

*О.В. ГОЛИК*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

## **ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ ВПЛИВУ ВИХРОВИХ СТРУМІВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР СТРУМОПРОВІДНИХ ЖИЛ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

Наведені основні економічні аспекти впливу вихрових струмів на електричний опір струмопровідних жил високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією.

Приведены основные экономические аспекты влияния вихревых токов на электрическое сопротивление токопроводящих жил высоковольтных кабелей с сшитой полиэтиленовой изоляцией.

**Постановка проблеми.** Для струмопровідних жил високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією характерні великі значення площі поперечного перерізу (аж до 2000 мм<sup>2</sup>) і високі значення коефіцієнту заповнення жили (аж до 0,98). Тому вплив вихрових струмів на електричний опір жили при промисловій частоті настільки значний, що зумовлює застосування спеціальних сегметальних конструкцій жили для площі перерізу 400 мм<sup>2</sup> і більших.

Відповідно до діючих міжнародних стандартів [1] зменшення впливу вихрових струмів на електричний опір жили при промисловій частоті при застосуванні сегметальних жил визначають за допомогою введення в розрахункові моделі емпіричних коефіцієнтів, визначених експериментально.

Є щонайменше дві суттєві обставини, які можуть вплинути на значення таких коефіцієнтів для конкретного кабелю. Це – вибрана конкретна конструкція сегментальної жили, по-перше, і технологічна реалізація вибраної конструкції. Крім того на ефективність зменшення впливу вихрових струмів від застосування сегментальної конструкції жили впливають температурний режим роботи кабелю (глибина проникнення електромагнітного поля в метал зростає із зростанням температури) і взаємне розташування кабелів в лінії (суттєво впливає на ефект близькості).

Оскільки всі аспекти згаданих впливів в кінцевому рахунку визначають втрати енергії при передачі її по кабелю, критерієм при порівнян-

ні різних технічних рішень, напрямлених на зменшення впливу вихрових струмів на електричний опір жили при промисловій частоті має бути економічний критерій. Застосування економічних критеріїв при прийнятті технічних рішень щодо вибору жил силових кабелів рекомендовано діючими міжнародним [2] і вітчизняним [3] стандартами.

Застосування цих рекомендацій неможливе без аналізу впливу вихрових струмів на електричний опір струмопровідних жил високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією в діапазоні конкретних застосовних конструкцій сегментальних жил, по-перше. І в умовах конкретної технологічної реалізації вибраних конструкцій.

Для цього необхідний, перш за все, вибір економічного критерію впливу вихрових струмів на електричний опір жили від застосування сегментальної конструкції, впливу температурного режиму роботи кабелю і взаємного розташування кабелів в лінії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальні моделі для визначення електричного опору струмопровідних жил наведені в [1, 4]. До останніх публікацій стосовно економічних аспектів розрахунку електричного опору струмопровідних жил відносяться розроблений автором національний стандарт [3], гармонізований з відповідним міжнародним [2], в яких рекомендовано застосування цілої низки економічних складових для визначення ефективності прийняття технічного рішення щодо вибору жил силових кабелів і про конкретно сегментальні конструкції не йдеться.

В [5] запропоновано економічним критерієм при розрахунку електричного опору струмопровідних жил вважати економію кольорового металу жили у процентах до номінальної площі перерізу за діючим ГОСТ, що є доцільним для жил несегментальної конструкції, але недостатнім для сегментальних жил, призначених саме для зменшення впливу вихрових струмів на електричний опір жил з великою площею перерізу.

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 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.

**Ціль, задачі дослідження.** Дослідження впливу вихрових струмів на електричний опір жили при промисловій частоті при застосу-

ванні сегментальних жил за допомогою введення в розрахункові моделі діапазону емпіричних коефіцієнтів, наведених у нормативних джерелах для різних конструкцій зазначених жил.

Дослідження ефективності зменшення впливу вихрових струмів від застосування сегментальної конструкції жили при різних температурних режимах роботи кабелю і при різному взаємному розташуванні кабелів в лінії.

**Розрахункові співвідношення.** Електричний опір жили змінному струмові  $R_{ж\sim}$ , перевищує опір жили постійному струму, оскільки вихрові струми зумовлюють перерозподіл його густини по перерізу провідника, збільшуючи густину струму біля поверхні провідника (поверхневий ефект) та в області, що наближена до провідника із протилежно напрямленим струмом (ефект близькості):

$$R_{ж\sim} = \rho \cdot K_v \cdot K_3 [1 + \alpha(\Theta - 20)] (1 + y_n + y_6) / F, \quad (1)$$

де  $y_n$  і  $y_6$  – коефіцієнти поверхневого ефекту і ефекту близькості, які залежать від геометричних і електрофізичних параметрів кабелю;  $\rho$  – питомий електричний опір металу жили при температурі жили за 20 °С;  $K_v$  – середній коефіцієнт укрутки для багатопроволочних жил, який дорівнює:

$$K_v = (K_1 \cdot n_1 + K_2 \cdot n_2 + \dots + K_n \cdot n_n) / n, \quad (2)$$

де  $K_i$  і  $n_i$  відповідно коефіцієнт укрутки в  $i$ -тому повиві, кількість проволон в  $i$ -тому повиві:  $K_i = \sqrt{1 + (\pi/m_i)^2}$ , де  $m_i$  – коефіцієнт скрутки  $i$ -того повиву (відношення кроку скрутки до діаметру жили:  $m_i = H/d$ ;  $K_3$  – коефіцієнт укрутки при скручуванні чи ізолюваннях жил в багатожильних кабелях, чи сегментів жил у жилах великого перерізу сегментальної конструкції;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт електричного опору;  $F$  – площа поперечного перерізу металу жили.

Коефіцієнти поверхневого ефекту і ефекту близькості в першу чергу залежать від глибини проникнення  $a$  електромагнітного поля в метал жили (рис. 1):

$$a = \sqrt{\rho(\Theta)} / (\pi f \mu_0 \mu), \quad (3)$$

де  $f$  – частота;  $\mu_0$  – магнітна стала, що дорівнює  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – відносна магнітна проникність, яка для немагнітних металів дорівнює 1.

В практиці силових кабелів для визначення  $y_n$  і  $y_6$  використовують [4] спеціальні таблиці функцій аргументу  $x$ :  $F(x)$ ,  $G(x)$ ,  $H(x)$ ,  $Q(x)$ :  $x = r \sqrt{2/a}$ , де  $r$  – радіус круглої жили чи еквівалентний радіус фасонної жили;  $a$  – глибина проникнення за (3):

$$y_n = F(x), \quad (4)$$

$$y_6 = G(x) \cdot (2r/h)^2 / [1 - H(x) \cdot (2r/h)^2], \quad (5)$$

де  $h$  – відстань між центрами жил, для яких визначають ефект близькості.

Відносне збільшення електричного опору змінному струмові для різних значень площі перерізу жили (рис. 1,а) становить від кількох відсотків для значень площі перерізу (300-500) мм<sup>2</sup> до кількох десятків відсотків для площі (600-1300) мм<sup>2</sup>. Таке збільшення опору зумовлювало би значні економічні втрати, тому для жил перерізом від 400 мм<sup>2</sup> застосовують сегментальну конструкцію жили.

Вплив поверхневого ефекту на збільшення електричного опору в кілька разів перевищує вплив ефекту близькості (рис. 1,б), але ці впливи співмірні. Фізична суть коефіцієнту близькості свідчить про його принципову залежність від взаємного розташування жил кабелю чи лінії з кількох кабелів.

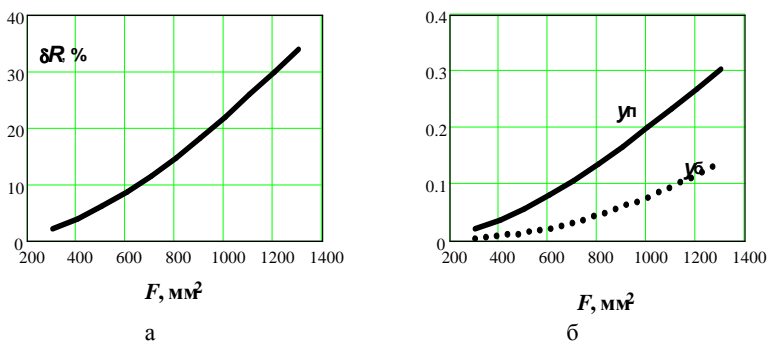


Рис. 1. Залежності характеристик впливу вихрових струмів на електричний опір жили від площі її поперечного перерізу:  
 а) для відносного збільшення опору  $\delta R$ , %; б) для коефіцієнту поверхневого ефекту  $\gamma_n$  і коефіцієнту ефекту близькості  $\gamma_b$ .

Оскільки глибина проникнення  $a$  відображає тепловий ефект струму в провіднику, її можна використати для аналізу економічних втрат  $V$  від збільшення електричного опору змінному струмові. Збільшення опору при рівномірному розподілові густини струму по перерізу жили обернено пропорційне зменшенню його перерізу:

$$V = C_i F \gamma \left[ 1 - a \pi \frac{(d - a)}{F} \right], \quad (6)$$

де  $C_i$  – ціна одиниці маси металу провідника;  $F$  – площа поперечного перерізу провідника;  $d$  – діаметр жили;  $\gamma$  – питома маса металу провідника.

Те, що проста модель (6) може надати суттєву інформацію для прийняття технічного рішення ілюструє рисунок 2, на якому видно, що

при збільшенні температури жили втрати від збільшення електричного опору змінному струмові зменшуються через збільшення глибини проникнення (на рис. 2,а) глибина проникнення кратна 0,1 мм) і чим більша площа перерізу жили, тим різниця між економічними втратами при різних температурах більша (рис. 2,б). Проста модель (6) дає можливість визначати вплив ціни металу провідника, температурного режиму роботи кабелю, площі поперечного перерізу провідника на втрати від збільшення електричного опору змінному струмові. Ця модель може бути деталізована, наприклад, виокремленням впливу поверхневого ефекту і ефекту близькості на економічні втрати та т.п. Важливо те, що моделі, які використовують для прийняття технічних рішень в масовому виробництві, мають включати в себе економічну складову, що достатньо пов'язана з електрофізичними параметрами моделі.

Крім параметрів скручування у (1), які впливають на електричний опір жили і постійному і змінному струмові, інші конструктивні особливості кабелю впливають тільки на опір змінному струмові, а отже на  $y_n$  і  $y_6$  – коефіцієнти поверхневого ефекту і ефекту близькості.

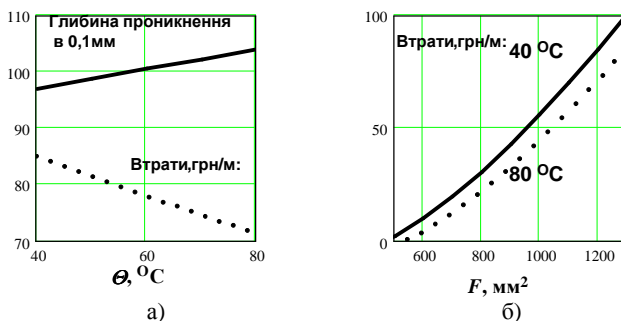


Рис. 2. Залежності економічних втрат  $V$  за (6) від збільшення електричного опору змінному струмові.

На величину  $y_n$  впливає тільки конструкція самої жили. Цей вплив визначають за допомогою коефіцієнта  $k_s$  зменшення аргументу  $x$ :

$$x_s = r (2 \cdot k_s)^{0,5} / a, \quad (7)$$

де  $k_s$  – визначений експериментально [2, 3] для конструкції жили, в якій передбачені заходи зменшення впливу вихрових струмів, наприклад, ізолювання і скручування окремих багатопроволочних сегментів в жилу;  $a$  – глибина проникнення.

На величину  $y_6$  впливають і конструкція жил, і їх взаємне розта-

шування в кабелі чи в кабельній лінії з одножильних кабелів. Вплив конструкції жили на  $y_6$  визначають подібно до наведеного для  $y_n$  за допомогою коефіцієнта  $k_p$  зменшення аргументу  $x$ , оскільки конструктивні заходи завжди напрямлені на зменшення впливу вихрових струмів на електричний опір жил:

$$x_p = r (2 \cdot k_p)^{0,5} / a, \quad (8)$$

де  $k_p$  – визначений експериментально [2, 3].

На рис. 3 наведено результати розрахунків залежностей коефіцієнтів поверхневого ефекту  $y_n$  (а) і ефекту близькості  $y_6$  (б) від площі поперечного перерізу жили для двох одножильних кабелів промислової частоти. На рис. 3 використано позначення: 1 – кругла багатопроволочна ущільнена жила і кабелі прокладені впритул; 2 – сегментальна жила з коефіцієнтами зменшення аргументу  $x$ :  $k_p = k_s = 0,4$  і кабелі прокладені впритул; 3 – кругла багатопроволочна ущільнена жила і кабелі прокладені на відстані діаметра один від одного; 4 – сегментальна жила з коефіцієнтом зменшення аргументу  $x$ :  $k_p = 0,4$ , кабелі прокладені на відстані діаметра один від одного.

Порівняння кривих на цьому рисунку свідчить про те, що і застосування сегментальної конструкції жили, і збільшення відстані між кабелями при прокладанні дозволяють значно зменшити вплив вихрових струмів на електричний опір змінному струмові в силових кабелях.

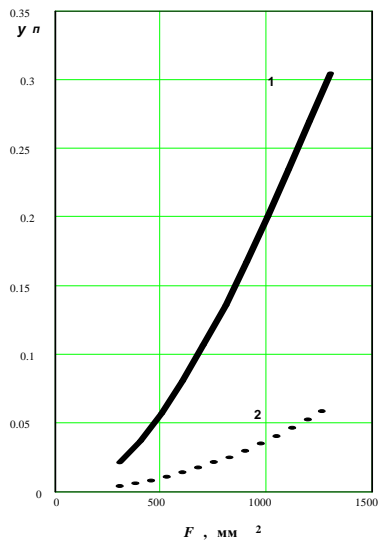
Очевидно, що критерієм доцільності застосування відповідних конструктивних рішень в кожному конкретному випадку має бути економічний критерій, подібний до наведеного (6) і введений розрахункову модель для визначення пропускної спроможності кабелю. Але в такому разі до втрат за (6) необхідно додати додаткові технологічні втрати  $V_t$  на виготовлення сегментальної жили і втрати на додаткові матеріали в такій конструкції, наприклад:

$$V = C_i F \gamma \left[ 1 - a \pi \frac{(d-a)}{F} \right] + V_t + k_m C_i m F \gamma_m, \quad (9)$$

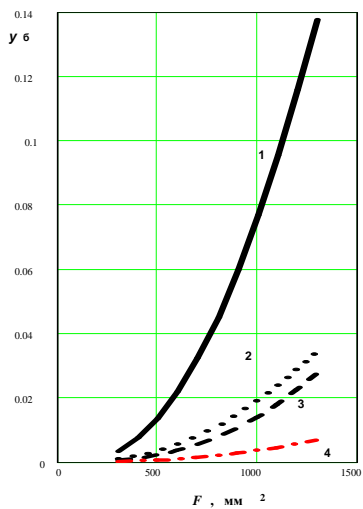
де  $k_m$  – відношення площі додаткових елементів жили до її площі перерізу;  $C_i m$  – середня ціна матеріалів додаткових елементів жили;  $\gamma_m$  – середня питома маса матеріалів додаткових елементів жили.

Виконані розрахунки свідчать, що зменшення впливу вихрових струмів на електричний опір змінному струму за рахунок застосування сегментальної конструкції жил відносно однакове і для поверхневого ефекту, і для ефекту близькості; кількісно обидві складові впливу визначають експериментально і вводять в розрахункові моделі у вигляді емпіричних коефіцієнтів.

На зменшення ефекту близькості крім застосування сегментальної конструкції жил, суттєво впливає взаємне розташування жил, наприклад, прокладання одножильних кабелів на більшій відстані один від одного.



а



б

Рис. 3. Залежності коефіцієнтів поверхневого ефекту  $u_n$  (а) і ефекту близькості  $u_b$  (б) від площі поперечного перерізу жили для двох одножильних кабелів промислової частоти.

**Висновки.** 1. Збільшення електричного опору змінному струму за рахунок впливу вихрових струмів для жил великого перерізу може досягати до 50 % від електричного опору постійному струму, тому для жил перерізом від 400 мм<sup>2</sup> і більших застосовують жили з скручених і ізольованих між собою окремих сегментів; це дозволяє зменшити вплив вихрових струмів в кілька разів.

2. Критерієм доцільності застосування відповідних конструктивних рішень в кожному конкретному випадку має бути економічний критерій, введений в розрахункову модель для визначення пропускної спроможності кабелю. Але в такому разі до втрат, пов'язаних із збільшенням електричного опору необхідно додати додаткові технологічні втрати на виготовлення сегментальної жили і втрати на додаткові матеріали в такій конструкції, наприклад. Запропонована відповідна розрахункова модель.

3. На зменшення ефекту близькості крім застосування сегментальної конструкції жил суттєво впливає взаємне розташування жил, наприклад, прокладання одножильних кабелів на відстані їх зовнішнього діаметра, зменшує вплив ефекту близькості втричі, тобто практично так само, як застосування сегментальної конструкції жил; але на поверхневий ефект таке розташування практично не впливає.

**Список літератури:** 1. IEC 60287-1-1. Electric cables. Calculation of the current rating. Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. – General. – Publication Date: 31 January 2007. – P. 34. 2. IEC 287-3-2. Electric cables. Calculation of the current rating. Sections on operating conditions. Economic optimization of power cable size. – 1995. – P. 9. 3. ДСТУ IEC 60287-3-2. Електричні кабелі. Розрахунок номінального струму. Розділи щодо умов застосування. Економічна оптимізація виду силового кабелю. – 2009. – 9 с. 4. Карпушенко В.П., Щербенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ. – 2000. – 376 с. 5. Балашов Е.П. Статистический контроль и регулирование качества массовой продукции / Е.П. Балашов, В.А. Долженков. – М.: Машиностроение, 1984. – 231 с.

*Надійшла до редколегії 01.12.2010  
Рецензент д.т.н., проф. Гурін А.Г.*