

*О.В. Кулаков, канд. техн. наук, доц., заст. нач. каф., УЦЗУ,  
А.Я. Шаршанов, канд. фіз.-мат. наук, доц., доц. каф., УЦЗУ*

**ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ  
НАВАНТАЖЕНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЙ, ПОКРИТОЇ  
ШАРОМ ВОГНЕЗАХИСНОГО МАТЕРІАЛУ**

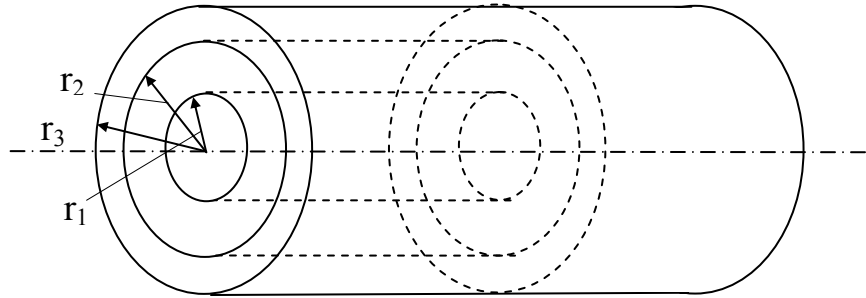
(представлено доктором техн. наук О.П. Созніком)

Побудовано термодинамічну модель режиму роботи одиночної кабельної ліній (КЛ), покритої шаром вогнезахисного матеріалу. Отримані вирази дозволяють оцінити вплив вогнезахисного покриття зокрема на максимальне струмове навантаження КЛ.

**Постановка проблеми.** Статистичні дані про пожежі в Україні [1] свідчать, що в нашій державі склався незадовільний стан з пожежами від (в) кабельної продукції (КП). Серед електротехнічних виробів за пожежною небезпекою КП посідає перше місце (приблизно 60% пожеж, 20% загиблих і 70% прямих матеріальних збитків). При виготовленні кабелів і проводів основними заходами зниження їх пожежної небезпеки є зменшення маси горючих матеріалів та використання матеріалів з пониженим рівнем горючості, димо- та газовиділення. Термін служби КП складає у середньому 30 років, тому до сьогодення часу на об'єктах у складі КЛ експлуатується КП з високим рівнем пожежної небезпеки, яка була змонтована при будівництві. Для підвищення протипожежного захисту таких КЛ, особливо на атомних електростанціях, застосовують вогнезахисні матеріали («Pyro-safe Flammoplast KS-1» та «Pyro-safe Flammoplast KS-3» («SVT Bravdschutz», Німеччина), «Promatec 45B» та «Promatec 285» (фірма «Promatec Inc» (США), «Ендотерм ХТ-150» (НВО «Спецматеріали», Україна) та інші) [2]. Вогнезахисні матеріали наносять на поверхню КП у відповідності до вимог [3]. Внаслідок нанесення вогнезахисних покриттів виникає проблема погіршення експлуатаційних характеристик КЛ [4].

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Публікації (наприклад, [3, 4]), присвячені аналізу роботи КЛ, на яку нанесено вогнезахисні покриття, вказують на наявність побічних ефектів від їх нанесення, одним з яких є зменшення максимально припустимого струмового навантаження КЛ [5]. Аналіз джерел [2-4, 6] та інших показав на відсутність чіткого математичного розв'язання термодинамічної задачі погіршення теплообміну між навантаженою КЛ, покритою шаром вогнезахисного матеріалу, та зовнішнім простором.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Побудуємо термодинамічну модель роботи навантаженої КЛ, покритої шаром вогнезахисного матеріалу. Для цього оцінимо теплообмін між КЛ, покритою шаром вогнезахисного матеріалу, і зовнішнім простором та визначимо на скільки змінюється її максимально припустиме струмове навантаження. Задачу розв'яжемо для випадку одножильного однодротового кабелю з одно- або багато- шаровою ізоляцією, покритого шаром вогнезахисного матеріалу, що прокладений у повітрі (рис. 1).



**Рисунок 1 - Структура, що досліджується**

При протіканні електричного струму силою  $I$  по ділянці струмопровідної жили довжиною  $dl$  виділяється теплова потужність

$$dW = I^2 \cdot dR = I^2 \cdot \rho \cdot \frac{dl}{S}, \quad [\text{Вт}], \quad (1)$$

де  $R$ , [Ом] – електричний опір жили;  $\rho$ , [Ом · м] - питомий електричний опір матеріалу жили;  $S = \pi \cdot r_1^2$ , [м<sup>2</sup>] – площа перерізу струмопровідної жили радіусом  $r_1$ .

Рівняння теплопередачі для багатошарової циліндричної стінки має вигляд [6]

$$dQ = \frac{t_1 - t_f}{R_1} \cdot dl, \quad (2)$$

де  $dQ$ , [Вт] - стаціонарний тепловий потік крізь бокову поверхню кабелю, покритого шаром вогнезахисного матеріалу, на ділянці довжиною  $dl$ ;  $t_1$ ,  $t_f$ , [К] - температури жили та повітря, відповідно;  $R_1$ , [К·м·Вт<sup>-1</sup>] - лінійний термічний опір теплопередачі від поверхні струмопровідної жили до повітря.

У стаціонарному режимі  $dW = dQ$ . З формул (1) та (2) знаходимо співвідношення між струмом, що протікає по кабелю, та іншими термодинамічними параметрами системи

$$I = \sqrt{\frac{s}{\rho} \cdot \frac{t_1 - t_f}{R_1}}. \quad (3)$$

Для подальшого аналізу розглянемо величину  $R_1$ . Вона являє собою суму лінійних термічних опорів теплопровідності вогнезахисного кабелю  $R_{\lambda,1}$  та конвекційної тепловіддачі з його зовнішньої поверхні до повітря  $R_{\alpha,1}$ :  $R_1 = R_{\lambda,1} + R_{\alpha,1}$ .

У свою чергу лінійний опір теплопровідності  $R_{\lambda,1}$  складається з опорів теплопровідності ізоляційних шарів  $R_{\lambda,1,0}$  та лінійного опору теплопровідності захисного шару ([6]), тобто

$$R_{\lambda,1} = R_{\lambda,1,0} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_3} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \approx R_{\lambda,1,0} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_3} \cdot \frac{\delta}{r_2}, \quad (4)$$

де  $\lambda_3$ ,  $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right]$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу вогнезахисного покриття;  $r_2$ ,  $r_3$ , [м] - відповідно, радіуси голого кабелю та кабелю, що покритий вогнезахисним матеріалом;  $\delta = r_3 - r_2$ , [м] - товщина шару вогнезахисного покриття. Відмітимо, що остання рівність у виразі (4) виконується в міру виконання співвідношення  $\frac{\delta}{r_2} \ll 1$ , яке ре-

алізується практично в усіх випадках. Лінійний термічний опір  $R_{\alpha,1,0}$  дорівнює сумі опорів окремих ізоляційних шарів. У найпростішому випадку одношарової ізоляції він має вигляд

$$R_{\lambda,1,0} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_2} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (5)$$

де  $\lambda_2$ ,  $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right]$  - коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу.

Лінійний опір конвекційної тепловіддачі  $R_{\alpha,1}$  має вигляд:

$$R_{\alpha,1} = \frac{1}{2\pi \cdot r_3 \cdot \alpha} = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_f \cdot \text{Nu}} \approx \frac{1}{\pi \cdot \lambda_f \cdot \text{Nu}_0} \left(1 - \frac{\partial \ln(\text{Nu})}{\partial r} \Big|_{r=r_2} \cdot \delta\right), \quad (6)$$

де  $\alpha, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\right]$  - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні кабелю;  
 $\lambda_f, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right]$  - значення коефіцієнта теплопровідності повітря, взяте при температурі повітря;  $Nu$  і  $Nu_0$  - числа подібності Нуссельта процесу конвекційної тепловіддачі між повітрям і поверхнею вогнезахищеного (з зовнішнім радіусом  $r = r_3$ ) і незахищеного (з зовнішнім радіусом  $r = r_2$ ) кабелю, відповідно.

Число Нуссельта визначають з критеріального рівняння, яке у випадку вільної конвекції має вигляд:  $Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$  і в якому добуток критеріїв Грасгофа ( $Gr$ ) та Прандтля ( $Pr$ ) залежить лише від властивостей повітря, різниці температури  $\Delta t$  між поверхнею кабелю і повітрям та радіуса кабелю  $r$ . Величини  $C$  і  $n$  залишаються сталими у відповідних межах зміни добутку ( $Gr \cdot Pr$ ). Так за температури повітря  $t_f = +25^0\text{C}$  і температурного напору  $\Delta t = 20^0\text{C}$  цей добуток дорівнює  $Gr \cdot Pr = 1,4 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^3$ , де  $r_0 = 10^{-2}\text{м}$  - нормуючий коефіцієнт.

При цьому, якщо  $0,4 < \left(\frac{r}{r_0}\right) < 40$ , то  $C = 0,5$ ,  $n = 0,25$ , якщо  $0,004 < \left(\frac{r}{r_0}\right) < 0,4$ , то  $C = 1,2$ ,  $n = 0,125$  [7].

Якщо умовою, що визначає критичний струм кабелю, є досягнення критичної температури струмопровідною жилою  $t_{1,кр}$ , то співвідношення (3)-(6) дозволяють зв'язати критичний струм кабелю, захищеного шаром вогнезахисного матеріалу,  $I_{кр}$  з критичним струмом незахищеного кабелю  $I_{кр,0}$

$$I_{кр,0} = \sqrt{\frac{s}{\rho} \cdot \frac{t_{1,кр} - t_f}{R_{\lambda,1,0} + \frac{1}{\pi \cdot \lambda_f \cdot Nu_0}}}. \quad (7)$$

Відповідна формула має вигляд

$$I_{кр} = I_{кр,0} \cdot \left( 1 - \frac{\frac{1}{2\pi \cdot \lambda_3} - \frac{3 \cdot n}{\pi \cdot \lambda_f \cdot Nu_0}}{R_{\lambda,1,0} + \frac{1}{\pi \cdot \lambda_f \cdot Nu_0}} \cdot \frac{\delta}{2 \cdot r_2} \right). \quad (8)$$

Перевіримо правильність виразу (7). У відповідності з вимогами [5] для проводу з гумовою ізоляцією макророзміру ПР-25 при від-

критому способі прокладання тривало припустимий струм складає  $I = 140 \text{ А}$ . Тривало припустимі струми для КЛ з гумовою або пластмасовою ізоляцією в [5] приймаються для температури жили  $t_{1, \text{кр}} = +65^{\circ} \text{ С}$  та навколишнього повітря  $t_f = +25^{\circ} \text{ С}$ . Тоді, враховуючи, що для гуми  $\lambda_2 = 0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , для повітря  $\lambda_f = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , для міді  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  [7], площі перерізу  $s = 25 \text{ мм}^2$  відповідає радіус  $r_1 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , радіус кабелю  $r_2$  приймаємо рівним  $r_2 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , отримуємо оцінку  $R_{\lambda, 1, 0} + \frac{1}{\pi \cdot \lambda_f \cdot \text{Nu}_0} = (0,35 + 0,28) \left[ \frac{\text{К} \cdot \text{м}}{\text{Вт}} \right]$ , що у відповідності з виразом (7) дає приблизно вірне значення  $I_{\text{кр}, 0} = 140 \text{ А}$ .

**Висновки.** Побудована термодинамічна модель роботи навантаженої КЛ, покритої шаром вогнезахисного матеріалу. Отриманий вираз (8) дозволяє визначати максимально припустиме струмове навантаження КЛ, покритої шаром вогнезахисного матеріалу. Для цього треба знати товщину шару та коефіцієнт теплопровідності захисного матеріалу, а в якості  $I_{\text{кр}, 0}$  можливо використовувати нормативні значення з [5].

## ЛІТЕРАТУРА

- 1 Пожежна статистика // Сайт МНС України [www.mns.gov.ua](http://www.mns.gov.ua).
- 2 Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 432 с.
- 3 Правила з вогнезахисту. Наказ МНС України 02.07.07. № 460. Зареєстровані в Міністерстві юстиції України 24.07.07 за № 849/14116.
- 4 Ландышев Н. В. Огнезащита кабелей и проводов // Системы безопасности. — 2004. - №1. - С. 338-342.
- 5 Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987.— 648 с.
- 6 Противопожарная защита кабельных линий / Сайт [www.fireproof.ru](http://www.fireproof.ru).
- 7 Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. — Харків: АПБУ, 2002.- 352 с.
- 8 Интернет-энциклопедия // Сайт [www.encycl.acsoona.ru.nuczu.edu.ua](http://www.encycl.acsoona.ru.nuczu.edu.ua)

Стаття надійшла до редакції 18.09.2008 р.