

ДИНАМІКА 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 шишитою поліетиленовою ізоляцією.

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

Постановка проблеми. 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 масло 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 гранично допустима температура ізоляції [1], суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури. Наприклад, питома теплоємність поліетилену за температури 20 °С становить 2300 Дж/кг·°С, а за 80 °С становить 3750 Дж/кг·°С. Тому стандартні методи визначення пропускної спроможності в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки і розрахунком, і експериментально.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах і в умовах експлуатації [2]. Тому доцільно при визначенні перевантажувальної спроможності цих кабелів порівнювати рішення, одержані різними методами. 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 β – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір $\beta = C \cdot S$ і яка є параметром, що відображає динаміку нагрівання кабелю. Ця модель є наближеною. Досвід її застосування свідчить про прийнятну для практичних задач точність за умови, що за їх 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 перевантажувальної 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:

$$\tau = P \cdot \left[S_g \cdot (1 - e^{-gt}) + S_f \cdot (1 - e^{-ft}) \right], \quad (2)$$

де g, f – постійні складові динаміки нагрівання кабелю.

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

Основний 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 заміщення визначає геометричний коефіцієнт p (коефіцієнт Ван Вормера [4]):

$$p = [\ln(R/r)]^{-1} - [(R/r) - 1]^{-1}; S_1 = S_{i31}; S_2 = S_{i32};$$

$$C_1 = p \cdot C_{i31} + C_{ж}; C_2 = (1 - p) \cdot C_{i31} + C_{i32}.$$

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при $t = 0$, $\tau = 0$, перегрів проводу в момент t : описує (2), де

$$g = \left(M + \sqrt{M^2 - N} \right) / N; \quad f = \left(M - \sqrt{M^2 - N} \right) / N;$$

$$M = 0,5 \cdot [C_1 \cdot (S_1 + S_2 + S_{д}) + C_2 \cdot (S_2 + S_{д})];$$

$$N = C_1 \cdot S_1 \cdot C_2 \cdot (S_2 + S_{д});$$

$$S_g = (g - f)^{-1} \cdot [C_1^{-1} - f(S_1 + S_2 + S_{д})];$$

$$S_f = (S_1 + S_2 + S_{д}) - S_{д},$$

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: питомих 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 $S_{д} = 0,93$ °С·м/Вт; коефіцієнт теплопередачі в повітря $\alpha = 8$ Вт/°С·м²; теплоємність жили $C_{ж} = 3236$ Дж/°С·м; теплоємність ізоляції, прилеглої до жили $C_{i31} = 4327$ Дж/°С·м; теплоємність зовнішнього шару ізоляції $C_{i32} = 8889$ Дж/°С·м.

Параметри схеми заміщення, в якій теплоємності зображені електричними ємностями (див. рис. 1): $S_1 = S_2 = 0,212$ °С·м/Вт; коефіцієнт Ван Вормера:

$$p = \left(\ln \frac{42,9}{20,9} \right)^{-1} - \left(\frac{42,9}{20,9} - 1 \right)^{-1} = 0,441;$$

$C_1 = p \cdot C_{i31} + C_{ж} = 5143$ Дж/°С·м; $C_2 = (1 - p) \cdot C_{i31} + C_{i32} = 11310$ Дж/°С·м.

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 необхідно застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки динаміка нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції.

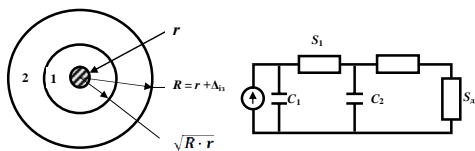


Рис. 1. Схема моделі нагрівання ізолюваного проводу в повітрі та відповідна схема заміщення

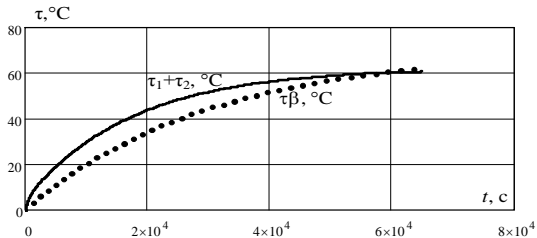


Рис. 2. Криві нагрівання кабелю АПвПЭг 1×1300 – 220 за моделями (1) і (2)

Аналіз складових кривих нагрівання кабелю АПвПЭг 1×1300 – 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 моделлю (2) $\tau_2 = P \cdot [S_f(1 - e^{-ft})]$ не перевищує 2 °С. 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 моделей (2) $\tau_1 + \tau_2$ перевищує 6 °С і ця різниця з часом збільшується.

Тому при визначенні перевантажувальної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією за наведеними результатами розрахунків доцільно використання методу зосереджених теплоємностей (модель (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 естосуються виключно економічних аспектів в умовах експлуатації.

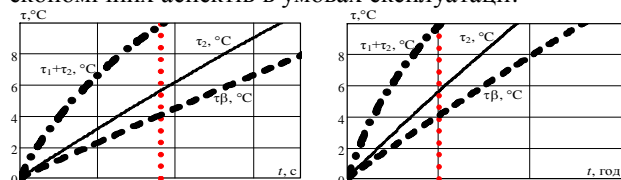


Рис. 3. Складові кривих нагрівання кабелю АПвПЭг 1×1300 – 220, що ілюструють визначення допустимого півгодинного перевантаження, розраховані за моделями (1) і (2)

Для експериментального визначення теплових параметрів кабелю, зокрема параметра теплопередачі в оточуюче середовище, в його конструкцію вмонтовано спаї чотирьох однакових термопар, які мають лінійну залежність термо-ЕРС аж до температури 350 °С ("мідь-константан" з коефіцієнтом термо-ЕРС 0,05 мВ/К). Термопары розташовані в жилі, в ізоляції, в оболонці, і на поверхні кабелю таким чином, щоб мінімально впливати на температуру в місці спаю.

Одержані таким чином криві нагрівання ізоляції кабелю свідчать про те, що модель (2) теж є досить наближеною і для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією з великим перерізом струмопровідної жили спостерігається відставання перегріву ізоляції від теоретичного, визначеного за (2). Ці результати засвідчили необхідність експериментального дослідження динаміки нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості цих кабелів.

Висновки.

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 динаміка нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції.

3) Експериментального дослідження динаміки 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., Антоненц 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. 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., Щебенюк Л.А., Антоненц Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ.2000. – С. 270-289.
4. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии: [уч. пособие для вузов] – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.

Bibliography (transliterated): 1. SChebenyuk L.A., Antonec' T.Yu. Do viznachennya propusknoyi spromozhnosti visokovol'tnih silovih kabeliv z plastmasovoyu izolyaciyeu. // Vistnik NTU "HPI". - Harkiv: NTU "HPI". - 2011. - Vip. 42. - S. 43-46. 2. DSTU IES60287-1-1:2012. Kabeli elektrichni. Obchislennya nominal'noi sili strumu. Chastina 1-1. Spivvidnoshennya dlya obchislennya nominal'noi sili strumu (koefficient navantazhennya 100 %) i obchislennya vtrat. Zagal'ni polozhennya. 3. Karpushenko V.P., Schebenyuk L.A., Antonec' Yu.O., Naumenko O.A. Silovi kabeli niz'koi ta seredn'oi naprugi. Konstruyuvannya, tehnologiya, yakist'. Harkiv: Region-Infom.2000. - С. 270-289. 4. Larina E.T. Silovye kabeli i kabel'nye linii: [uch. posobie dlya vuzov] - M.: `Energoatomizdat, 1984. - 368 s.

Надійшла 07.05.2013

Золотарев Владимир Михайлович, д.т.н., доц.
Т.Ю. Антоненц
ПАО "Завод Южкабель"
61099, Харьков, ул. Автогенная, 7
тел. (057) 7545248
e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Zolotaryov V.M., Antonets T.Yu.
Dynamics of high-voltage plastic-insulated power cable heating.
Results of power cable capacity computations for the voltage of 220 kV are analyzed. The work deals with developing a current rating computation system for high-voltage cross-linked polyethylene power cables.
Key words – power cables, plastic insulation, current rating computation.