

**ANALYSIS PARAMETERS OF STATIONARY THERMAL PROCESSES IN OPERATION REAL POWER CABLE INSULATED MEDIUM VOLTAGE XLPE**

**Gontar Yu.,**

*Master of Production, Department of Electrical Insulation and Cable Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", str. Kirpychova, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002*

**Shchebeniuk L.,**

*Ph. D. (Tech.), Professor, Department of Electrical Insulation and Cable Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", str. Kirpychova, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002*

**Huryh A.**

*Dr. Sc.(Tech.), Professor, Department of Electrical Insulation and Cable Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", str. Kirpychova, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002*

**АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В РЕАЛЬНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ІЗ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ**

**Гонтар Ю.Г.,**

*Майстер виробничого навчання кафедри Електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 21, Харків, Україна, 61002*

**Щебенюк Л.А.,**

*канд. техн. наук, професор кафедри Електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 21, Харків, Україна, 61002*

**Гурин А.Г.**

*доктор техн. наук, професор, професор кафедри Електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 21, Харків, Україна, 61002*

**Abstract**

The development of medium voltage cable distribution networks is aimed at the introduction of cables with cross-linked polyethylene insulation, which have significant advantages over cables with paper impregnated insulation. The most important consumer characteristic of power cables is their capacity, which is determined by the processes of heat and mass transfer. The article proposes a model that provides a comprehensive analysis of the parameters of stationary thermal processes at any current load in real operating modes due to the combination of structural and thermophysical parameters of the cable with environmental conditions.

**Анотація**

Розвиток кабельних розподільчих мереж середньої напруги спрямований на впровадження кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, які мають значні переваги перед кабелями з паперовою просоченою ізоляцією. Найважливіша споживча характеристика силових кабелів – їх пропускна спроможність, яка визначається процесами тепло- та масообміну. В статті запропоновано модель, яка забезпечує всебічний аналіз параметрів стаціонарних теплових процесів за будь-якого струмового навантаження в реальних режимах експлуатації за рахунок поєднання конструктивних і теплофізичних параметрів кабелю з умовами зовнішнього середовища.

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

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

Останні десятиліття вектор розвитку кабельних розподільчих мереж середньої напруги спрямований на впровадження кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену (ЗПЕ, XLPE). Кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену мають значні переваги перед кабелями з паперовою просоченою ізоляцією; вони надійніші в експлуатації, вимагають менших витрат на монтаж та реконструкцію [5].

Найважливішою споживчою характеристикою силових кабелів є їх пропускна спроможність [1],

тобто спроможність до навантаження та перевантаження. Пропускна спроможність кабелю визначається процесами тепло- та масообміну в кабелі. Найпростішою і найуживанішою є експоненційна модель нагрівання кабелю:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\beta}), \quad (1)$$

де  $\beta$  – постійна нагрівання, що дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір  $\beta = C \cdot S$  і є параметром, що відображає динаміку нагрівання кабелю.

Ця модель є наближеною, тому надає лише загальну інформацію щодо нагрівання кабелю. Для певних вимог та для інноваційних кабельних конструкцій необхідною умовою визначення навантажувальної здатності при реальному стаціонарному режимі експлуатації є використання моделі теплового балансу.

Тепловий потік від поверхні кабелю до оточуючого середовища включає в себе 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).

Для застосування моделі теплового балансу мають бути визначені три основні складові:

- 1) потужність тепловиділення;
- 2) потужність теплового потоку, який може бути переданий в конструкції кабелю;
- 3) 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  $I_n$ .

Потужність тепловиділення складається з втрат в жилі, діелектричних втрат та електромагнітних втрат в металевих захисних елементах конструкції та визначається міжнародною нормативною документацією [4].

Оскільки ізоляція ЗПЕ-кабелів є неполярною, то діелектричними втратами за промислової частоти (десяти 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 (мідний екран):

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

де  $k_e$  – коефіцієнт взаємоіндукції між жилою та екраном,

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

$\omega$  – 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 виконується шляхом аналогії процесів переносу зарядів і процесу переносу тепла.

Для розрахунку потужності теплового потоку, який може бути переданий від кабелю до оточуючого середовища застосовують методи розрахунку електричних ланцюгів. Якщо елементи конструкції кабелю – це послідовно нанесені радіальні шари різних матеріалів, а границі між ними є ізотермами, то різниця температур  $\tau_i$  (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  $\Theta_g$  і поверхнею кабелю  $\Theta_s$ :

$$\Theta_g - \Theta_s = \sum_{i=1}^n P_i \cdot S_i \quad (3)$$

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 металевого екрану, протікає сума двох потужностей:

$$\Theta_g - \Theta_s = \sum_{i=1}^n P_i \cdot S_i + (P_e + P_g) \cdot \sum_{i=m+1}^n S_i \quad (4)$$

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

$n$  – загальна кількість коаксіальних елементів конструкції кабелю.

Експериментальне визначення температури поверхні кабелю є досить реальною технічною процедурою в умовах виробництва, до того ж неруїнивною. воно може бути використане в цих умовах для експрес-контролю потужності теплового потоку, який може бути переданий через конструкцію кабелю в різних стаціонарних режимах навантаження.

Процес теплопередачі від поверхні кабелю в оточуюче середовище є складним і багатовимірним. Для спрощення вирішення такої задачі цей процес розділяють на елементарні: на теплопровідність, випромінювання і конвекцію. Відповідно до двох основних процесів охолодження кабелю в повітрі, – конвективного теплообміну і випромінювання,  $\alpha$  може бути представлене сумою:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_b \quad (5)$$

де  $\alpha_b$  – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням;

$\alpha_k$  – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, інтенсивність якої характеризує спеціальний критерій Нуссельта  $Nu$ , який характеризує інтенсивність конвективного теплообміну на границі теплоносія.

Значення  $Nu$  в свою чергу визначається порядком добутку двох інших теплофізичних критеріїв, – Грассгофа  $Gr$  і Прандтля  $Pr$ . Критерій Прандтля характеризує фізико-хімічні властивості теплоносія і є мірою подібності температурних і швидкісних полів в потоці; а критерій Грассгофа характеризує підйомну силу, яка виникає внаслідок різної густини теплоносія.

Значення  $Gr$  та  $Pr$  традиційно використовують для визначення параметрів охолодження кабелів у повітрі [2]:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / d = C_1 (Gr \cdot Pr)^m \cdot \lambda / d, \quad (6)$$

$$Gr = \beta \cdot \Delta \Theta_s \cdot d^3 \cdot g / \nu^2; \quad (7)$$

$$Pr = \nu \cdot c / \lambda, \quad (8)$$

де  $\beta$  – 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  $\Theta_s$  і довкілля  $\Theta_{oc}$ :

$$\Delta\Theta_s = \Theta_s - \Theta_{oc},$$

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$v$  – кінематична в'язкість повітря,  $v = 14,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

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

$C_1, m$  – параметри критерію Нуссельта (6), які залежать від добутку двох інших критеріїв теплофізики, а саме критерію Грасгофа  $Gr$  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].

Відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням описує закон Стефана-Больцмана, за яким коефіцієнт теплопередачі випромінюванням  $\alpha_b$  [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{\Delta\Theta}{R \cdot \left( \sum_{i=1}^n S_i + \frac{(h \cdot \Delta\Theta_s^{0,25})^{-1}}{\pi \cdot d} \right)}} \\ \Delta\Theta_s &= \Delta\Theta - I^2 \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n S_i \\ h &= \left( \frac{c \cdot p \cdot d^3 \cdot g \cdot v^{-1} \cdot \lambda^{-1}}{273 + \Delta\Theta_s / 2} \right)^m \cdot \frac{\lambda \cdot C_1}{d} + \varepsilon_1 \cdot \frac{\phi \cdot C_0}{\Delta\Theta_s^{1,25}} \cdot \left[ (\Theta_m - I^2 \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n S_i + 273)^4 - (\Theta_{oc} + 273)^4 \right] \end{aligned} \right. \quad (10)$$

де три параметри:  $I$  – тривало допустимий струм в жилі (номінальний): current rating equations, 100 % load factor [7];  $h$  – коефіцієнт теплового розсіяння ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^{5/4}$ );  $\Delta\Theta_s$  – різниця температур між поверхнею кабелю і повітрям оточуючого середовища є шуканими змінними системи, оскільки визначення всіх інших параметрів системи забезпечене усталеними процедурами і перевірене досвідом використання в техніці силових кабелів.

$$\alpha_b = \varphi \cdot \varepsilon_0 \cdot C_0 (T_n^4 - T_{oc}^4) (T_n - T_{oc}) \quad (9)$$

де  $C_0$  – постійна Стефана-Больцмана,

$$C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

$\varphi$  – коефіцієнт, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю дорівнює одиниці;

$\varepsilon_t$  – коефіцієнт чорноти, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній оболонці знаходиться в діапазоні від 0,8 до 0,9;

$T_n, T_{oc}$  – абсолютні температури поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища.

Формування на основі системи рівнянь (5) 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 [4]:

Використання наведеної системи рівнянь для практичних розрахунків можливе шляхом ітерацій.

Запропонована модель забезпечує всебічний аналіз параметрів стаціонарних теплових процесів за будь-якого струмового навантаження. Графіки на рис. 1 показують, що для аналізу динаміки нагрівання кабелю необхідно враховувати залежність різниці температур  $\Delta\Theta_s$  між поверхнею кабелю і віддаленим оточуючим повітрям від струмового навантаження кабелю.

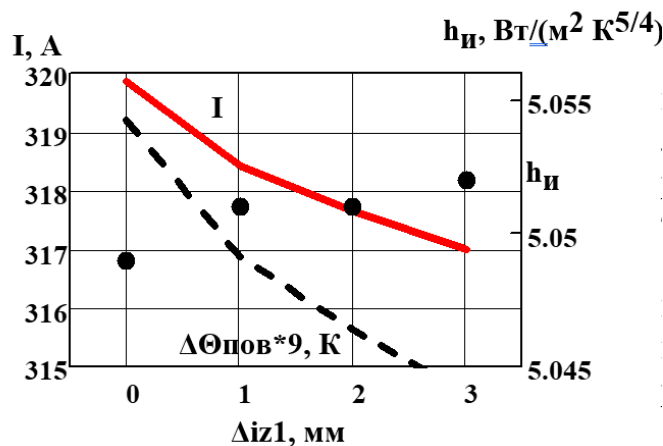


Рис. 1 – До аналізу залежності допустимого струму кабелю АПвЕВнг  $1 \times 70-35$  і параметрів його охолодження на відкритому повітрі від товщини шару ізоляції прилеглого до жили, який має підвищений питомий тепловий опір через підвищену температуру біля жили

Як видно з рис. 1 вплив товщини шару ізоляції  $\Delta iz1$  прилеглого до жили, який має підвищений питомий тепловий опір, незначний: струм зменшується відносно нульового значення (вся ізоляція

має однаковий тепловий опір) в широкому діапазоні  $\Delta iz1$  не перевищує 0,1 %. Це відповідає очевидному впливу збільшення теплового опору ізоляції на його навантажувальну здатність, підтверджує і

дає змогу кількісно оцінити взаємопов'язаність основних теплофізичних параметрів [6]. Також засвідчує чутливість моделі теплового балансу (10) до змін в конструкції кабелю: відповідні розрахунки за нормативною процедурою визначення допустимого струму кабелю [4] не виявили впливу товщини шару ізоляції  $\Delta iz1$  прилеглого до жили, який має підвищений питомий тепловий опір.

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

#### Висновки

1. Розвиток кабельних розподільчих мереж середньої напруги спрямований на впровадження кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, які мають значні переваги перед кабелями з паперовою просоченою ізоляцією.

2. Найважливіша споживча характеристика силових кабелів – їх спроможність до навантаження та перевантаження, тобто пропускна спроможність кабелю, яка визначається процесами тепло- та масообміну в кабелі.

3. Тепловий потік від поверхні кабелю до оточуючого середовища включає в себе процеси теплопередачі через теплопровідність, конвективний теплообмін та випромінювання.

4. Проаналізовано процес теплопередачі від поверхні кабелю в оточуюче середовище

5. Було запропоновано модель, яка забезпечує всебічний аналіз параметрів стаціонарних теплових процесів за будь-якого струмового навантаження в реальних режимах експлуатації за рахунок

поєднання конструктивних і теплофізичних параметрів кабелю з умовами зовнішнього середовища.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Щебенюк Л.А., Антоненко Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією // Вістник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип.42. – С. 43–46.

2. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.

3. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Х.: Регіон-інформ, 2000. 376 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. Electrical power cable engineering / Third Edition. Ed.by W.A. Thue. – CRC Press, 2011. – 460 p.5. Hampton N. HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 19 p

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

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