

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАГРІВАННЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА НАПРУГУ ДО 110 КВ**

*Розглянуто ряд суттєвих особливостей СПЕ-кабелів, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації, а саме: 1) більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, значення площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює суттєву залежність динаміки нагрівання від теплоємності жили і ізоляції для СПЕ-кабелів після включення; 2) більша, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °С); 3) суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури; 4) наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до 50 °С·м/Вт), що суттєво змінює динаміку нагрівання СПЕ-кабелю, а отже його перевантажувальну здатність. Представлено експериментальні дані щодо визначення різниці температури між елементами конструкції кабелів і оточуючим повітряним середовищем. Досліджено нагрівання кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією для трьох кабелів, розташованих в площині на різних відстанях один від одного. Встановлено, що температура ізоляції, прилеглої до жили, в режимі перевантаження зростає суттєво швидше, ніж температура ізоляції, прилеглої до екрану. Запропоновано використовувати адіабатний режим нагрівання кабелю струмом перевантаження, кратним номінальному, визначеному для окремого кабелю за гранично допустимої тривалої температури ізоляції, прилеглої до струмопровідної жили кабелю. Це забезпечує значне скорочення часу випробування в умовах виробництва. Робота направлена на створення методу визначення допустимого струму цих кабелів в конкретних умовах експлуатації. Бібл. 7, рис. 3.*

*Ключові слова:* силовий кабель, СПЕ-кабель, випробування на нагрів.

*Рассмотрен ряд существенных особенностей СПЭ-кабелей, которые влияют на тепловой режим как в рабочих, так и в аварийных режимах эксплуатации, а именно: 1) большие, чем у традиционных маслом наполненных кабелей, значения площади сечения жил и толщины изоляции, что обуславливает существенную зависимость динамики нагревания от теплоемкости жилы и изоляции для СПЭ-кабелей после включения; 2) большая, чем у традиционных маслом наполненных кабелей, допустимая температура изоляции (90 °С); 3) существенная зависимость теплопроводности и теплоемкости полиэтиленовой изоляции от температуры; 4) наличие элементов конструкции с высоким удельным тепловым сопротивлением (до 50 °С·м/Вт), что существенно изменяет динамику нагрева СПЭ-кабеля, а следовательно его перегрузочную способность. Представлены экспериментальные данные по определению разности температуры между элементами конструкции кабелей и окружающей воздушной средой. Три кабеля расположены в одной плоскости на различных расстояниях между ними. Исследовано нагревание кабелей со шшитой полиэтиленовой изоляцией. Предложено использование адиабатного режима нагрева кабеля током перегрузки, кратным номинальному. Работа нацелена на создание метода определения допустимого тока таких кабелей в конкретных условиях эксплуатации. Библ. 10, рис. 7.*

*Ключевые слова:* силовой кабель, СПЭ-кабель, испытание на нагрев.

**Постановка проблеми.** Практика застосування високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією (СПЕ-кабелі), які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки, свідчить про те, що найчастіше застосовують прокладання одножильних кабелів паралельно в одній площині. Такий спосіб прокладання є традиційним для високовольтних маслом наповнених кабелів. Однак до теплової асиметрії, яку зумовлює цей спосіб прокладання, для СПЕ-кабелів додається ряд суттєвих особливостей, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації:

- більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, значення площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює суттєву залежність динаміки нагрівання від теплоємності жили і ізоляції для СПЕ-кабелів після включення; згадана залежність визначає перевантажувальну здатність кабелю;

- більша, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °С), що, по-перше, зумовлює великі значення допустимого струму [1]; по-друге, значно збільшує втрати енергії за робочих температур, що вимагає окремого розгляду в економічному аспекті [2];

- суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури

(наприклад, питома теплоємність поліетилену при температурі 20 °С дорівнює 2300 Дж/кг·°С, а при 80 °С 3750 Дж/кг·°С);

- наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до 50 °С·м/Вт), що суттєво змінює динаміку нагрівання СПЕ-кабелю, а отже його перевантажувальну здатність.

Тому дослідження нагрівання високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією, прокладених паралельно в одній площині, є необхідним для прийняття технічних рішень щодо їх пропускну і перевантажувальної спроможності.

**Аналіз літератури.** Поєднання високої робочої напруженості електричного поля (до 8 кВ/мм і більше) з тривалою підвищеною температурою ізоляції (до 90 °С і більше) зумовлюють застосування тривалих і дорогих випробувань (long-term test) [3], за якими СПЕ-кабелі піддають сотням циклів нагріву (кожний по 8 годин) з одночасною дією підвищеної напруги  $1,7U_n$ ; в процесі циклів контролюють всі основні параметри:

- електричні (тангенс кута діелектричних втрат, рівень часткових розрядів);

- теплові (температура в елементах конструкції кабелю і на його поверхні).

В той же час пропускна спроможність силових кабелів визначається виключно розрахунком в номінальних умовах, тобто в стаціонарному режимі навантаження (100 % -ний коефіцієнт навантаження) [4]. Відповідно, номінальний струм  $I_n$  – необмежене тривалий, за якого встановлюється максимальна температура жили при номінальних умовах оточуючого середовища. Практично застосовані розрахункові моделі для визначення  $I_n$  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.

Оскільки способи виконання цих рекомендацій не нормовані, а в умовах експлуатації кабель практично ніколи не працює в стаціонарному гранично допустимому режимі, то для перевірки працездатності конкретних кабелів використовують або спеціальні лабораторії [5, 6], або кабель приймають під гарантії виробника. Останнє означає необхідність створення у виробника відповідних лабораторій для перевірки працездатності конкретних кабелів. Очевидно, що нормовані випробування є необхідними. Але для інноваційної продукції, яка суттєво відрізняється від традиційної, використання тільки нормованих методів випробувань є недостатнім.

Наприклад, в [7] авторами 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. 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. Наведено 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. Очевидно, що при прокладанні трьох одножильних кабелів в лінії умови їх охолодження відрізняються від умов охолодження одножильного кабелю, що має бути враховане при визначенні їх пропускної і перевантажувальної спроможності. При випробуваннях кабелів, призначених для прокладання трьох одножильних кабелів в площині, мають бути враховані також теплова та електрична асиметрія кабелів в умовах випробування.

**Мета роботи** – аналіз впливу розташування трьох одножильних СПЕ-кабелів в площині на нагрівання цих кабелів в умовах випробування для визначення їх пропускної і перевантажувальної спроможності.

**Одержані результати.** Експериментальна оцінка впливу відстані між кабелями на асиметрію струмів

і температур виконана на трьох однофазних одножильних кабелях АПвЭраПу 1×70/16–35 з однакою напрямом струму (схеми розташування кабелів і термопар див. на рис. 1).

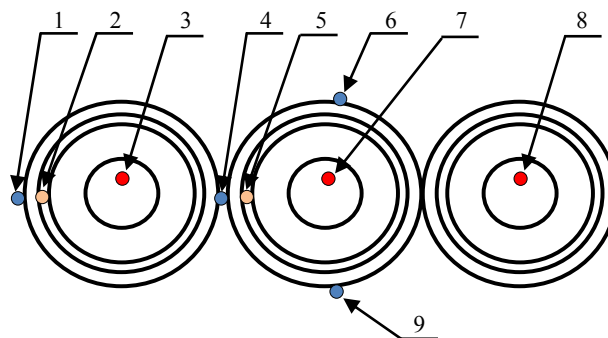


Рис. 1. Схема розміщення трьох кабелів і термопар для вимірювання температури в елементах конструкції при прокладанні впритул в горизонтальній площині:

- 1, 4, 6, 9 – термопари на поверхні кабелів;
- 2, 5 – термопари в мідних екранах;
- 3, 7, 8 – термопари на жилах

На рис. 2 наведено результати вимірювань температури в процесі нагрівання струмом в жилі елементів конструкції, при прокладанні впритул в горизонтальній площині – температура повітря в приміщенні 10 °С, джерела живлення ідентичні, мідні екрани ізолювані. Важливо те, що температура жили середнього кабелю с меншим значенням струму є суттєво більшою і різниця з часом нагрівання збільшується: після години нагрівання становить  $(15 \pm 1) ^\circ\text{C}$ .

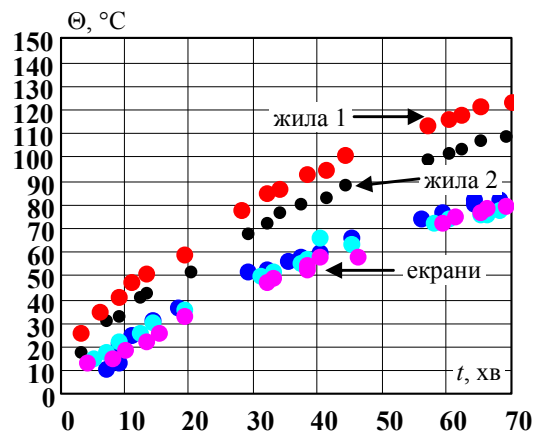


Рис. 2. Результати вимірювань температури елементів конструкції СПЕ-кабелю в процесі нагрівання струмом перевантаження (407 А в крайніх кабелях і 400 А в середньому) при прокладанні впритул в горизонтальній площині

Пропускна спроможність кабелю, визначена за нормативними моделями і середніми параметрами оточуючого середовища, прийнятими в нормативній документації, надає лише попередню інформацію про його нагрівання, корисну для порівняння його пропускної спроможності з іншими кабелями такого ж типу. Для конкретних застосувань і для інноваційних конструкцій кабелю необхідно визначати пропускну спроможність за тепловими обмеженнями в конкретних умовах експлуатації.

На рис. 3 наведено порівняння результатів вимірювань температури в процесі нагрівання номінальним струмом елементів конструкції при прокладанні впритул і на відстані діаметра кабелю в площині. Видно, що найбільша асиметрія спостерігається при прокладці впритул. Це пов'язано з електромагнітними взаємними впливами струмів в трьох кабелях. Електромагнітний зв'язок контурів жил характеризується коефіцієнтом взаємної індукції між двома жилами  $M_{I-II}$  і зумовлює появу електрорушійних сил, які змінюють струм в жилах.

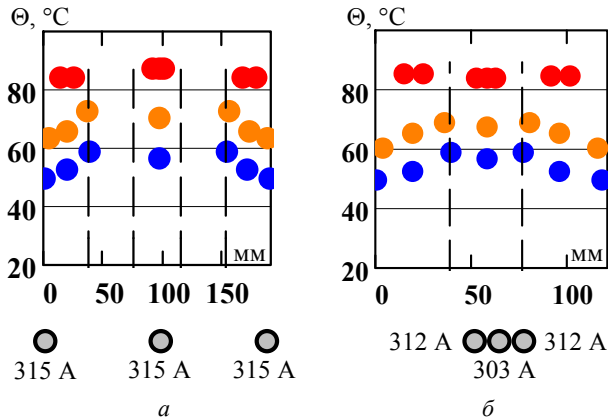


Рис. 3. Результати вимірювання температури при нагріванні трьох однофазних одножилних кабелів АПвЭгаПу 1×70/16–35 при розташуванні в горизонтальній площині на відстані одного діаметра (а) і впритул (б) з однаковим напрямком струму (схема розташування кабелів і термодар див. на рис. 1): верхні точки – температура жил; нижні точки – температура на поверхні кабелів; середні точки – температура в мідних екранах

Якщо позначити струми в кабелях  $I_1, I_2, I_3$ , то струм в крайніх кабелях однаковий ( $I_1 = I_3$ ), активний електричний опір  $r$  всіх жил однаковий. Тоді значення  $I_1, I_2, I_3$  можуть бути знайдені з системи двох комплексних рівнянь:

$$I_1(r + j\omega L_1) + I_2 j\omega M_{1-2} + I_3 j\omega M_{1-3} = \Delta U; \quad (1)$$

$$I_2(r + j\omega L_2) + I_1 j\omega M_{1-2} + I_3 j\omega M_{1-3} = \Delta U; \quad (2)$$

де  $L_1, L_2, L_3$  – індуктивності кабелів [9]:

$$L_1 = L_3 = (\mu_0/2\pi)[\ln(h_{1-3}/R) + 0,25]; \quad (3)$$

$$L_2 = (\mu_0/2\pi)[\ln(h_{1-2}/R) + 0,25]; \quad (4)$$

де  $h_{1-3}, h_{1-2}$  – відстані між центрами жил першого і третього; першого і другого кабелів, відповідно;  $R$  – радіус жили кабелю;  $M_{1-2}, M_{1-3}$  – взаємні індуктивності між першим і другим кабелем; першим і третім кабелем, відповідно, значення яких зменшуються при збільшенні відстані між центрами жил сусідніх кабелів [1].

З (1) і (2) відношення струмів в крайньому  $I_1$  і середньому  $I_2$  кабелях:

$$I_1/I_2 = (r + j\omega L_2 - j\omega M_{1-2}) / (r + j\omega L_1 - j\omega M_{1-2} + \Delta), \quad (5)$$

Нехтуючи  $\Delta$  порівняно з  $j\omega M_{1-2}$  отримуємо висновок, що для трьох однофазних однакових кабелів, розташованих в одній площині, однонаправлені струми в крайніх кабелях більші за струм в середньому кабелі:  $I_1 > I_2$ .

Для трьох кабелів АПвЭгаПу 1×70/16–35 завдовжки 10 м в площині впритул і паралельно один

до одного у вигляді петлі радіусом 1,6 м відношення  $I_1/I_2$  визначене коефіцієнтом  $k_{1-2}$ :

$$k_{1-2} = (r + j\omega L_2 - j\omega M_{1-2}) / (r + j\omega L_1 - j\omega M_{1-2}), \quad (6)$$

де  $r = 5 \cdot 10^{-4}$  Ом/м;  $\omega L_1 = 1,43 \cdot 10^{-4}$  Ом/м;  $\omega L_2 = 1,87 \cdot 10^{-4}$  Ом/м; при значенні взаємного реактивного опору в діапазоні  $\omega M_{1-2} = (3 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-5})$  Ом/м значення коефіцієнта  $k_{1-2} = 0,962 \dots 0,972$ . Відповідно, при значенні струму в крайній жилі 312 А струм в середній знаходиться в діапазоні від 300 А до 303 А. Експериментальні дані підтвердили результати розрахунку:  $I_1 = 312$  А;  $I_2 = 303$  А. Таким чином, чим більші значення  $h_{1-3}, h_{1-2}$ , тим менший вплив електромагнітного зв'язку контурів жил на асиметрію струмів в умовах випробування.

Отже, при розташуванні в площині на відстані одного діаметра трьох одножилних СПЕ-кабелів з однонаправленими струмами (в межах гранично допустимого номінального струму) і за відсутності повздовжних струмів в електропровідних екранах, може бути практично забезпечена симетрія струмів в кабелях. В такому разі нагрівання всіх трьох кабелів залежить тільки від взаємодії теплових полів в кабелях і навколо них. Тривало допустима температура 90 °С досягається тільки в середньому кабелі. В крайніх кабелях температура на 5 °С менша.

При перевантаженні кабелів (див. рис. 2) температура жили середнього кабелю суттєво перевищує температуру в крайніх кабелях навіть за умови меншого струму в середньому кабелі. Перші пів години нагрівання різниці становить 10 °С, але з часом зростає і через півтори години становить вже 15 °С. Важливо те, що при цьому температуру мідних екранів в межах похибки вимірювань ( $\pm 2$  °С) можна вважати практично однаковою і зростає вона суттєво повільніше, ніж температура жил. Це означає, що температура ізоляції, прилеглої до жили, в режимі перевантаження зростає суттєво швидше, ніж температура ізоляції, прилеглої до екрану, і внутрішні механічні напруги в ізоляції зростають.

Наведені результати одержані для кабелю з найменшою серед СПЕ-кабелів товщиною ізоляції 8,4 мм. Наприклад, для кабелів на напругу 220 кВ товщина ізоляції 23 мм. Тому при випробуваннях СПЕ-кабелів для порівняння їх короточасної перевантажувальної спроможності доцільно забезпечити адіабатний режим нагрівання кабелю струмом перевантаження, кратним номінальному, визначеному для окремого кабелю за гранично допустимої тривало температури ізоляції, прилеглої до струмопровідної жили кабелю.

#### Висновки.

1. Для СПЕ-кабелів, які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки і які суттєво відрізняються від традиційних маслом наповнених кабелів, використання тільки нормованих методів випробувань є недостатнім.

2. Для СПЕ-кабелів температура ізоляції, прилеглої до жили, в режимі перевантаження зростає суттєво швидше, ніж температура ізоляції, прилеглої до екрану, тому динаміка нагрівання жили має бути

визначена експериментально і може бути використана як показник короточасної перевантажувальної спроможності конкретного кабелю.

3. В умовах випробування при розташуванні в площині трьох однофазних однакових СПЕ-кабелів однонапрямлені струми в крайніх кабелях завжди більші за струм в середньому кабелі:  $I_1 > I_2$ .

4. При розташуванні в площині на відстані одного діаметра трьох одножильних однофазних СПЕ-кабелів з однонапрямленими струмами (в межах гранично допустимого номінального струму) і за відсутності повздовжніх струмів в електропровідних екранах, може бути практично забезпечена симетрія струмів в кабелях.

5. При випробуваннях СПЕ-кабелів для порівняння їх короточасної перевантажувальної спроможності доцільно забезпечити адіабатний режим нагрівання кабелю струмом перевантаження, кратним номінальному, визначеному для окремого кабелю за гранично допустимою тривалою температурою ізоляції.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антонєць Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Х.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с.
2. IEC 60287-1-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General. – 65 p.
3. СИГРЭ № 303 «Revision of qualification procedures for high voltage and extra high voltage AC extruded underground cable systems», 2006.
4. IEC 60287-2-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. – 84 p.
5. IEC 62067: Ed. 1.1b: 2006. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ( $U_m = 170$  kV) up to 500 kV ( $U_m = 550$  kV) – Test methods and requirements. – 90 p.
6. HD 632 S1: 1998. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ( $U_m = 42$  kV) up to 150 kV ( $U_m = 170$  kV) Part 2: Additional test methods.
7. Щебенюк Л.А., Антонєць Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – №3. – С. 152-157.

#### REFERENCES

1. Karpushenko V.P., Shchebenjuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. *Sylovi kabeli nyz'koyi ta seredn'oyi napruhy. Konstruyuvannya, tekhnolohiya, yakist'* [Power cables of low and medium voltage. Designing, technology, quality]. Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p. (Ukr).
2. IEC 60287-1-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General. – 65 p.

3. SIGRE № 303 «Revision of qualification procedures for high voltage and extra high voltage AC extruded underground cable systems», 2006.

4. IEC 60287-2-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. – 84 p.

5. IEC 62067: Ed. 1.1b: 2006. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ( $U_m = 170$  kV) up to 500 kV ( $U_m = 550$  kV) – Test methods and requirements. – 90 p.

6. HD 632 S1: 1998. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ( $U_m = 42$  kV) up to 150 kV ( $U_m = 170$  kV) Part 2: Additional test methods.

7. Shchebenjuk L.A., Antonets T.Yu. To determine the capacity of high-voltage power cables with plastic insulation. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no.3, pp. 152-157. (Ukr).

Надійшла (received) 26.10.2015

Антонєць Тарас Юрійович<sup>1</sup>, аспірант,  
Вєпрік Юрій Миколайович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Щебенюк Леся Артемівна<sup>1</sup>, к.т.н., проф.,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,  
e-mail: veprik@email.ua

T.Yu. Antonets<sup>1</sup>, Yu.M. Veprik<sup>1</sup>, L.A. Shchebenjuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Heat tests of power cables with XLPE insulation at direct voltages up to 110 kV.

*In this paper, experiment for determining the temperature difference between the elements of cable and in the open air is considered. The formation of a three cables laid in a plane with different spacing between adjacent cables. Tests to heat of cables for XLPE-polyethylene are used as a solid dielectric insulation. The line to XLPE-cables in group running horizontally, provided that the cables are of equal diameter and emit equal losses. It is limited to the following: the air flow around the cables may be necessary restricted by proximity to next cables. When single-core cables are installed in parallel the load current may not share equally between the parallel cables. This is because a significant proportion of the impedance of large conductors is due to self reactance and mutual reactance. Hence the spacing and relative location of each cable will have an effect on the current sharing. Calculation for each cable configuration is necessary. Possibility of using for determining the thermal properties of XLPE-cables a sheath applied over the cable surface with coefficient convection heat transfer between cable surface and the air region about it of equal zero. The work is devoted to creation of a method for calculation of the current rating of high-voltage cables in conditions function. References 7, figures 3.*

**Key words: power cable, XLPE-cables, heat test.**