

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

ВИКОРИСТАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ЩОДО ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ З ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

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

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

The analysis of datas 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.

Постановка проблеми. Найважливішою споживчою властивістю силових кабелів, яка визначає його ліквідність, є спроможність до навантаження та перевантаження (в подальшому, - пропускна спроможність). За цим наступною за важливістю є ціна. Остання формується, в першу чергу, на основі фактичних витрат на виробництво, тобто в рамках бухгалтерського підходу. При економічному підході необхідний аналіз так званих «невикористаних можливостей», який може бути виконаний тільки включенням економічного аналізу в процес прийняття технічних рішень. Це особливо актуально для інноваційної кабельної продукції, якою є зокрема високовольтні силові кабелі з пластмасовою ізоляцією. Для розрахунку пропускної спроможності таких кабелів необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. 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. Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах, тобто в стаціонарному режимі навантаження (100 % -ний коефіцієнт навантаження) [2].

Відповідно, номінальний струм $I_{ном}$, - це необмежене тривалий, незмінний струм, за якого встановлюється максимальна температура жили при визначених незмінних умовах оточуючого середовища. Практично застосовні розрахункові моделі для визначення $I_{ном}$ включають велику кількість припущень і експериментально визначених оцінок конкретних параметрів моделі. 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.

В [1] показана можливість застосування для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією спільного вирішення пов'язаних між собою моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю. При цьому в якості економічної складової системи застосовано просто обчислення ціни матеріалу ізоляції. Те, що за результатами рішення системи вартість матеріалу ізоляції на одиницю її товщини в залежності від максимальної напруженості електричного поля має виразний мінімум, зумовило пошук більш адекватної економічної моделі для використання в подальшому дослідженні. Зокрема, в системі рівнянь, використаній в [1], не враховано вплив максимальної напруженості електричного поля на вартість ізоляції. Такий вплив може виявитися визначальним для прийняття технічного рішення.

Ціль і задачі дослідження. Аналіз впливу максимальної напруженості електричного поля в ізоляції на економічну складову системи рівнянь, що складається з моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю. Перевірка впливу максимальної напруженості електричного поля в ізоляції на економічну складову результатів вирішення системи при визначенні пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією.

Основний матеріал дослідження. 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. 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. В

циліндричних координатах (r, θ, z) , найбільш прийнятних для опису процесів тепломасообміну в кабелях, для потенціалу φ застосовують рівняння Пуассона:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

в якому, якщо потенціал залежить тільки від радіусу (радіальне поле), другий і третій доданки в лівій частині дорівнюють нулю, тоді:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0, \quad \int \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0, \quad r \frac{\partial \varphi}{\partial r} + A = 0, \quad (2)$$

де постійна інтегрування A , яка за умов, що при $r = r_1$, $\varphi = \varphi_0$ і при $r = r_2$, $\varphi = 0$ ($r_1 < r_2$), дорівнює: $A = \varphi_0 / \ln \frac{r_2}{r_1}$ і відповідно градієнт потенціалу обернено пропорційний до радіусу:

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \varphi_0 / r \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (3)$$

Відповідно основною розрахунковою моделлю, що використовується в нормативних матеріалах кабельної техніки, є модель радіального силового поля, під дією якого відбуваються процеси переносу:

- зарядів (різниця потенціалів U , В; електричний струм I , Кл/с);
- теплової енергії (різниця температур τ , К; тепловий потік P , Дж/с);

Модель радіального теплового потоку у стаціонарному тепловому режимі, використана в усіх відомих нормативних документах для обчислення номінального струму силових кабелів.

Виходячи з того основного правила, що максимальна температура ізоляції θ_1 не повинна перевищувати допустиму, а температура зовнішньої ізотерми θ_2 відома за умовами прокладання, встановлюють гранично допустиму потужність теплового потоку $P_{дон}$:

$$P_{дон} \leq \frac{\tau}{\delta} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\sigma \ln(r_2/r_1)/2\pi} = \frac{2\pi(\theta_1 - \theta_2)}{\sigma \ln(r_2/r_1)}, \quad (4)$$

де σ — питомий тепловий опір матеріалу між двома коаксіальними ізотермами з температурами θ_1 і θ_2 так, що $\theta_1 > \theta_2$.

Оскільки $P_{дон} = I_{дон}^2 \cdot R_g(\theta_1)$, де $R_g(\theta_1)$ — електричний опір жили за температури θ_1 , необмежене довготривалий струм в жилі, якщо тепло виділяється тільки в ній, визначає формула:

$$I_{дон} = \sqrt{\frac{\theta_1 - \theta_2}{R_g(\theta_1) \sigma \ln(r_2/r_1)/2\pi}}, \quad (5)$$

де вираз $\sigma \ln(r_2/r_1)/2\pi$ — це тепловий опір матеріалу між двома коаксіальними ізотермами з температурами θ_1 і θ_2 .

Загальна розрахункова модель, описана співвідношеннями (4) і (5), відображає загальний принцип розрахунку тривало допустимого струму кабелю. Для конкретного типу кабелю має бути визначена відповідна схема заміщення теплового потоку, що відповідає особливостям конструкції саме цього типу. Наприклад, для одножильного силового

кабелю із поліетиленовою зшитою ізоляцією на напругу 220 кВ, в (5) необхідно додатково врахувати втрати в ізоляції і в електропровідних екранах, а при визначенні електричного опору жили врахувати вплив вихрових струмів в жилі і особливості конструкції жили. В [1] наведені відповідні конкретні розрахункові моделі.

Незалежно від конкретних особливостей конструкції, якщо, наприклад, збільшується допустима максимальна напруженість електричного поля в ізоляції, то: 1) зменшуються її товщина, а значить об'єм і вартість; 2) зменшується радіус r_2 в (5), а значить збільшується пропускна спроможність. Подібні висновки випливають з розгляду окремих моделей. Якщо ж застосувати спільне рішення відповідної системи, то на результат може суттєво вплинути, наприклад, те, що значне зменшення радіусу r_2 в (5) може настільки збільшити тепловий опір навколишнього середовища, що пропускна спроможність кабелю зменшиться. Таким чином конкретне технічне рішення має базуватися саме на спільному вирішенні системи рівнянь.

Для перевірки взаємного впливу максимальної напруженості електричного поля в ізоляції і економічної складової з метою подальшого використання цього впливу при визначенні пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідно врахувати той очевидний факт, за напруг в кілька сотень кіловольт підвищення допустимої максимальної напруженості електричного поля в ізоляції і одночасне зменшення її товщини вимагає більших технологічних витрат на ізоляцію. Це збільшення включає кілька складових: ускладнення технології ізолювання, зокрема, - забезпечення більшої чистоти пластмаси, зменшення допусків на ексцентриситет і т.п.; підвищення вимог до точності дотримання технологічних параметрів, контролю за інструментом, чистоти виробничого приміщення і т. п.

У будь-якому разі в системі рівнянь, що розглядається, це можна врахувати як збільшення ціни на ізоляцію при збільшенні допустимої максимальної напруженості електричного поля. Щонайменше, лінійного збільшення з деяким коефіцієнтом, взятим у діапазоні, який на даному етапі знімає проблему точності визначення такого коефіцієнта. Нижче наведена проста система двох таких рівнянь, електричного (радіальне електричне поле в однорідній ізоляції) і економічного (без урахування відходів):

$$E_{max} = U/(r + \Delta e) \ln[(r + \Delta e + \Delta i) / (r + \Delta e)], \quad (6)$$

$$Z = ke (E_{max} + 3) \gamma \pi \Delta i (2r + \Delta i), \quad (7)$$

де E_{max} - допустима максимальна напруженість електричного поля; U - фазна напруга; r - радіус жили; Δe - товщина напівпровідного екрану; Δi - товщина ізоляції; Z - витрати на ізоляцію на одиницю довжини кабелю; ke - коефіцієнт лінійного збільшення ціни на ізоляцію при збільшенні

допустимої максимальної напруженості електричного поля; γ - питома маса ізоляції.

На рис.1 наведено результати вирішення системи рівнянь (6) і (7) для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю перерізом 625 мм² на напругу 220 кВ. Дані рис.1 свідчать про те, що суттєве зменшення максимальної напруженості електричного поля (а отже – підвищення надійності ізоляції в експлуатації) шляхом збільшення товщини ізоляції неодмінно супроводжується зростанням витрат на ізоляцію. Але для питомих затрат на одиницю товщини ізоляції графік має мінімум, тобто врахування збільшення ціни на ізоляцію при збільшенні допустимої максимальної напруженості електричного поля в принципі дозволяє прийняти оптимальне технічне рішення.

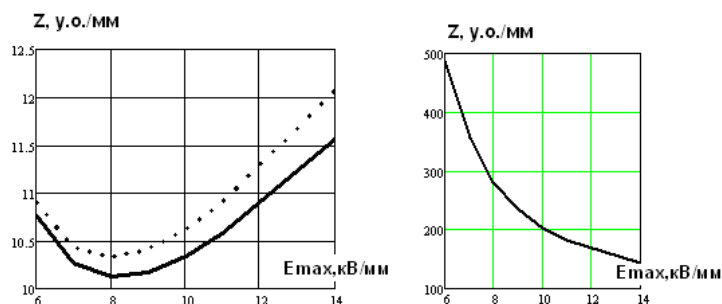


Рис. – Результати вирішення системи рівнянь (6) і (7)

Видно, що суттєве зменшення максимальної напруженості електричного поля (а отже – підвищення надійності ізоляції в експлуатації) шляхом збільшення товщини ізоляції неодмінно супроводжується значним збільшенням вартості матеріалу ізоляції (правий графік), але відношення вартості матеріалу ізоляції до її товщини (лівий графік) має виразний мінімум. Врахування того, що ізоляція, призначена для використання при більш високих градієнтах, є дорожчою (модель (7)), спричиняє зміщення відповідного мінімуму в бік менших градієнтів порівняно з одержаною в [1]. Таким чином, для прийняття економічно виважених рішень для визначення 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.

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

Висновки. Врахування того, що ізоляція, призначена для використання при більш високих градієнтах, є дорожчою (модель (7)), спричиняє зміщення відповідного мінімуму в бік менших градієнтів порівняно з одержаною в [1]. Таким чином, для прийняття економічно виважених рішень для визначення 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.

Список літератури: 1. Л.А. Щебенюк До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією / Щебенюк Л.А., Антоненко Т.Ю. // Вісник 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 витрат. Загальні положення.

Надійшла до редакції 10.04. 2012 р.