВнг 1×70-35 для прокладання на відкритому повітрі в різних конкретних стаціонарних режимах навантаження з параметрами охолодження кабелю визначеними як рішення системи рівнянь (17.1-17.3)

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що коефіцієнт розсіяння тепла h за фізичною суттю є параметром вимушеним: і конвективна, і випромінювальна його складові зростають при збільшенні струмового навантаження на кабель. Тому користуватись однією нормативною формулою (17.1) для оцінювання впливу h на струм в стаціонарному тепловому режимі є недостатнім.

Таким чином, абсолютно необхідною умовою для визначення навантажувальної здатності кабелю в реальних стаціонарних режимах експлуатації є використання в моделі теплового балансу формули для коефіцієнту розсіяння тепла h (17.3) як функції спектру теплофізичних параметрів конвективного охолодження і випромінювання нагрітого кабелю, з одного боку, і функції параметрів струмового навантаження кабелю, з іншого.

Це беззаперечно підтверджується даними на рис. 3, на якому на криві нагрівання кабелю АПвЕВнг 1×70-35 на відкритому повітрі впродовж тривалого часу за різних значень струму навантаження (метод зосереджених теплоємностей), нанесені значення максимальної досягнутої температури як рішення моделі теплового балансу для цього кабелю.

Отже, температура жили, що стає стабільною через дуже тривалий час, залежить від різниці температур між поверхнею кабелю і віддаленим оточуючим повітрям $\Delta\Theta_s$. Остання може бути визначена саме за допомогою моделі теплового балансу (17.1), (17.2), (17.3).

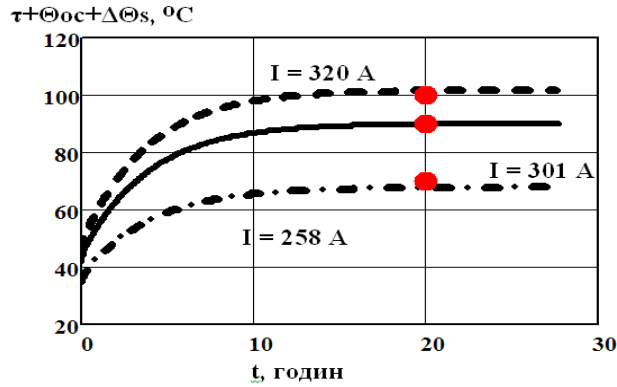


Рис. 3 – До співставлення кривих нагрівання кабелю АПвЕВнг 1×70-35 на відкритому повітрі в різних конкретних стаціонарних режимах навантаження з значеннями максимальної досягнутої температури як рішення моделі теплового балансу (17.1–17.3).

Таким чином, ця запропонована модель забезпечує всебічний аналіз параметрів стаціонарних теплових процесів за будь-якого струмового навантаження. Така модель дозволяє поєднати конструктивні і теплофізичні параметри кабелю з умовами зовнішнього середовища, тобто визначати навантажувальну здатність кабелю в реальних стаціонарних режимах експлуатації.

Висновки з проведеного дослідження. 1. Тенденції розвитку кабельних мереж середньої напруги спрямовані на впровадження кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену.

2. Для кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену недостатнім є використання виключно нормованих методів випробувань.

3. Тепловий потік від поверхні кабелю до оточуючого середовища не є ні симетричним, ні стабільним в часі чи в просторі та включає в себе процеси теплопередачі через теплопровідність, конвективний теплообмін та випромінювання.

4. Необхідною умовою для визначення навантажувальної здатності кабелю в реальних стаціонарних режимах експлуатації є використання моделі теплового балансу, яка включає формулу для визначення коефіцієнту розсіяння тепла h як функції спектру теплофізичних параметрів конвективного охолодження і випромінювання нагрітого кабелю і функції параметрів струмового навантаження кабелю.

5. Застосування запропонованої моделі дозволяє визначати навантажувальну здатність кабелю в реальних стаціонарних режимах експлуатації за рахунок поєднання конструктивних і теплофізичних параметрів кабелю з умовами зовнішнього середовища.

Список використаної літератури:

1. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, 1996. 464 с.
2. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 432 с.
3. Дмитриевский В.С., Румянцев Д.Д. Высоковольтные гибкие кабели. М: Энергия, 1974. 175 с.
4. IEC 60287-1-1:2001 Electric cables – Calculation of the current rating– Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General.
5. CIGRE Technical Brochure 303: Revision of qualification procedures for extruded (extra) high voltage and extra high voltage AC underground cables. CIGRE Working Group B1-06. 2006.
6. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Х.: Регіон-інформ, 2000. 376 с.
7. Щебенюк Л.А., Антоненко Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2011. Вип.42. С. 43–46.

8. Щєбенюк Л.А. До визначення розподілу температури в високовольтних силових кабелях із пластмасовою ізоляцією / Л.А. Щєбенюк, Т.Ю. Антонєць // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2014. № 41. С. 64–70.

9. Щєбенюк Л.А., Антонєць Т.Ю. До визначення теплового опору повітря в конкретних умовах прокладання високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією // Вісник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Вип. 3 (1175). С. 141-149.

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

References:

1. Laryna E.T. Sylovyє kabely u vysokovoljtnye kabeljnye lynyy. M.: Energhoatomyzdat, 1996. 464 s.
2. Leonov V.M., Peshkov Y.B., Rjazanov Y.B., Kholodnyj S.D. Osnovy kabeljnoj tekhniky. M.: Yzdateljskij centr «Akademyja», 2006. 432 s.
3. Dmytryevskij V.S., Rumjancev D.D. Vysokovoljtnye ghybkyє kabely. M: Enerhyja, 1974. – 175 s.
4. IEC 60287-1-1:2001 Electric cables – Calculation of the current rating– Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General.
5. CIGRE Technical Brochure 303: Revision of qualification procedures for extruded (extra) high voltage and extra high voltage AC underground cables. CIGRE Working Group B1-06. 2006.
6. Karpushenko V.P., Shhebenjuk L.A., Antonecj Ju.O., Naumenko O.A. Sylovi kabeli nyzkoji ta serednoji naprughy. Kh.: Reghion-inform, 2000. 376 s.
7. Shhebenjuk L.A., Antonecj T.Ju. Do vyznachennja propusknoji spromozhnosti vysokovoljtnykh sylovykh kabeliv z plastmasovoju izoljacieju // Vistnyk NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2011. Vyp.42. S. 43–46.
8. Shhebenjuk L.A. Do vyznachennja rozpodilu temperatury v vysokovoljtnykh sylovykh kabeljakh iz plastmasovoju izoljacieju / L.A. Shhebenjuk, T.Ju. Antonecj // Visnyk Nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu "KhPI". Serija : Problemy udoskonalennja elektrychnykh mashyn i aparativ. Teorija i praktyka. 2014. # 41. S. 64–70.
9. Shhebenjuk L.A., Antonecj T.Ju. Do vyznachennja teplovogho oporu povitrja v konkretnykh umovakh prokladannja vysokovoljtnykh sylovykh kabeliv iz plastmasovoju izoljacieju // Vistnyk NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. Vyp. 3 (1175). S. 141-149.
10. IEC 60287-2-1:2001 Electric cables – Calculation of the current rating-Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance.