

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

### **ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ З ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей напряжением 220 кВ.

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей напряжением 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 диференціальних 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 покриттів 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 мм<sup>2</sup> 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 пропускна спроможність зменшується нелінійно: крутіше в діапазоні відносно менших значень напруженості (в області підвищеної надійності ізоляції) (рис.3а).

З усіх застосованих спрощень тільки несементальна 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 тенденцій змінювання споживчих властивостей кабелю.

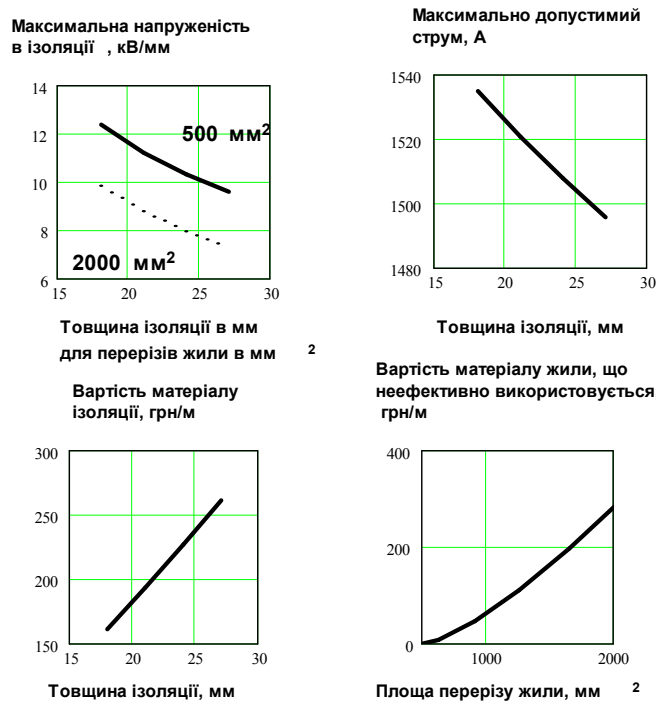
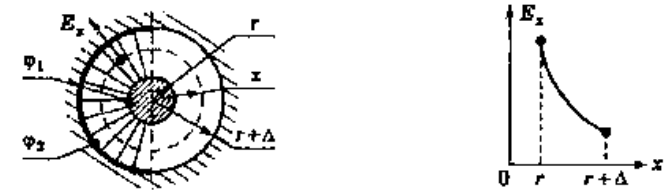


Рис. 1 – Деякі з основних тенденцій змінювання споживчих властивостей силового кабелю із щитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 220 кВ

Те, що зменшення напруженості електричного поля за рахунок збільшення товщини ізоляції зумовлює збільшення витрат на матеріали, є тривіальним і впливає з моделі радіального електричного поля при змінному струмові, яка представлена на рисунку 2.



$E_x$  — напруженість атектричного поля в ізоляції на відстані  $x$  від центру жили;  $r$  — радіус жили (з урахуванням товщини екрану для екранованих жил);  $\Delta$  — товщина ізоляції;  $\varphi$  — потенціал;  
 $U = \varphi_1 - \varphi_2$  — різниця потенціалів

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

Очевидно, що технічне рішення має прийматись з урахуванням електричної, теплової та економічної моделей, які складають систему. Така система представлена на рисунку 3. Вона дозволяє одночасно враховувати конструктивні, електричні, теплові і економічні параметри кабелю. Модель можна ускладнювати, залежно від необхідності врахування особливостей конструкції кабелю, умов його прокладання і економічних реалій конкретного виробника.

Результати розрахунків за моделлю, представленою на рисунку 3, наведено на рисунку 4. Досить виразний оптимум питомих витрат на матеріали в діапазоні товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм (рис.4 в). і відповідність цього діапазону тому факту, що при подальшому зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю (рис.4 а) є важливим результатом саме спільного вирішення окремих відомих розрахункових моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

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 принципову наближеність числових методів її вирішення, так і для забезпечення можливості технічного аналізу результатів.

**Конструктивні**

F := 625    Δzp := 5    η := 0.95    Δiz := 20  
γcu := 8.89    Δe := 1    γiz := 1    re := r + 2·Δe

**Теплові**

Θ1 := 90    Θ2 := 25  
σiz := 3.7    σzp := 4    α := 8    ΔΘ := Θ1 - Θ2

**Електричні**

ρ20 := 0.0172·10<sup>-6</sup>    I := 600  
f := 50    ω := 2·π·f    ρΘ := ρ20·[1 + 4·10<sup>-3</sup>·(Θ1 - 20)]    R :=  $\frac{\rho\Theta}{F \cdot 10^{-6}}$   
μ0 := 4·π·10<sup>-7</sup>    a :=  $\left(2 \cdot \frac{\rho\Theta}{\mu_0 \cdot \omega}\right)^{0.5} \cdot 10^3$     Rper :=  $\frac{\rho\Theta}{Fef \cdot 10^{-6}}$   
ε := 2.3    Emax := 10    Fef := a·π·(2·r - a)    Rper :=  $\frac{\rho\Theta}{Fef \cdot 10^{-6}}$   
ε0 := 8.85·10<sup>-12</sup>    C := (2·π·ε·ε0)·ln $\left[\frac{(r + \Delta e + \Delta iz)}{(r + \Delta e)}\right]$     tan := 0.001  
U := 220000

**Економічні**

Ccu := 50000    mcu := γcu·(F·10<sup>-6</sup>)    gcu := Ccu·mcu    Csr := 50000  
Ciz := 50000    γsr := 4    Fiz := Δiz·π·[2·r +  $\frac{(\Delta iz + 2\cdot\Delta e)}{2}$ ]  
miz := γiz·(Fiz·10<sup>-6</sup>)    griz := Ciz·miz    Zatr := 5000

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

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

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

Zatr = Csr·γsr·π·(re + Δiz + Δzp)<sup>2</sup>·10<sup>-6</sup>    Find (I, Δiz, Zatr) =  $\begin{pmatrix} 1.267 \times 10^3 \\ 21.744 \\ 1.173 \times 10^3 \end{pmatrix}$

Рішення системи відносно вибраних невідомих: допустимого струму товщини ізоляції, затрат на матеріали

Рис. 3 – Проста модель для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією

Очевидно, що набір моделей може бути різним, оскільки конкретні значення допустимого струму залежать від багатьох параметрів, наприклад, **конструктивних**: товщина ізоляції, напівпровідних екранів, електропровідного екрану, захисних елементів конструкції кабелю; параметри конструкції жили: коефіцієнт скрутки, сегментальність; **теплових**: температура мідного екрану, діапазон значень питомого теплового опору вологого ґрунту, питомий тепловий опір захисних покривів; допустима температура довкілля; **технологічних**: коефіцієнт

заповнення перерізу жили, коефіцієнт нагартовки, технологічна витяжка, **електричних**: напруга, діелектрична проникність ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат ізоляції і його залежність від температури. Спільне вирішення таких моделей дає можливість прийняття оптимальних технічних рішень.

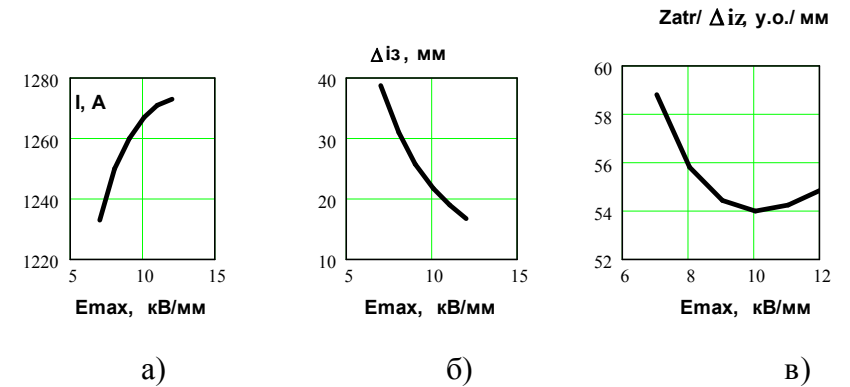


Рис.4 – Результати спільного рішення електричної, теплової і економічної моделей для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю: а – тривало допустимий (номінальний) струм; б – товщина ізоляції; в – відношення затрат на матеріал ізоляції до її товщини

**Висновки.**

1) 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.

2) Наведене відповідне рішення для одножильного кабелю перерізом 625 мм<sup>2</sup> 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.

3) Визначені перспективні напрямки розвитку запропонованого методу визначення пропускної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією.

**Список літератури:** 1. 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. – М.: Энергоатомиздат, 1960. – 328 с. 3. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість [підруч. для студ. вузів] / В.П. Карпушенко, Л.А. Щепенюк, Ю.О. Антоненко, О.А. Науменко – Харків.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с. 4. ДСТУ ІЕС 60287 – 1, 2, 3. Електричні кабелі. Розрахунок номінального струму.

Надійшла в редколегію 06.10.2011