

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»
Т.Ю. АНТОНЕЦЬ, ЗАТ «Завод Південкабель», Харків;

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО ОПОРУ ПОВІТРЯ В КОНКРЕТНИХ УМОВАХ ПРОКЛАДАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз відведення тепла з поверхні кабелю у оточуюче повітря для високовольтних силових кабелів із зшитою поліетиленою ізоляцією на напругу 110 кВ. Співставлено внесок відведення тепла шляхом конвекції із внеском відведення тепла шляхом випромінювання з поверхні кабелю. Виконано аналіз залежності коефіцієнта теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі як суми коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k і коефіцієнта теплопередачі випромінюванням α_b від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Робота направлена на створення методу визначення допустимого струму цих кабелів в конкретних умовах експлуатації.

Ключові слова: Високовольтні силові кабелі, відведення тепла в повітрі, конвекція, випромінювання, пластмасова ізоляція.

Постановка проблеми. Високовольтні кабелі з пластмасовою ізоляцією мають цілий ряд характерних особливостей, які необхідно враховувати при визначенні їх спроможності до навантаження та перевантаження: більші, ніж у традиційних кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює одножилну конструкцію кабелю, підвищена гранично допустима температура ізоляції (до 90 °С), суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури. Тому стандартні методи визначення теплових характеристик цих кабелів в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки і розрахунком, і експериментально.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] нами запропоновано метод використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей. Для високовольтних кабелів, з пластмасовою ізоляцією характерними є більші, ніж у традиційних кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції. В такому разі використовують метод зосереджених теплоємностей [2]. Найпростіша модель нагрівання кабелю за застосування цього методу є сумою двох експонент:

© Л. А. Щебенюк, Т. Ю. Антонєць, 2015

$$\tau = P \cdot [S_g \cdot (1 - e^{-g \cdot \tau}) + S_f \cdot (1 - e^{-f \cdot \tau})]$$
, де g, f – постійні складові кінетики нагрівання кабелю. При визначенні параметрів цього співвідношення визначальним для кабелю, прокладеного у повітрі, є тепловий опір повітря в конкретних умовах прокладання, який за [3], в першу чергу, визначається діаметром кабелю і коефіцієнтом α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі, який за відсутності інформації про його значення в конкретних умовах прокладання рекомендовано приймати як постійну величину [4].

Ціль і задачі дослідження. Проаналізувати розрахунком залежність коефіцієнта α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі від конкретних умов прокладання, зокрема від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Визначити можливість використання α в теплових розрахунках високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією як незмінного параметру. Перевірити експериментально розраховане для конкретного кабелю АПвЭгП 1×500 – 110 значення коефіцієнта α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі.

Основний матеріал дослідження. Відведення тепла з поверхні кабелю у повітрі визначається процесами конвекції і випромінювання [5]. Тому коефіцієнт теплопередачі є відповідною сумою:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_b, \quad (1)$$

де α_k – коефіцієнт теплопередачі конвекцією; α_b – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням. α_k визначається питомою теплопровідністю повітря $\lambda = 0,025$ Вт/(м К), діаметром кабелю d і значенням критерію Нуссельта Nu , яке в свою чергу визначається порядком добутку двох інших критеріїв теплофізики, а саме критерію Грассофа Gr і Прандтля Pr [5]:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / d = C_1 (Gr \cdot Pr)^m \cdot \lambda / d; \quad (2)$$

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

$$Pr = \nu \cdot c / \lambda, \quad (4)$$

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

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

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, 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 $C_1 = 0,54$; $m = 0,25$ [5]. Залежність коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ (суттєво залежить від умов прокладання кабелю) в діапазоні діаметрів $d \in [25 \cdot 10^{-3} \text{ м} \dots 95 \cdot 10^{-3} \text{ м}]$ ілюструє рис.1. Видно, що із збільшенням діаметра кабелю зменшується конвективна складова відведення тепла з поверхні кабелю у повітрі. Для кабелів з діаметром, більшим 80 мм, α_k слабо залежить від діаметра, нелінійно залежить від температури поверхні і складає від $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ до $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Оскільки критерій Нуссельта є пропорційним $\Delta\Theta_s^m$, то для даного d , якщо λ суттєво не змінюється при зміні температури поверхні, α_k лінійно залежить від $\Delta\Theta_s^m$, що ілюструє рис.2.

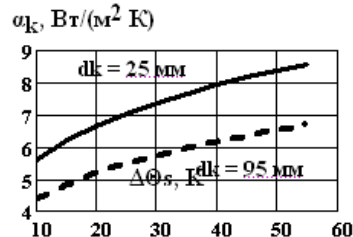


Рис.1 – Залежності коефіцієнта теплопередачі конвекцією в повітрі α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ для одиночно прокладених на вільному повітрі кабелів діаметром $dk = 25 \text{ мм}$ і $dk = 95 \text{ мм}$ за температури довкілля $\Theta_{oc} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

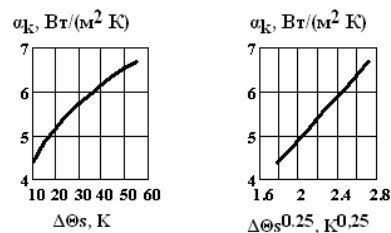


Рис.2 – Залежності коефіцієнта теплопередачі конвекцією в повітрі α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ (а) та від $\Delta\Theta_s^m$ (б) для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю діаметром $dk = 95 \text{ мм}$ за температури довкілля $\Theta_{oc} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$: коефіцієнт пропорційності h_k є для даного dk постійною величиною.

Відповідний коефіцієнт пропорційності в лінійній залежності визначається формулою:

$$\alpha_k = h_k \cdot \Delta\Theta_s^m \quad (5)$$

$$h_k = C_1 (\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot v^{-1} \cdot c \cdot \lambda^{-1})^m \cdot \lambda / d \quad (6)$$

і вимірюється в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^{5/4})$. Важливо те, що h_k залежить тільки від теплофізичних параметрів середовища і діаметру кабелю, і в широкому діапазоні значень $Gr \cdot Pr \in [5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7]$ [5] не залежить від температури поверхні кабелю. Складова відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням визначається законом Стефана-Больцмана за яким потужність випромінювання абсолютно чорного тіла пропорційна абсолютній температурі у четвертому степені. В кабельній техніці коефіцієнт відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням визначають за формулою [5]:

$$\alpha_b = \varphi \cdot \varepsilon_t \cdot C_0 \Theta, \quad (7)$$

де φ – коефіцієнт розташування нагрітого тіла в довкіллі; для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю $\varphi = 1$;

ε_t – приведений коефіцієнт теплового випромінювання, що є функцією коефіцієнтів чорноти і відповідних площ поверхні нагрітого тіла і твердого тіла довкілля:

$$\varepsilon_t = [\varepsilon_1^{-1} + (F_1/F_0) \cdot (\varepsilon_0^{-1} - 1)]^{-1}, \quad (8)$$

ε_1 для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю дорівнює коефіцієнту чорноти нагрітого тіла (кабелю ε_1 і для полімерного зовнішнього покриття знаходиться в діапазоні від 0,8 до 0,9;

C_0 – постійна випромінювання абсолютно чорного тіла (постійна Стефана-Больцмана),

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

Θ – функція різниці абсолютних температур поверхні нагрітого тіла T_p і довкілля T_{oc} :

$$\Theta = (T_p^4 - T_{oc}^4) / (T_p - T_{oc}). \quad (9)$$

Порівняння (7) і (9) свідчить про те, що коефіцієнт відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням α_b , як і коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_k , є функцією різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Відповідно для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю формулу (6) можна записати так:

$$\alpha_b = \varepsilon_1 \cdot C_0 \Delta\Theta_s^{-1} \cdot [(\Theta_{oc} + \Delta\Theta_s + 273)^4 - (\Theta_{oc} + 273)^4], \quad (10)$$

Θ_{oc} – температура довкілля в $^\circ\text{C}$.

Залежність коефіцієнта відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням α_B за (10) від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ наведено на рис.3.

Цей рисунок свідчить про те, що хоча складова випромінювання з поверхні кабелю в діапазоні реальних значень $\Delta\Theta_s$ залежить майже лінійно (див. рис.3 а) від різниці температур між поверхнею кабелю і температурою повітря в оточуючому середовищі, але відповідна похідна функції (10) (рис.3 б) не є постійною і теж залежить від $\Delta\Theta_s$.

Якщо подібно до (5) виразити (10) як функцію $\Delta\Theta_s^m$, то похідна функції є сталою (рис.3 в) і складова випромінювання з поверхні кабелю може бути записана так:

$$\alpha_B = h_B \cdot \Delta\Theta_s^m, \quad (11)$$

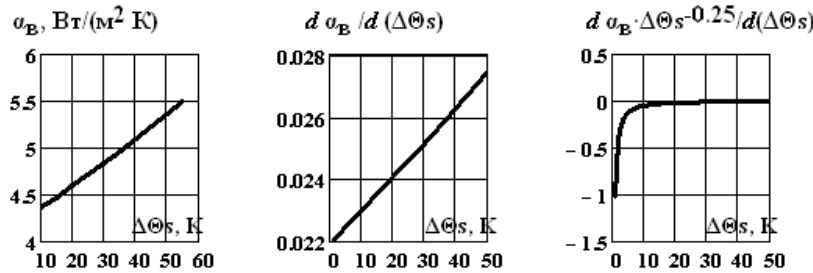


Рис.3 – Залежність коефіцієнта відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням α_B за (10) (а) та відповідна похідна функції (10) (б) від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$

В (11) коефіцієнт h_B визначається формулою:

$$h_B = \varepsilon_1 \cdot C_0 \Delta\Theta_s^{-(m+1)} \cdot [(\Theta_{oc} + \Delta\Theta_s + 273)^4 - (\Theta_{oc} + 273)^4], \quad (12)$$

в такому разі (1) має бути представлена так:

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_B = (h_B + h_K) \cdot \Delta\Theta_s^m = h \cdot \Delta\Theta_s^m. \quad (13)$$

Це співвідношення дозволяє аналізувати внесок кожного з двох основних процесів охолодження кабелю, що ілюструє рис.4.

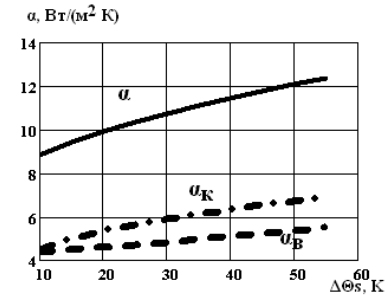


Рис.4 – Залежність коефіцієнта теплопередачі з поверхні одного кабелю діаметром 85 мм у повітрі як сума коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_K і коефіцієнта теплопередачі випромінюванням α_B від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$; температура повітря $\Theta_{oc} = 10^\circ\text{C}$

Ці дані свідчать, що, по-перше, для кабелів відносно великого діаметру внеском конвекції і випромінювання в охолодження кабелю в повітрі не можна знехтувати (для відносно малих діаметрів внесок конвекції суттєво більший, див. рис.1).

По-друге, коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_K і коефіцієнт теплопередачі випромінюванням α_B збільшуються із збільшенням різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Однак коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_K збільшується швидше.

По-третє, коефіцієнт α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі є параметром залежним від конкретних умов прокладання, зокрема нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$, і не може бути використаним в теплових розрахунках кабелю як незмінний параметр.

В той же час саме коефіцієнт h в (13) для відносно великих діаметрів є достатньо незмінним параметром (див. рис.5) і його визначення і одночасне визначення значення різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ може бути використаним в теплових розрахунках кабелю у повітрі в конкретних умовах застосування.

Аналіз розбіжності між чисто розрахунковим за (6) і (12) значенням h і розрахунком, виконаним на основі кривої нагрівання кабелю (див. рис.5) показав, що при визначенні h тепловим розрахунком в режимі нагрівання кабелю найбільшу похибку спричиняє вибір середньої температури Θ_{sg} жили кабелю у режимі нагрівання. Крива нагрівання є нелінійною, а значення Θ_{sg} необхідне для оцінки потужності виділення тепла.

На рис.6 наведено результати використання в теплових розрахунках в режимі нагрівання кабелю різних способів оцінки Θ_{sr} і порівняння їх з чисто розрахунковим за (6) і (12) значенням h . Значення Θ_{sr} знаходяться в діапазоні від 55 °С до 70 °С.

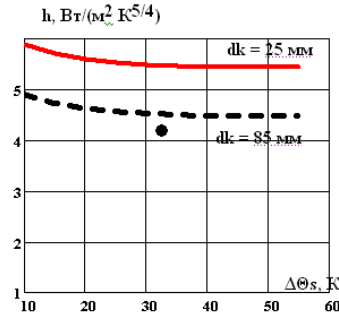


Рис.5 – Залежність від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ для коефіцієнта h в залежності $\alpha = h \cdot \Delta\Theta_s^m$ (13), яка визначає тепловий опір навколишнього середовища кабелю діаметром dk у повітрі: температура повітря 10 °С, чорна точка – оцінка значення h , визначена тепловим розрахунком кабелю АПВЭГП 1×500 – 110 на основі кривої нагрівання

Перше (55 °С), визначене як середнє між початковою ($\Theta_1 = \Theta_c = 10$ °С) і максимальною експериментально визначеною температурою $\Theta_2 = 105$ °С плюс перегрів τ_1 кабелю за перші чверть години («швидка» експонента за методом зосереджених теплоємностей, внесок якої в подальшому не змінюється). Таке значення значно менше за реальне, оскільки означало би майже лінійний нагрів.

Більше (70 °С) – це експериментально визначена температура мідного екрану, накладеного поверх системи ізоляції кабелю, яка включає напівпровідні екрани поверх жили, поверх ізоляції і саму ізоляцію. Ця температура визначена після тривалого нагрівання в режимі, близькому до стаціонарного.

Середнє значення є найбільш прийнятним, оскільки визначене як середнє між експериментально визначеною температурою мідного екрану і температурою, визначеною за методом зосереджених теплоємностей.

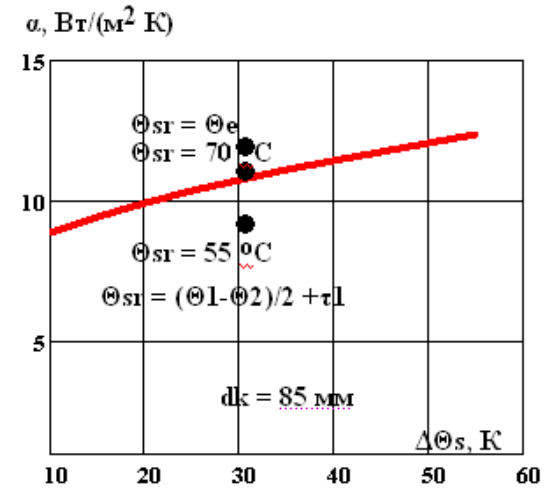


Рис.6 – Залежність від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ для коефіцієнта α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі:
– крива розрахована за (13);
– точки оцінки значення α , визначені тепловим розрахунком кабелю АПВЭГП 1×500 – 110 на основі розрахунку кривої нагрівання і експериментального визначення її характерних значень

Висновки. 1) Залежність коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ суттєво залежить від умов прокладання кабелю. 2) Для кабелів з діаметром, більшим 80 мм, коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_k слабо залежить від діаметра, нелінійно залежить від температури поверхні і складає від 4 Вт/(м² К) до 7 Вт/(м² К). Для даного діаметра α_k лінійно залежить від кореню четвертого степеня різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s^{1/4}$. 3) Складову випромінювання з поверхні кабелю доцільно виразити як залежність від кореню четвертого степеня різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s^{1/4}$. 4) Для кабелів відносно великого діаметру внеском випромінювання в охолодженні кабелю в повітрі не можна знехтувати (для відносно малих діаметрів внесок конвекції суттєво більший). 5) Коефіцієнт α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі є параметром залежним від конкретних умов прокладання, зокрема нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$, і не може бути використаним в теплових розрахунках кабелю як незмінний параметр.

б) Коэффициент пропорційності між коэффициентом α теплопередачі і значенням різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ для відносно великих діаметрів є достатньо незмінним параметром і його визначення і одночасне визначення $\Delta\Theta_s$ може бути використаним в теплових розрахунках кабелю у повітрі в конкретних умовах застосування.

Список літератури: 1. *Щебенюк Л.А.*, До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. / *Л.А. Щебенюк, Т.Ю. Антонєць* // Вісник НТУ «ХПІ». – НТУ «ХПІ», 2011. – № 42. – С. 43 – 46. 2. *Ларина Э.Т.* Силовые кабели и кабельные линии. / *Э. Т. Ларина* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.. 3. ДСТУ ІЕС60287-1-1:2012. КАБЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНІ. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1 – 1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коefficient навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення. 4. *В. П. Карпушенко* / Силові кабелі низької та середньої напруги // *В. П. Карпушенко Л. А. Щебенюк, Ю. О. Антонєць, О. А. Науменко, Х.* : Регіон-інформ 2000, 374 с.

Bibliography (transliterated): 1. L.A. Shhebenjuk, T.Ju. Antonec'. Do viznachennja propusknoї sprozozhnosti visokovol'tnih silovih kabeliv z plastmasovoju izoljacieju. *Vistnik NTU «KHPI»*. 2011. No. 42. 43 – 46. Print. 2. Je.T. Larina. *Silovye kabeli i kabel'nye linii* Moscow. Jenergoatomizdat, 1984. Print.. 3. DSTU IEC60287-1-1:2012. KABELI ELEKTRICHNI. Obchislennja nominal'noї sili strumu. Chastina 1 – 1. Spivvidnoshennja dlja obchislennja nominal'noї sili strumu (koeficient navantazhennja 100 %) i obchislennja vtrat. Zagal'ni polozhennja. 4. V. P. Karpushenko, L. A. Shhebenjuk, Ju. O. Antonec', O. A. Naumenko *Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi naprugy*, Kharkiv. Region-inform. 2000. Print. 5. V.M. Leonov, I.B. Peshkov, I.B. Rjazanov, S.D. Holodnyj *Osnovy kabel'noj tehniki*: Moscow. Izdatel'skij centr «Akademija», 2006. Print..

Поступила (received) 18.10.2014