

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук., проф., НТУ "ХПИ";
Т.Ю. АНТОНЕЦЬ, аспірант, ЗАТ "Завод Південкабель", Харків

**ДО ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ
В ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛЯХ
ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

Робота спрямована на створення методу розрахунку допустимого струму кабелів високої напруги з вулканізованою поліетиленою ізоляцією. Запропоновано і експериментально перевірено модель, що враховує наявність елементів конструкції кабелю з різним питомим тепловим опором, у тому числі за наявності водоблокуючих стрічок. Виконано аналіз розподілу температури в ізоляції і захисних покриттях високовольтних силових кабелів із зшитю поліетиленою ізоляцією на номінальну напругу 64/110 кВ. Розглянутий метод може бути застосованим тільки для одиночного ізольованого кабелю чи лінії.

Ключові слова: високовольтний силовий кабель, зшита поліетиленова ізоляція, температура ізоляції, водоблокуючі стрічки.

Вступ. Важливою споживчою властивістю силових кабелів, що визначає їх ліквідність, є їх навантажувальна спроможність. Високовольтні кабелі з пластмасовою ізоляцією, порівняно із традиційними маслом наповненими, мають ряд особливостей: підвищена гранично допустима температура ізоляції, більші, ніж у традиційних, площі перерізу жил і товщини ізоляції, суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури. Тому стандартні методи визначення пропускної спроможності в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки і розрахунком, і експериментально впливу розподілу температури в ізоляції і захисних покриттях на їх пропускну спроможність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] нами показано, що доцільно, при визначенні навантажувальної спроможності цих кабелів, порівнювати рішення, одержані за допомогою різних розрахункових моделей процесів тепло і масообміну. Зокрема зазначено, що для визначення динаміки їх нагрівання необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, але модель для застосування цього методу для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією в нормативній документації відсутня [2]. Додаткові питання виникають щодо відповідних кабелів з оболонкою з полівінілхлоридного пластикату (ПВХ), призначених для застосування в пожежебезпечних умовах. Оскільки питомий тепловий опір ПВХ суттєво більший, ніж у поліетилену, захисний покрив з ПВХ суттєво збільшує тепловий опір кабелю. Якщо такий кабель призначений

для прокладання в ґрунті, то до теплового опору оболонки додається тепловий опір ґрунту навколо кабелю, тепловий опір якого може бути суттєво більшим, ніж у ґрунту, віддаленого від кабелю [2]. Тому для врахування температури елементів конструкції кабелю на їх теплофізичні характеристики необхідне визначення розподілу температури в кабелі за номінального режиму роботи.

Ціль і задачі дослідження. Запропонувати розрахункову модель для визначення розподілу температури в ізоляції та захисних покриттях кабелю з пластмасовою ізоляцією АПвЕВнгд $1 \times 500 - 110$ в номінальному режимі. Спів ставити результати розрахунку з відповідними результатами вимірювання температури ізоляції і захисних покриттів.

Основний матеріал дослідження. Основою визначення навантажувальної спроможності кабелю є розрахунок номінального струму за аналогією процесів тепломасообміну, зокрема процесів переносу зарядів і процесу переносу тепла. Відповідні моделі, однакові за своєю структурою і 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 системах диференціальних рівнянь є досить універсальним і уніфікованим [2, 3].

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

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

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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\int \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0, \quad (3)$$

$$r \frac{\partial \varphi}{\partial r} + A = 0, \quad (4)$$

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

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \varphi_0 / r \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (5)$$

Ця модель є основною розрахунковою моделлю, що використовується в кабельній техніці для опису процесів переносу через однорідну речовину в радіальному полі за стаціонарного режиму навантаження:

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

$$R_{із} = \rho \ln(r_2/r_1)/2\pi, \text{ де } \rho \text{ в Ом} \cdot \text{м}; \quad (6)$$

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

$$S_{із} = \sigma_{із} \ln(r_2/r_1)/2\pi, \text{ де } \sigma_{із} \text{ в К} \cdot \text{м} / \text{Вт}. \quad (7)$$

Оскільки потенціал залежить тільки від радіуса лише за умови необмежено довгого кабелю, а речовина, в якій відбувається процес переносу в тій чи іншій мірі є неоднорідною, модель (5) зумовлює похибку тим меншу, чим вищезазвані умови ближчі до реальності. На виокористанні цієї моделі базуються всі нормативні документи щодо визначення пропускної спроможності силових кабелів [2]. Відповідно розподіл температур в кабелі визначають через дискретний набір значень різниці температур τ на елементах конструкції, до яких можна застосувати зазначені умови. При цьому розподілом температур в межах окремого елемента нехтують. Результати відповідних розрахунків для кабелю АПвЭВнгд 1× 500 – 110 наведено на рис.1.

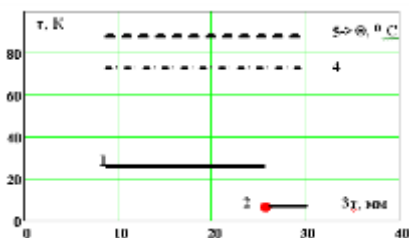


Рис. 1 – Різниця температур (перегрів τ) на елементах конструкції кабелю АПвЭВнгд 1× 500 – 110 та температура жили Θ в $^{\circ}\text{C}$ (5) в стаціонарному режимі за тепловиділення в жилі 42 Вт/м: 1 – ізоляція; 2 – водоблокуючий шар (товщина 0,5 мм); 3 – оболонка з ПВХ- пластикату; 4 – сумарний перегрів відносно температури оточуючого середовища 15 $^{\circ}\text{C}$

Результати розрахунків за нормативними документами [2] дозволяють визначити максимальну температуру ізоляції кабелю (5), а відтак визначення пропускну спроможність кабелю у вигляді номінального струму. При цьому неможливо оцінити, в якій самій області ізоляції температура є максимальною, що є важливим для вирішення, щонайменше двох задач, а саме:

1) визначення похибки розрахункового значення номінального струму, спричиненої суттєвою залежністю теплопровідності ізоляції від температури;

2) визначення переважувальної спроможності таких кабелів методом зосереджених теплоємностей, оскільки динаміка нагрівання впродовж перших кількох годин переваження суттєво залежить від теплоємності поліетиленової ізоляції, для якої характерна значна залежність від температури (наприклад, питома теплоємність поліетилену за температури 20 °С становить 2300 Дж/кг·°С, а за 80 °С становить 3750 Дж/кг·°С).

Для визначення розподілу температури в ізоляції та захисних покриттях кабелю використано аналогію процесів тепломасообміну, зокрема процесів переносу зарядів і процесу переносу тепла. Відома модель, що описує розподіл електричного поля в так званій градійованій ізоляції [3] застосована для розрахунку градієнту перегріву в елементах конструкції, що мають різну теплопровідність:

$$-\frac{d\tau(i)}{dr(i)} = \frac{\tau\sigma(i)}{x(i)\sum_{i=1}^n \sigma(i)\ln\left(\frac{r(i)}{r(i-1)}\right)}, \quad (8)$$

де i – номер елемента конструкції кабелю, в межах якого питомий тепловий опір $\sigma(i)$ є незмінним; $r(i-1)$, $r(i)$ – найменший і найбільший радіуси відповідних радіальних елементів; $r(i)$ – поточний радіус, що належить діапазону $[r(i-1), r(i)]$.

Температура елементів кабелю визначена відповідно як:

$$\Theta(i) = 90 - \int_{r_0}^{r(i)} \frac{d\tau(i)}{dr(i)} dr, \quad (9)$$

де 90 – максимально допустима тривала температура ізоляції, за якою визначено номінальний струм.

Результати розрахунку за (8) і (9) для АПвЭВнгд 1×500 – 110, $i=3$ (ізоляція із зшитого поліетилену, водоблокуюча стрічка, оболонка з ПВХ-пластикату, температура поверхні 40 ± 2 °С) наведено на рис. 2. Експериментально визначену (за додаткового захисного покриття із значним тепловим опором) температуру електропровідного екрану нанесено у вигляді точки на рис. 2. Значення дорівнює 71 °С, що є підтвердженням визначеного розрахунком факту наявності в кабелі теплового бар'єру у вигляді водоблокуючого шару товщиною 0,5 мм. Цей елемент конструкції кабелю зумовлює досить високу температуру всієї ізоляції. На ділянці напівпровідного екрану по ізоляції температура становить (67 ± 2) °С в номінальному режимі і без додаткового захисного покриття.

Експериментальна перевірка розподілу температури в кабелі дозволила, по-перше, прийняти в розрахунках питомий тепловий опір ізоляції $\sigma(1) = 3,6 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$, характерний для температур $(67 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$. По-друге, засвідчила роль теплового бар'єру у вигляді водоблокуючої стрічки в конструкції кабелю АПвЭВнгд $1 \times 500 - 110$.

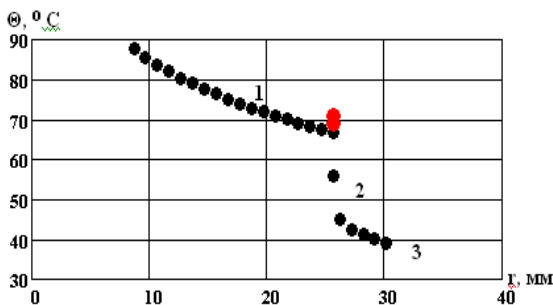


Рис. 2 – Температура елементів кабелю АПвЭВнгд $1 \times 500 - 110$ в стаціонарному режимі за тепловиділення жили 42 Вт/м : 1 – ізоляція; 2 – водоблокуючий шар; 3 – оболонка з ПВХ-пластикату; температура оточуючого середовища $15 \text{ }^\circ\text{C}$; точка $\Theta = (70 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ – експериментально визначена температура електропровідного екрану по ізоляції в умовах додаткового захисного покриття

Одержані результати свідчать про цілий ряд особливостей відведення тепла в оточуюче середовище у високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією, які прямо впливають на їх пропускну і відповідно переважувальну спроможність.

Більша, порівняно із традиційними конструкціями, товщина ізоляції, більші значення площі перерізу струмопровідних жил, мідний електропровідний екран, поверх якого накладений тонкий шар водоблокуючої стрічки з дуже високим питомим тепловим опором ($\sigma(2) = 50 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$) зумовлюють те, що для цих кабелів характерним є досить висока температура всієї ізоляції (напівпровідний екран – зшита поліетиленова ізоляція – напівпровідний екран). Водоблокуюча стрічка в конструкції кабелю АПвЭВнгд $1 \times 500 - 110$ у нормальному режимі роботи виконує роль теплового бар'єру. Це підтверджує виміряне експериментально значення температури електропровідного екрану по ізоляції (див. рис. 2).

Висновки. 1) Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією діючі нормативні документи щодо **визначення тривало допустимого струму** є застосовними. Однак відповідні розрахункові

моделі не дозволяють визначити розподіл температури в елементах конструкції цих кабелів, зокрема в їх ізоляції. 2) Для визначення навантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки динаміка нагрівання впродовж перших кількох годин навантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції. При застосуванні цих методів необхідно визначення розподілу температури в ізоляції, товщина якої є більшою, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, і має місце суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури. 3) Для визначення розподілу температури в ізоляції та захисних покриттях кабелю використано аналогію процесів переносу зарядів і процесу переносу тепла. Відома модель, що описує розподіл електричного поля в так званій градієнтній ізоляції [3] застосована для розрахунку градієнту перегріву в елементах конструкції, що мають різну теплопровідність. 4) Запропоновано і експериментально перевірено модель, що враховує наявність елементів конструкції кабелю з різним питомим тепловим опором. 5) Показано, що для кабелю АПвЭВнгд 1× 500 – 110 водоблокуюча стрічка в конструкції у нормальному режимі роботи виконує роль теплового бар'єру і зумовлює те, що для цих кабелів характерним є досить висока температура всієї ізоляції (напівпровідний екран – зшита поліетиленова ізоляція – напівпровідний екран).

Список літератури: 1. *Щебенюк Л.А.* До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією / *Л.А. Щебенюк, Т.Ю. Антоненць* // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – Вип. 42.– С. 43-46. 2. ДСТУ ІЕС60287-1-1:2012. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1 – 1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення. 3. *Золотарев В.М.* Конструкции и электрическое поле кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / *В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, А.Г. Гурин, Ю.А. Антоненць, В.В. Золотарев, А.А. Науменко.* – Х.: Майдан, 2014. – 188 с. 4. Основы кабельной техники: [учебник для студ. высш. учеб. заведений] / *В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный;* под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 432 с. 5. *Карпушенко В.П.* Системний підхід до випуску конкурентноспроможної продукції / *В.П. Карпушенко* // Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / *В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антоненць, О.А. Науменко* – Х.: Регіон-інформ, 2000. – С. 202-210.

Bibliografy (transliterated): 1. *Shchebenyuk L.A.* Do vyznachennya propusknoyi spromozhnosti vysokovolt'nykh sylovykh kabeliv z plastmasovoyu izolyatsiyeyu. *Visnyk NTU "HPI"*. Kharkiv: NTU "HPI", 2011. No. 42. 43-46. Print. 2. *ДСТУ ІЕС60287-1-1:2012. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1 – 1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100 %) і обчислення*

втрат. Загальні положення. 2012. Print. **3.** Zolotarev V.M., Karpushenko V.P., Gurin A.G., Antonec Ju.A., Zolotarev V.V., Naumenko A.A.. Konstrukcii i jelektricheskoe pole kabelej s izoljaciej iz sshitogo polijetilena. Kharkiv: Maydan, 2014. Print. **4.** V.M. Leonov, I.B. Peshkov, I.B. Rjazanov, S.D. Holodnyj. *Osnovy kabel'noj tehniki.* Moscow: Izdatel'skij centr "Akademija", 2006. Print. **5.** Karpushenko V.P., Shchebenyuk L.A., Antonets' Yu.O., Naumenko O.A. *Systemnyu pidkhdid do vypusku konkurentnospromozhnoyi produktsiyi. Sylovi kabeli nyz'koyi ta seredn'oyi napruhy. Konstruyuvannya, tekhnolohiya, yakist'.* Kharkiv: Rehion-inform, 2000. 202-210. Print.

Надійшла (received) 10.10.2014



Щебенюк Леся Артемівна, кандидат технічних наук, професор кафедри "Електроізоляційна і кабельна техніка". У 1966 р. закінчила Харківський політехнічний інститут зі спеціальності "Електроізоляційна і кабельна техніка". У 1979 р. у Ленінградському політехнічному університеті захистила кандидатську дисертацію по темі: "Дослідження електричного старіння бумажно-епоксидної ізоляції" зі спеціальності "Електроізоляційна і кабельна техніка". Наукові інтереси пов'язані з удосконаленням способів контролю характеристик електроізоляційних матеріалів і конструкцій; удосконалення способів і зниження дисперсії параметрів електроізоляційних матеріалів.



Антонець Тарас Юрійович, аспірант кафедри "Електроізоляційна і кабельна техніка". У 2008 р. закінчив НТУ "ХПІ" зі спеціальності "Електроізоляційна і кабельна техніка". Висунуто на здобуття премії Президента України для молодих вчених. Наукові інтереси пов'язані з методами визначення перевантажувальної здатності кабелів з полімерною ізоляцією, розробкою конструкцій, технологій та випробуванням силових кабелів з вулканізованою поліетіленовою ізоляцією на напругу до 330 кВ.