

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

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ З ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз результатів розрахунків пропускної спроможності силових кабелів на напругу 220 кВ.

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей на напряжение 220 кВ.

The analysis of datas of calculation of the current rating of cables at direct voltages up to 220 kV.

Постановка проблеми. Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах. В практиці користуються, як правило готовими таблицями, які є досить уніфіковані для цілих груп кабелів. Оскільки номенклатура кабелів є дуже широкою і постійно змінюється, проблема визначення пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією є вкрай актуальною. Особливо з огляду на їх відносно високу собівартість, притаманну інноваційному виробництву.

Аналіз літератури. Процеси тепломасообміну в кабелях при їх експлуатації і виготовленні розглядають за допомогою формул (моделей), однакових за своєю структурою і таких, що включають як базові, різницю потенціалів (електричних, теплових, концентрації речовини, тиску), потік, опір, провідність [1]. 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 диференційних рівнянь є досить універсальним і уніфікованим [2].

Пропускна спроможність силових кабелів визначається саме процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах, але практично застосовні розрахункові моделі включають дуже велику кількість припущень і експериментально визначених оцінок конкретних параметрів моделі [3]. 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 [4].

Ця серія разом з необхідними нормативними посиланнями в кожному з стандартів, поточними змінами до них включає кілька десятків

нормативних документів, в кожному з яких зазначені широкі діапазони значень параметрів розрахункових моделей для традиційних конструкцій кабелів та умов їх застосування. Тому практичне визначення пропускної спроможності для інноваційної продукції безпосередньо за цією нормативною базою неможливе.

Ціль роботи. Розробка методу 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.

Одержані результати. На рисунку 1 наведені результати розрахунку за допомогою традиційних моделей деяких з основних тенденцій змінювання споживчих властивостей силового кабелю із поліетиленовою зшитою ізоляцією на напругу 220 кВ. Для розрахунків використано найпростіші моделі радіального електричного і теплового полів в однорідній ізоляції одиночного кабелю з багатопроволочною мідною жилою несегментальної конструкції з коефіцієнтом заповнення 0,95. Максимальна допустима температура ізоляції 90 °С. Основні джерела тепла – жила та ізоляція з відповідними лінійними залежностями від температури електричного опору провідника та фактору втрат в ізоляції. Теплопровідність захисних покривів та навколишнього середовища незмінні.

Видно, що суттєве зменшення максимальної напруженості електричного поля (а отже – підвищення надійності ізоляції в експлуатації) шляхом збільшення товщини ізоляції неодмінно супроводжується зменшенням на кілька відсотків гранично допустимого струму та збільшенням майже в два рази вартості матеріалу ізоляції. А використання більших перерізів жили крім підвищення пропускної спроможності кабелю зумовлює зростання вартості матеріалу жили, що використовується неефективно через явище скін-ефекту і відповідне збільшення електричного опору.

Таким чином, навіть в разі застосування гранично спрощених моделей визначення пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, необхідне одночасне застосування моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

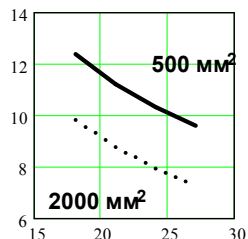
На рисунку 2 наведено приклад такого одночасного застосування електричної і теплової моделей у вигляді системи двох нелінійних рівнянь, що вирішуються разом (пакет MathCad).

Результати рішення моделі, представленої на рис.2 для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю перерізом 625 мм² на напругу 220 кВ свідчать, що зменшення напруженості, наприклад, з 10 кВ/мм до 8 кВ/мм вимагає збільшення

товщини ізоляції майже в півтори рази (рис.3 б) і при цьому на декілька відсотків зменшується пропускна спроможність кабелю (рис.3 а). Причому про-пускна спроможність зменшується нелінійно: крутіше в діапазоні відносно менших значень напруженості (в області підвищеної надійності ізоляції) (рис.3 а).

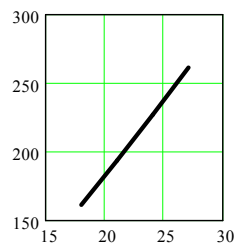
З усіх застосованих спрощень тільки несегментальна конструкція жили зменшує пропускну спроможність кабелю, але суттєво ускладнює його технологію виготовлення, що потребує окремого розгляду. Інші спрощення дають можливість аналізувати по суті «найкращий сценарій» щодо тенденції змінювання споживчих властивостей кабелю.

Максимальна напруженість в ізоляції, кВ/мм



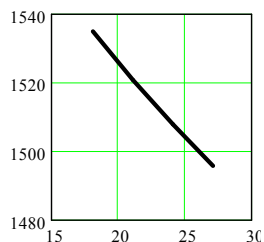
Товщина ізоляції в мм для перерізів жили в мм²

Вартість матеріалу ізоляції, грн/м



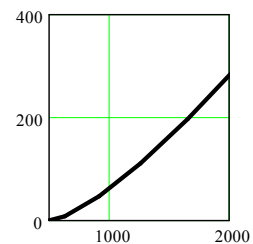
Товщина ізоляції, мм

Максимально допустимий струм, А



Товщина ізоляції, мм

Вартість матеріалу жили, що неефективно використовує, грн/м



Площа перерізу жили, мм²

Рис. 1 – Деякі з основних тенденцій змінювання споживчих властивостей силового кабелю із поліетиленовою зшитою ізоляцією на напругу 220 кВ

Конструктивні

$$F := 625 \quad \Delta zp := 5 \quad \eta := 0.95 \quad r := \left(\frac{F}{\pi \cdot \eta} \right)^{0.5} \quad \Delta iz := 20$$

$$\gamma cu := 8.89 \quad \Delta e := 1 \quad \gamma iz := 1 \quad re := r + 2 \cdot \Delta e$$

Теплові

$$\Theta 1 := 90 \quad \Theta 2 := 25 \quad \Delta \Theta := \Theta 1 - \Theta 2$$

$$\sigma iz := 3.7 \quad \sigma zp := 4 \quad \alpha := 8$$

Електричні

$$\rho 20 := 0.017210^{-6} \quad I := 600$$

$$f := 50 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \rho \Theta := \rho 20 \cdot \left[1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (\Theta 1 - 20) \right]$$

$$\mu 0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad a := \left(2 \cdot \frac{\rho \Theta}{\mu 0 \cdot \omega} \right)^{0.5} \cdot 10^3 \quad R := \frac{\rho \Theta}{F \cdot 10^{-6}}$$

$$\varepsilon := 2.3 \quad Emax := 10 \quad Fef := a \cdot \pi \cdot (2 \cdot r - a) \quad Rper := \frac{\rho \Theta}{Fef \cdot 10^{-6}}$$

$$\delta 0 := 8.8510^{-12} \quad C := (2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \delta 0) \cdot \left[\ln \left[\frac{(r + \Delta e + \Delta iz)}{(r + \Delta e)} \right] \right]^{-1} \quad \tan := 0.001$$

$$U := 220000$$

Економічні

$$Ccu := 50000 \quad mcu := \gamma cu \cdot (F \cdot 10^{-6}) \quad gcu := Ccu \cdot mcu \quad Csr := 50000$$

$$Ciz := 50000 \quad \gamma sr := 4 \quad Fiz := \Delta iz \cdot \pi \cdot \left[2 \cdot r + \frac{(\Delta iz + 2 \cdot \Delta e)}{2} \right]$$

$$miz := \gamma iz \cdot (Fiz \cdot 10^{-6}) \quad griz := Ciz \cdot miz \quad Zatr := 5000$$

Система з електричної (1), теплової (2) і економічної (3) моделей:

Given

$$Emax = \frac{U \cdot 10^{-3}}{r \cdot \ln \left[\frac{(r + \Delta e + \Delta iz)}{(r + \Delta e)} \right]} \cdot 0.5$$

$$I = \left[\frac{\Delta \Theta - \frac{U^2 \cdot \omega \cdot C}{3 \cdot \tan^{-1}} \cdot \left[\frac{\sigma iz}{\pi \cdot 4} \cdot \ln \left(\frac{re + \Delta iz}{r} \right) + \frac{0.5 \cdot 10^3}{\pi \cdot \alpha \cdot (re + \Delta iz + \Delta zp)} + \frac{\sigma zp}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{re + \Delta iz + \Delta zp}{re + \Delta iz} \right) \right]}{Rper \cdot \left[\frac{\sigma iz}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{re + \Delta iz}{r} \right) + \frac{0.5 \cdot 10^3}{\pi \cdot \alpha \cdot (re + \Delta iz + \Delta zp)} + \frac{\sigma zp}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{re + \Delta iz + \Delta zp}{re + \Delta iz} \right) \right]} \right]^{0.5}$$

$$Zatr = Csr \cdot \gamma sr \cdot \pi \cdot (re + \Delta iz + \Delta zp)^2 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Рішення системи відносно вибраних невідомих: допустимого струму товщини ізоляції затрат на матеріали}$$

$$\text{Find}(I, \Delta iz, Zatr) = \begin{pmatrix} 1.267 \times 10^3 \\ 21.744 \\ 1.173 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Рис.2 - Проста модель для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією

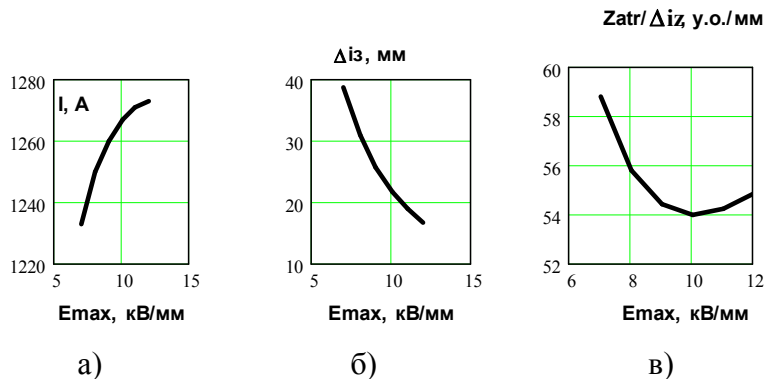
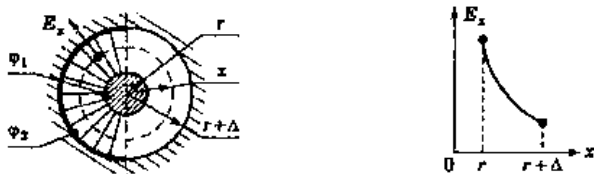


Рис.3 – Результати спільного рішення електричної, теплової і економічної моделей для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю

Очевидно, що рішення має прийматись з урахуванням його економічної вартості.

Те, що зменшення напруженості електричного поля за рахунок збільшення товщини ізоляції зумовлює збільшення витрат на матеріали, є тривіальним. А от досить виразний оптимум питомих витрат на матеріали в діапазоні товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм (рис.3 в). і відповідність цього діапазону тому факту, що при подальшому зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю (рис.3 а) є важливим результатом саме спільного вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.



E_x — напруженість атектричного поля в ізоляції на відстані x від центру жили; r — радіус жили (з урахуванням товщини екрану для екранованих жил); Δ — товщина ізоляції; ϕ — потенціал; $U = \phi_1 - \phi_2$ — різниця потенціалів

Рис. 4 - Схема простої моделі радіального електричного поля при змінному струмові, яка складає систему на рисунку 2 та схема відповідного графіка розподілу напруженості поля в ізоляції

За цим слід додати, що:

- прості моделі, які складають систему, можна ускладнювати, залежно від необхідності врахування особливостей конструкції кабелю, умов його прокладання і економічних реалій конкретного виробника;

- до системи можуть і повинні бути залучені технологічні моделі, які пов'язують технічні та споживчі параметри кабелю з його технологічними параметрами; очевидно, що зв'язок з економічною складовою системи, а значить і необхідність спільного вирішення, посиляться;

- постійною турботою користувача має стати доцільне спрощення системи, як з огляду на принципіву наближеність числових методів її вирішення, так і для забезпечення можливості технічного аналізу результатів.

Висновки. Показано, що для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю. Наведене відповідне рішення для одножилного кабелю перерізом 625 мм^2 на напругу 220 кВ. Встановлено, що оптимальний діапазон товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм і при зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю. Визначені перспективні напрямки розвитку запропонованого методу визначення пропускної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією.

Список літератури: 1. *Леонов В.М.* 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. 2. *Брагин С.М.* Электрический и тепловой расчет кабеля / С.М. Брагин. – М.: Энергоатомиздат, 1960. – 328 с. 3. *Карпушенко В.П.* Силовые кабели низкой та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: підруч. для студ. вузів / В.П.Карпушенко, Л.А. Щербенюк, Ю.О. Антоненць, О.А. Науменко – Харків.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с. 4. ДСТУ ІЕС 60287 – 1, 2, 3. Електричні кабели. Розрахунок номінального струму.

Надійшла до редколегії 03.11. 2010