

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

ДО ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз результатів розрахунку пропускної спроможності силових кабелів на напругу 110 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією. Показано, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією із зменшенням товщини ізоляції (відповідно зменшується тепловий опір ізоляції) пропускна спроможність кабелю може збільшуватись і зменшуватись.

Ключові слова: високовольтний силовий кабель, зшитий поліетилен, навантажувальна спроможність.

Постановка проблеми. Важливою споживчою властивістю силових кабелів є спроможність до перевантаження. Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією характерними особливостями є: більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює особливості при визначенні перевантажувальної спроможності таких кабелів. Динаміка їх нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції, що не дозволяє без перевірки застосовувати відому експоненційну модель нагрівання кабелю впродовж часу t : $\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)]$, де β – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір $\beta = C \cdot S$. Необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, але модель для застосування цього методу для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією в нормативній документації відсутня.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] нами показано, що доцільно, при визначенні перевантажувальної спроможності цих кабелів, порівнювати рішення, одержані за допомогою універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну. Зокрема застосування відомого методу зосереджених теплоємностей [2, 3]. В [1] показано, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією з великим перерізом струмопровідної жили, різниця між результатами, одержаними за допомогою різних моделей є досить сут-

© Л.А. Шебенюк, Т. Ю. Антоненць. 2014

тєвою для визначення перевантажувальної спроможності кабелю. Додаткові питання виникають щодо кабелів з оболонкою з полівінілхлоридного пластику (ПВХ), призначених для застосування в пожеже-небезпечних умовах, оскільки питомий тепловий опір ПВХ суттєво більший, ніж у поліетилену. 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 [4].

Тому для перевірки відповідності результатів розрахунків, виконаних за різними моделями, необхідним є експериментальне визначення критичної точки на кривій нагрівання конкретного кабелю в умовах заданого перевантаження.

Ціль і задачі дослідження. В межах застосування методу зосереджених теплоємностей запропонувати розрахункову модель для визначення динаміки нагрівання високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією марки АПвЭВнгд 1×500/95 – 110, прийнятну для визначення його перевантажувальної спроможності. Для цього: 1) виконати експеримент по визначенню критичної точки на кривій нагрівання кабелю в умовах заданого перевантаження; 2) порівняти динаміку нагрівання кабелю, визначену за різними розрахунковими моделями методу зосереджених теплоємностей, з результатами експерименту.

Основний матеріал дослідження. За найпростішою моделлю в межах методу зосереджених теплоємностей ізоляцію кабелю представляють у вигляді двох зон із рівними величинами теплового опору $S_{i11} = S_{i12} = S_{i3}/2$, але з різними теплоємностями: $C_{i11} = c_{i3} \cdot \pi \cdot r(R - r)$; $C_{i12} = c_{i3} \cdot \pi \cdot R(R - r)$, де c_{i3} – питома об'ємна теплоємність ізоляції. Відповідну схему наведено на рис. 1.

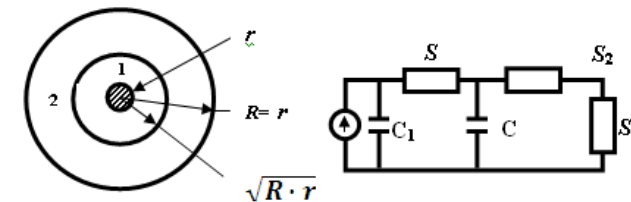


Рис. 1 - Схема моделі нагрівання ізолюваного проводу в повітрі та відповідна схема заміщення

Параметри схеми визначає коефіцієнт p (коефіцієнт Ван Вормера [3]): $p = [\ln(R/r)]^{-1} - [(R/r) - 1]^{-1}$; $S_1 = S_{i11}$; $S_2 = S_{i12}$; $C_1 = p C_{i11} + C_{ж}$; $C_2 =$

$(1-p) C_{i31} + C_{i32}$. Модель нагрівання кабелю за застосування цього методу є сумою двох експонент:

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

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

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при $t = 0, \tau = 0$, перегрів проводу в момент t : описує (1), 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 коротко-термінового (менше 1 години) режиму нагрівання.

Для кабелів з ПВХ оболонкою з урахуванням і теплового опору оболонки і теплового опору ґрунту навколо кабелю необхідно врахувати наявність двох зон із рівними величинами теплового опору $S_{o61} = S_{o62} = S_{o6} / 2$, але з різними теплоємностями: $C_{o61} = c_{o6} \cdot \pi \cdot r_{o6} (R_{o6} - r_{o6})$; $C_{o62} = c_{o6} \cdot \pi \cdot R_{o6} (R_{o6} - r_{o6})$, де c_{o6} – питома об'ємна теплоємність оболонки. Відповідну схему наведено на рис.2

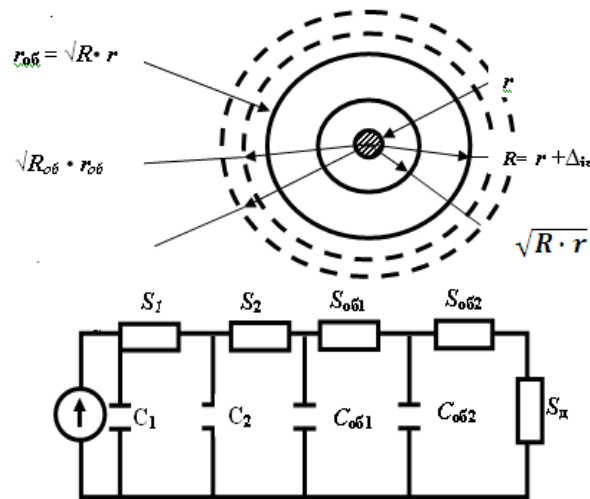


Рис. 2 - Схема моделі нагрівання ізолюваного проводу в оболонці із значним тепловим опором та відповідна схема заміщення (електропровідний екран кабелю не заземлений)

Параметри схеми на рис. 2 визначає коефіцієнт p_{o6} (коефіцієнт Ван Вормера для оболонки [3]: $p_{o6} = [2 \ln(R_{o6} / r_{o6})]^{-1} - [(R_{o6} / r_{o6}) - 1]^{-1}$).

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при $t = 0, \tau = 0$, перегрів в момент t : описує (1), 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 коротко-термінового (менше 1 години) режиму нагрівання;

$$S_1 = S_{i31}; S_2 = S_{i32} + S_{o6}; C_1 = p C_{i31} + C_{ж};$$

$$C_2 = (1-p) C_{i31} + C_{i32} + [(C_{o61} + C_{o62}) \cdot p_{o6} + C_e] \cdot (S_{o6} / S_2)^2,$$

де C_e – теплоємність електропровідного екрану;

C_{o61}, C_{o62}, S_{o6} – спільні параметри ПВХ – оболонки і зони ґрунту навколо кабелю з підвищеним тепловим опором.

Результати відповідних розрахунків та співставлення їх з результатом експерименту ілюструє рис.3. При розрахунках коефіцієнт теплопередачі в повітря вибрано за рекомендацією міжнародних нормативних документів [4].

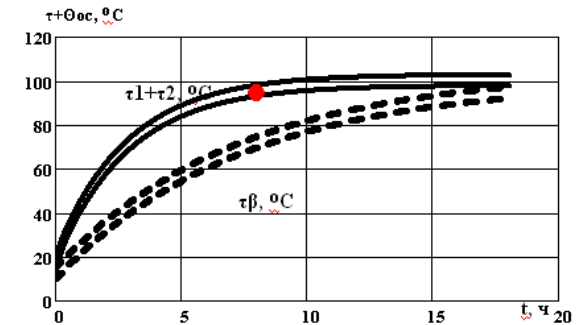


Рис. 3 – Криві нагрівання кабелю АПвЭВнгд 1×500/95 – 110 в умовах підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю товщиною 5 мм, температури оточуючого повітря $(12,5 \pm 2,5) ^\circ\text{C}$, струм 910 А: суцільні криві – розрахунок за моделлю (1) та рис. 2;

штрихові криві – розрахунок за експоненційною моделлю нагрівання кабелю впродовж часу t : $\tau = \tau_{\max} [1 - \exp(-t/\beta)]$, де β – постійна нагрівання, струм 910 А; точка – температура через 8 годин

Одержані результати дали підставу використати модель (1) і схему заміщення на рис. 2 для розрахунку гранично допустимого струму та перевантажувальної спроможності кабелю в даних умовах та співставити результати з відповідними даними для номінальних умов.

Номинальний струм кабелю АПвЭВнгд 1× 500/95 – 110 без підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю та за температури оточуючого повітря від $(12,5 \pm 2,5)$ °С, розрахований за [4] становить від 913 А до 943 А. В тих же умовах та за підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю товщиною 5 мм гранично допустимий струм за [4] становить від 833 А до 860 А. Різниця суттєва і свідчить про те, що для конкретних умов прокладання потужних високовольтних кабелів необхідно враховувати можливість підвищення теплового опору навколо кабелю, наприклад при підсиханні ґрунту при тривалому нагріванні. Це відповідає вимогам нормативних документів [4], хоча там не наведено конкретних рекомендацій щодо методу розрахунку. Модель (1) і схему заміщення на рис. 2 використано для розрахунку гранично допустимого струму за різної товщини ізоляції (див. рис.4).

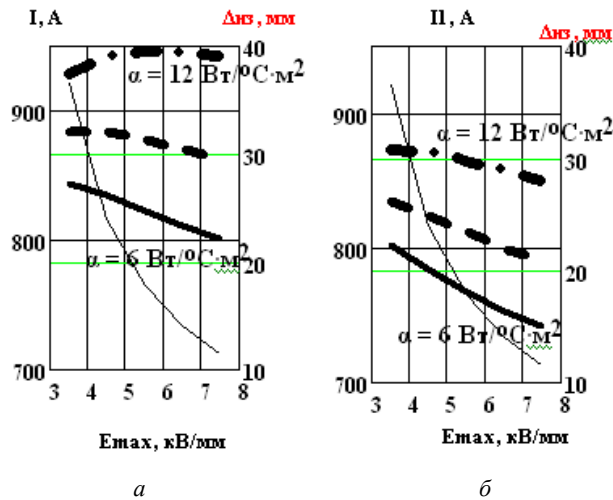


Рис. 4 – Допустимий струм кабелю залежно від максимальної напруженості електричного поля в ізоляції в діапазоні товщини ізоляції від 10 мм (8 кВ/мм) до 30 мм (4 кВ/мм) за різних значень коефіцієнту теплопередачі з поверхні α в діапазоні від $6 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ до $12 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ (рекомендовано $10 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ [4]): *a* – в повітрі; *б* – в повітрі за підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю товщиною 5 мм

Дані рис.4 свідчать про те, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією із зменшенням товщини ізоляції (відповідно зменшується тепловий опір ізоляції) пропускна спроможність кабелю може збільшуватись (див. а) при $\alpha = 12 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$) і зменшуватись

(див. б) при $\alpha = 6 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ і б) при всіх вибраних значеннях α). Характер вказаної залежності визначають умови прокладання. Цей, на перший погляд, «неправильний результат» можна пояснити особливістю конструкції високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією. Більша, порівняно із традиційними конструкціями, товщина ізоляції, більші значення площі перерізу струмопровідних жил зумовлюють те, що пропускну спроможність сильніше впливає площа поверхні ізоляції, ніж її товщина. При відносному зменшенні товщини ізоляції зменшується площа її поверхні, яка визначає передачу тепла до захисних елементів конструкції кабелю і, відповідно, відведення тепла з його поверхні. Ці дані свідчать про цілий ряд особливостей відведення тепла в оточуюче середовище для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, які прямо впливають на їх пропускну і відповідно перевантажувальну спроможність.

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 кінетика нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції. 3) Експериментальне дослідження нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості цих кабелів свідчить про те, що для кабелів з ПВХ оболонкою з урахуванням і теплового опору оболонки і підвищеного теплового опору навколо нагрітого кабелю, необхідно застосовувати метод зосереджених теплоємностей і щодо ізоляції, і щодо захисних покривів. 4) Запропоновано і експериментально перевірено розрахункову модель, що враховує наявність двох зон в ізоляції і двох зон в захисних покривах. Зони в цих шарах мають однаковий тепловий опір, але відрізняються геометричними параметрами і теплоємностями. 5) Показано, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією із зменшенням товщини ізоляції (відповідно зменшується тепловий опір ізоляції) пропускна спроможність кабелю може збільшуватись і зменшуватись і характер вказаної залежності визначають умови прокладання. Ця особливість пояснена особливостями конструкції таких кабелів.

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.** Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии: [учебн. Пособие для вузов]/ Э.Т. Ларина – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с. **3.** Карпушенко В.П. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість/ В.П. Капушенко, Л.А. Щепенюк, О.А. Науменко, Антонеч Ю.О.; Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. **4.** 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..

1. Shhebenjuk L.A. Antonec' T.Ju. Do viznachennja propusknoї spromozhnosti visokovol'tnih silovih kabeliv z plastmasovoju izoljacieju. *Vistnik NTU «HPI»*. – Kharkiv: NTU «HPI», No. 42. 2011. 43 – 46. Print. **2.** Larina Je.T. *Silovye kabeli i kabel'nye linii*. Moscow.: Jenergoatomizdat. 1984. **3.** Karpushenko V.P. L.A. Shhebenjuk, O.A. Naumenko, Antonec' Ju.O *Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi naprugi. Konstrujuvannja, tehnologija, jakist'*. Harkiv: Region-Inform. 2000. **4.** DSTU IEC60287-1-1:2012. KABELI ELEKTRICHNI. Obchislennja nominal'noi sili strumu. Chastina 1 – 1. Spivvidnoshennja dlja obchislennja nominal'noi sili strumu (koefficient navantazhennja 100 %) i obchislennja vtrat . Zagal'ni polozhennja..

Поступила (received) 14.09.2014