

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

### КІНЕТИКА НАГРІВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз результатів розрахунку пропускної спроможності силових кабелів на напругу 220 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із зшитотою поліетиленовою ізоляцією.

**Ключові слова:** силовий високовольтний кабель, тривало допустимий струм, теплосміність.

**Вступ.** Найважливішою споживчою властивістю силових кабелів, яка визначає його ліквідність, є спроможність до навантаження та перевантаження (в подальшому, - пропускна спроможність). Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією характерними особливостями є: більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює одножилну конструкцію кабелю, та як наслідок, особливості їх прокладання і використання, наприклад, прокладання у площині з обов'язковою транспозицією електропровідних екранів при заземленні їх на обох кінцях лінії. Крім того для них характерна підвищена допустима температура ізоляції, суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури (питома теплоємність поліетилену за температури 20 °С становить 2300 Дж/кг·°С, а за 80 °С становить 3750 Дж/кг·°С). Тому методи визначення пропускної спроможності в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки: і розрахунком, і експериментально.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для прийняття економічно виважених рішень при визначенні пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, необхідне вирішення системи рівнянь, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

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.

© Л.А.Щебенюк, Т.Ю.Антонец, 2013

Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах і в умовах експлуатації [2]. Найбільш простою і уживаною є експоненційна модель нагрівання кабелю, яка для режиму включення (тобто за температури довкілля  $t = 0$ ;  $\tau = 0$ ) [3]:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)], \quad (1)$$

де  $\beta$  – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір  $\beta = C S$ ,  $\beta$  параметром кінетики нагрівання кабелю.

Ця модель є наближеною. Досвід її застосування свідчить про прийнятну для практичних задач точність за умови, що за її допомогою порівнюють характеристики подібних конструкцій кабелів. Зокрема для теплових розрахунків кабелів у нестационарних режимах, якщо товщина ізоляції невелика відносно розмірів жили [3]. Якщо товщина ізоляції силового кабелю значна, що характерно для високовольтних кабелів, при визначенні переважувальної спроможності необхідно врахувати наявність в ізоляції перепаду температур. В такому разі використовують метод зосереджених теплоємностей [4]. Найпростіша модель нагрівання кабелю за застосування цього методу є сумою двох експонент:

$$\tau = P \cdot [S_g \cdot (1 - e^{-g \cdot t}) + S_f \cdot (1 - e^{-f \cdot t})], \quad (2)$$

де  $g, f$  – постійні, складові кінетики нагрівання даного кабелю.

**Ціль і задачі дослідження.** Порівняти кінетику нагрівання кабелю за моделями (1) і (2) для високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією АПвПЭг 1×1300 – 220 з метою визначення впливу теплоємності жили на кінетику нагрівання кабелю за моделлю (2).

**Матеріал дослідження.** За методом зосереджених теплоємностей ізоляція кабелю представлена у вигляді двох зон із рівними величинами теплового опору  $S_{i31} = S_{i32} = S_{i3}/2$ , але з різними теплоємностями:  $C_{i31} = c_{i3} \cdot \pi \cdot r(R - r)$ ;  $C_{i32} = c_{i3} \cdot \pi \cdot R(R - r)$ , де  $c_{i3}$  – питома об'ємна теплоємність ізоляції. Відповідну схему наведено на рис.1. Параметри схеми визначає коефіцієнт  $p$  (коефіцієнт Ван Вормера [4]:  $p = [\ln(R/r)]^{-1} - [(R/r) - 1]^{-1}$ );  $S_1 = S_{i31}$ ;  $S_2 = S_{i32}$ ;  $C_1 = p C_{i31} + C_{ж}$ ;  $C_2 = (1 - p) C_{i31} + C_{i32}$ .

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при  $t = 0$ ,  $\tau = 0$ , перегрів проводу в момент  $t$ : описує (2), де  $g = [M + (M^2 - N)^{0.5}]/N$ ;  $f = [M - (M^2 - N)^{0.5}]/N$ ;  $M = 0,5[C_1(S_1 + S_2 + S_d) + C_2(S_2 + S_d)]$ ;  $N = C_1 S_1 C_2 (S_2 + S_d)$ ;  $S_g = (g - f)^{-1} [C_1^{-1} - f(S_1 + S_2 + S_d)]$ ;  $S_f = (S_1 + S_2 + S_d) - S_g$ , де  $P$  – потужність тепловиділення в проводі в кінці короткотермінового (менше 1 години) режиму нагрівання.

Як приклад, для кабелю АПвПЭг 1×1300 – 220 результати розрахунків кривих нагрівання за моделями (1) і (2) наведені на рис. 2.

Теплові параметри: питомий тепловий опір ізоляції  $\sigma_{i3} = 3,7$  °С·м/Вт, захисних покривів  $\sigma_{зп} = 3$  °С·м/Вт; тепловий опір ізоляції  $S_{i3} = 0,424$  °С·м/Вт; тепловий опір довкілля  $S_d = 0,93$  °С·м/Вт; коефіцієнт теплопередачі в повітря  $\alpha = 8$  Вт/°С·м<sup>2</sup>; теплоємність жили  $C_{ж} = 3236$  Дж/°С·м;

теплоємність ізоляції, прилеглої до жили  $C_{i3,1} = 4327 \text{ Дж/}^\circ\text{C}\cdot\text{м}$ ; теплоємність зовнішнього шару ізоляції  $C_{i3,2} = 8889 \text{ Дж/}^\circ\text{C}\cdot\text{м}$ .

Параметри схеми заміщення, в якій теплоємності зображені електричними ємностями (див. рис. 1):  $S_1 = S_2 = 0,212 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$ ; коефіцієнт Ван Вормера:  $p = (\ln(47,9/20,9))^{-1} - ((47,9/20,9) - 1)^{-1} = 0,441$ ;  $C_1 = p C_{i3,1} + C_{ж} = 5143 \text{ Дж/}^\circ\text{C}\cdot\text{м}$ ;  $C_2 = (1-p) C_{i3,1} + C_{i3,2} = 11310 \text{ Дж/}^\circ\text{C}\cdot\text{м}$ .

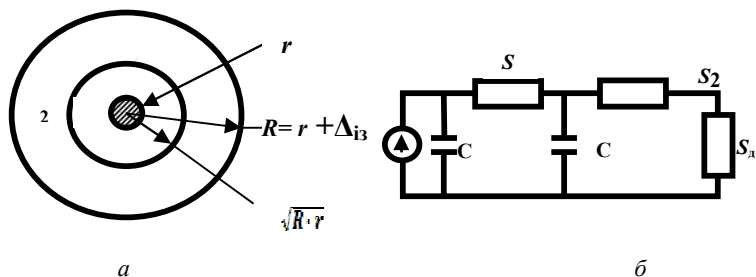


Рис. 1 - Схема моделі нагрівання *a* - ізольованого проводу в повітрі; *б* - відповідна схема заміщення

Рис. 2 свідчить про те, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією обидві моделі дають практично однакові результати щодо **визначення тривало допустимого струму**. Але для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки кінетика нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції.

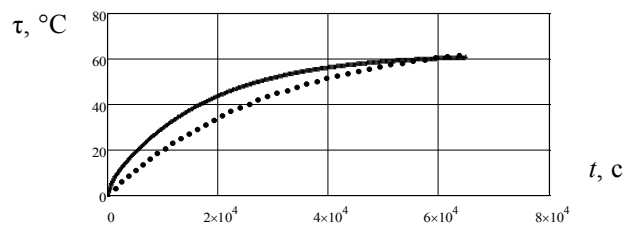


Рис. 2 – Криві перегріву  $\tau$  кабелю АПвПЕг  $1 \times 1300 - 220$  за моделями: пунктир – модель (1); суцільна – модель (2)

Аналіз складових кривих нагрівання кабелю АПвПЕг  $1 \times 1300 - 220$  (рис.3), що ілюструють визначення допустимого півгодинного перевантаження і розраховані за моделями (1) і (2), свідчить, що різниця між значеннями півгодинного перегріву кабелю за традиційною моделлю (1)  $\tau\beta$  і

півгодинного перегріву за другою складовою моделі (2)  $\tau_2 = P \cdot [S_f \cdot (1 - e^{-f \cdot t})]$  не перевищує  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Такою різницею можна було б знехтувати. Але, по-перше, ця різниця з часом збільшується, а, по-друге, різниця між значеннями півгодинного перегріву кабелю за традиційною моделлю (1)  $\tau\beta$  і півгодинного перегріву за сумою складових моделі (2)  $\tau = \tau_1 + \tau_2$  перевищує  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  і ця різниця з часом збільшується. Тому при визначенні переважувальної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією за наведеними результатами розрахунків доцільно використання методу зосереджених теплоємностей (модель (2)).

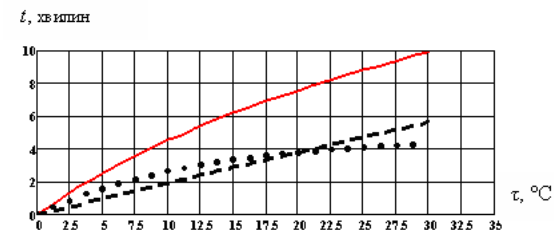


Рис. 3 – Складові кривих нагрівання кабелю АПвПЕг  $1 \times 1300 - 220$ , що ілюструють визначення допустимого півгодинного перевантаження: суцільна:  $\tau = \tau_1 + \tau_2$  (модель (2)); пунктир:  $\tau_1$ ; штрихова:  $\tau_2$

В той же час рекомендація щодо доцільності прямого експериментального чи опосередкованого визначення значень параметрів моделі для розрахунку допустимого струму конкретних кабелів присутня практично в усіх міжнародних і відповідних національних стандартах серії 60287. Вибір значень параметрів і розрахункових моделей має бути обґрунтованим технічно. Економічні складові визначення пропускної спроможності відображені в стандарті ДСТУ ІЕС60287-3-3:2012, але вони стосуються виключно економічних аспектів в умовах експлуатації.

Для експериментального визначення теплових параметрів кабелю, зокрема параметра теплопередачі в оточуюче середовище, в його конструкцію вмонтовано спай чотирьох однакових термопар, які мають лінійну залежність термо-ЕРС аж до температури  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  («мідь-константан» з коефіцієнтом термо-ЕРС  $0,05 \text{ мВ/К}$ ). Термопари розташовані в жилі, в ізоляції, в оболонці, і на поверхні кабелю таким чином, щоб мінімально впливати на температуру в місці спаю. Одержані криві нагрівання ізоляції кабелю свідчать про те, що модель (2) теж є наближеною. Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією спостерігається відставання перегріву ізоляції від теоретичного за (2). Тому необхідне експериментальне дослідження кінетики нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості їх конструкції.

**Результати досліджень.** 1) Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією відомі розрахункові моделі дають практично однакові результати щодо **визначення тривало допустимого струму** і таким чином діючі нормативні документи є застосовними. 2) Для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки кінетика нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції. 3) Експериментального дослідження кінетики нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості цих кабелів свідчить про те, що модель (2) для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією з великим перерізом струмопровідної жили теж є досить наближеною і спостерігається відставання перегріву ізоляції від теоретичного, визначеного за (2).

**Список літератури:** 1. *Щебенюк Л.А.* До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. / *Л.А. Щебенюк, Т.Ю. Антоненко* // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 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. *Карпушенко В.П.* Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. / *В.П. Капушенко, Л.А. Щебенюк, О.А. Науменко, Антоненко Ю.О.*; Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 4. *Ларина Э.Т.* Силовые кабели и кабельные линии: [учебн. Пособие для вузов]/ *Э.Т. Ларина* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.

*Поступила в редколлегию 05. 0 .2013*

УДК 621.315.2

**Кінетика нагрівання високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією** / *Л.А.Щебенюк, Т.Ю.Антоненко* // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП».– 2013. - №.17 (990). – С.165-169. Бібліогр.:4 назви. Іл.:3.

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей на напряжение 220 кВ. Работа посвящена созданию системы расчета допустимого тока высоковольтных силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией.

**Ключевые слова:** силовой высоковольтный кабель, длительно допустимый ток, теплоемкость.

The analysis of data of current calculation of the rating of cables at direct voltages up to 220 kV. The work is devoted to creation of a system of method for calculation of the current rating of high-voltage cables.

**Keywords:** power high-voltage cable, protractedly possible current, heat capacity.