

*Л.А. ШЕБЕНЮК*, канд. техн. наук., проф., НТУ "ХПІ", Харків  
*Т.Ю. АНТОНЕЦЬ*, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків  
*І.С. КОЧІН*, студент, НТУ "ХПІ", Харків

### **ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ, ПРОКЛАДЕНОГО В ПРИМІЩЕННІ**

Експериментально оцінено коефіцієнти перевантажувальної спроможності та теплопередачі для кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в приміщенні.

Экспериментально оценены коэффициенты перегрузочной способности и теплопередачи для кабеля АВВБ 3х25-1, проложенного в помещении.

**Постановка проблеми.** Кількісними показниками навантаження в системах електропостачання є потужність та струм, які в трьохфазній системі пов'язані співвідношенням  $P = I \cdot U \cdot \sqrt{3}$ , де  $U$  — лінійна напруга. Навантаження силових кабелів обмежується максимальною допустимою температурою ізоляції. При виборі та проектуванні кабелів в якості *основних показників пропускної спроможності* використовують: струм в стаціонарному, найбільш навантаженому робочому режимі (номінальний струм)  $I_{\text{доп}}$ ; струм в режимі нормативно допустимого перевантаження.

Нестаціонарні режими навантаження, за яких параметри процесів тепломасопереносу залежать від часу і є нелінійними, в практиці дуже поширені і їх задають, наприклад, у вигляді добових графіків навантаження. Очевидно, що таких можливих нестаціонарних режимів безліч. В практиці застосовують два основні підходи до характеристики можливих перевантажень кабелю. Перший - визначення кривих перевантажувальної спроможності у вигляді залежностей кратності струму перевантаження  $I_{\text{п}}$  до гранично допустимого струму  $I_{\text{доп}}$  в стаціонарному режимі роботи кабелю від часу перевантаження. За такими залежностями розроблюють нормативи для конкретних кабельних ліній, оскільки відповідні кратності залежать від умов прокладання. Наприклад, півгодинний (або інший, табл. 1) струм не повинен перевищувати струм, кратний  $I_{\text{доп}}$ , причому коефіцієнт кратності може бути визначений розрахунком для нестаціонарного теплового режиму. Основним показником при змінному графікові навантаження з півгодинним мак-

симумом навантаження є півгодинний максимально допустимий струм, що дорівнює  $1,5 I_{\text{доп}}$ , де  $I_{\text{доп}}$  — розрахунковий необмежено тривалий допустимий струм в стаціонарному режимі.

Таблиця 1 – Приклади допустимих аварійних перевантажень кабельних ліній

Коефіцієнт завантаження в нормальному режимі	Вид прокладення	Коефіцієнт допустимого перевантаження при тривалості максимуму, годин		
		1	2	3
0,6	В землі	1,50	1,35	1,25
	В повітрі	1,35	1,25	1,25
	В трубах (в землі)	1,30	1,20	1,15
0,8	В землі	1,35	1,25	1,20
	В повітрі	1,30	1,25	1,25
	В трубах (в землі)	1,20	1,15	1,10

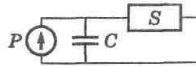
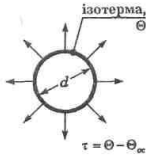


Рис. 1. Схема моделі нагрівання та охолодження.

Для наближених розрахунків нестационарного теплового режиму використовують модель **нагрівання** та охолодження однорідного проводу (рис. 1), що базується на рівнянні теплового балансу, згідно з яким тепло, що виділяється в проводі при проходженні по ньому струму, йде на нагрівання самого проводу та відводиться в навколишнє середовище:

$$P dt = C dt + \tau dt / S, \quad (1)$$

де  $P$  — потужність тепловиділення за умови, що температура провідника не повинна перевищувати гранично допустиму, визначену для стаціонарного режиму навантаження, дорівнює

$$P = P_{\text{доп}} = I_{\text{доп}}^2 \cdot R_g(\Theta_1);$$

$R_g(\Theta_1)$  — електричний опір жили за гранично допустимої температури  $\Theta_1$ ,  $I_{\text{доп}}$  — необмежене довготривалий струм в жилі, тобто  $P = P_{\text{доп}} = \tau_{\text{max}}/S$  при перевищенні температури над температурою оточуючого середовища  $\tau_{\text{max}} = \Theta_1 - \Theta_2$  в стаціонарному тепловому режимі;  $C$  — теплоємність кабелю;  $S$  — тепловий опір оточуючого середовища, для повітря  $S = 1/\pi d \alpha$ ;  $\alpha$  — коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2$ ;  $d$  — діаметр кабелю;  $\tau$  — поточний перегрів відносно температури оточуючого сере-

довища;  $t$  – час дії струму перевантаження.

За МЕК 287-2-1 та МЕК 287-2-2 рекомендоване значення коефіцієнт теплопередачі, зумовленого конвективним теплообміном в оточуючому повітрі,  $\alpha = 10 \text{ Вт}/^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2$ , яке за можливості має бути визначене експериментально для даних умов експлуатації. Таке визначення дозволяє надійніше оцінити пропускну спроможність кабелю в заданих умовах.

**Мета.** Експериментально визначити значення коефіцієнту теплопередачі  $\alpha$ , зумовленого конвективним теплообміном, для кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в приміщенні для визначення його перевантажувальної спроможності.

**Аналіз літератури.** Для визначення коефіцієнту теплопередачі  $\alpha$ , зумовленого конвективним теплообміном, ІЕС 287-2-1 та ІЕС 287-2-2 рекомендує враховувати конкретні умови прокладання, зокрема: висихання ґрунту довкола кабелю, прокладеного в землі, і дію теплового випромінювання на кабель, прокладений у повітрі [1]. Однак в [1] не визначено метод виконання цих рекомендацій.

**Одержані результати.** Для визначення  $\alpha$ , через три жили кабелю

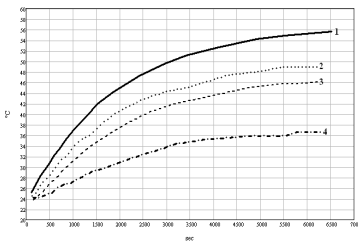


Рис. 2 - Криві нагрівання елементів кабелю АВВБ 3х25-1:

1 – жила; 2 – екран; 3 – оболонка;  
4 – поверхня.

АВВБ 3х25-1, з'єднані разом, пропустили струм 200 А промислової частоти. Вимірювання температури елементів кабелю проводилися за допомогою чотирьох термопар мідь-константан, підключених до мілівольтметра. Термопари розміщені в жили кабелю, в напівпровідному екрані, в оболонці та на поверхні кабелю. Одержані результати експерименту представлені на рис. 2.

**Аналіз одержаних результатів.**

Рішення диференційного рівняння теплового балансу (1) відносно поточного перегріву при початкових умовах дають наближені співвідношення, які дозволяють визначити перевантажувальну спроможність практично у будь-яких нестационарних режимах. При цьому основна вимога, - температура провідника не повинна перевищувати гранично допустиму, визначену для стаціонарного режиму навантаження.

Для режиму включення (за температури довкілля)  $t = 0$ ;  $\tau = 0$ :

$$\tau = \tau_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\beta}), \quad (2)$$

де  $\beta$  – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності прово-

ду на тепловий опір оточуючого середовища  $\beta = C \cdot S$ .

Ця модель є достатньо точною для теплових розрахунків кабелів у нестационарних режимах, якщо товщина ізоляції невелика відносно розмірів жили. При цьому режим навантаження є допустимим, якщо поточний перегрів не перевищує максимально допустимий. Із цієї ж умови знаходять струм та час допустимого перевантаження. Струм та час допустимого перевантаження при первинному включенні пов'язані співвідношенням, що випливає з (2):

$$I_n = I_{\text{доп}} / [1 - \exp(-t_n / \beta)]^{0.5}, \quad (3)$$

Експоненційна модель (2) нагрівання кабелю є двох параметричною, її параметри:  $\tau_{\text{max}}$  – максимальне перевищення температури жил кабелю над температурою оточуючого середовища в стаціонарному тепловому режимі;  $\beta$  – постійна нагрівання кабелю.

Для визначення параметрів використано залежність  $\tau^* = f(t^*)$ , показану на рис. 3.

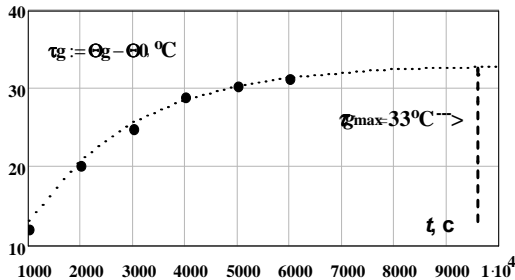


Рис. 3. Графік залежності  $\tau_g = f(t)$  перевищення температури жили  $\Theta_g^*$  над температурою  $\Theta_0^*$  оточуючого повітря від часу  $t^*$  протікання струму за експериментальними даними (точки на графіку:  $t = t^*$ ;  $\tau_g = \tau^*$ ;  $\tau^* = \Theta_g^* - \Theta_0^*$ ).

За одержаними експериментальними даними і графічно оцінити значення  $\tau_{\text{max}}^*$  (тут і далі "\*" означає експериментально визначену величину). Другий параметр експоненційної моделі (2) нагрівання кабелю, а саме – постійна нагрівання  $\beta$  визначена як параметр лінійної функції, одержаної логарифмуванням (2):

$$\ln(1 - \tau / \tau_{\text{max}}) = (-1 / \beta) \cdot t = b \cdot t. \quad (4)$$

Кутовий коефіцієнт  $b$  лінійної функції (4) обернено пропорційний до постійної нагрівання кабелю  $\beta$ .

Для визначення постійної нагрівання кабелю за експериментальними даними побудовано графік лінійної функції (4), за результатами вимірювання значень часу нагрівання  $t^*$  по осі абсцис, а по осі ординат

відповідні значення  $\ln(1 - \tau^* / \tau_{\max}^*)$  (5).

Оскільки експериментальні точки близькі до прямої, визначено постійну нагрівання  $\beta$  як кутовий коефіцієнт цієї прямої (рис.4).

$$\ln(1 - \tau^* / \tau_{\max}^*) = f(t^*). \quad (5)$$

Постійна нагрівання також може бути визначена за експериментальними даними аналітично, методом найменших квадратів:

$$\beta = - \frac{\sum(t_i - t_{cp})^2}{\sum(t_i - t_{cp})} \cdot \{ \ln(1 - \tau_i^* / \tau_{\max}^*) - [\ln(1 - \tau_i^* / \tau_{\max}^*)]_{cp} \}, \quad (6)$$

$$i \in [1; n],$$

де  $n$  – кількість вимірювань;  $i$  – порядковий номер вимірювання.

Приклад застосування моделі нагрівання та охолодження проводу в повітрі за величиною експериментально визначеної постійної нагрівання  $\beta$  для оцінювання допустимого годинного перевантаження силового кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в повітрі, базується на використанні моделі (3).

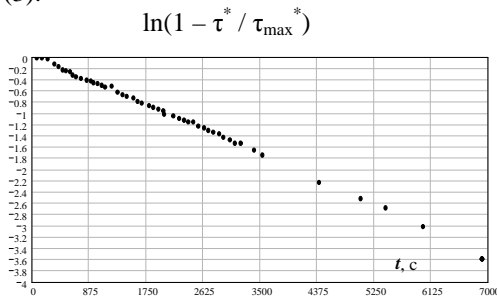


Рис.4. Графік залежності (б) для експериментального визначення постійної нагрівання (для цього графіку:  $\beta^* \sim 7000 / [ -(-3,6) ] = 1944 \text{с}$ ).

За (3) визначається відношення  $I_{\Pi} / I_{\text{доп}}$  для часу дії струму перевантаження  $t_{\Pi} = 3600 \text{ с}$ :

$$I_{\Pi} / I_{\text{доп}} = [1 - \exp(-t_{\Pi} / \beta)]^{-0,5}, \quad (7)$$

Кратність допустимого перевантаження на протязі 60 хвилин після включення кабелю:

$$I_{\Pi} / I_{\text{доп}} = [1 - \exp(-3600 / 1944)]^{-0,5} = 1,186.$$

Експериментально оцінена кратність допустимого годинного перевантаження силового кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в повітрі, виявилася меншою за нормативну для силових кабелів низької напруги (табл. 1). Припущення про вплив гірших конкретних умов охолодження експериментально не підтвердилось. Коефіцієнт теплопередачі  $\alpha$  визначено на основі експериментальної оцінки потужності теплового

потокі  $P_{ж}^* = (I_{ж}^*)^2 \cdot R_{ж}$ , та різниці температур між поверхнею кабелю і оточуючим середовищем:

$$\theta_{пов}^* - \theta_{ос}^* = P_{ж}^* \cdot S_{ос}, \text{ звідки } S_{ос}^* \approx 0,754 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2.$$

Відповідна оцінка коефіцієнт теплопередачі  $\alpha$  за температури оточуючого середовища  $24^\circ\text{C}$ :

$S = 1/\pi d \alpha$ ; де  $d$  – діаметр кабелю становить  $15,93 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ , що суттєво перевищує нормативний показник, наведений в [2], який дорівнює  $10 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ .

**Висновок.** Експериментально оцінено кратність допустимого півгодинного перевантаження силового кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в повітрі, для якого відповідний коефіцієнт перевантаження виявився меншим за нормативний (табл.1), що свідчить про актуальність саме експериментального визначення перевантажувальної спроможності в конкретних умовах експлуатації.

Експериментально оцінено коефіцієнт теплопередачі, зумовлений конвекційним теплообміном, для кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в приміщенні, який дорівнює  $15,93 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$ . Отримане значення дещо перевищує наведене в [2], яке дорівнює  $10 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$  і стосується орієнтовно рівня для всіх силових кабелів. Значення для кабелю марки АВВБ 3х25-1 пов'язане з його невеликим діаметром, який складає 25 мм. Таким чином за порівняно кращих умов конвекційного теплообміну вирішальним при визначенні перевантажувальної спроможності є визначення постійної нагрівання кабелю конкретної конструкції. Використання універсальних таблиць перевантажувальної спроможності може спричинити появу небажаного перегрівання кабелю.

**Список літератури:** 1. IEC 287-2-1 та IEC 281-2-2. Electric cables. Calculation of the current rating. Thermal resistans. – Geneva: IEC CO 3.1995.05. 2. В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антонець, О.А. Науменко. Силові кабелі низької та середньої напруги // Конструювання, технологія, якість. – Харків: "Регіон-Інформ", 2000.

*Поступила в редколлегию 12.10.2011*

*Рецензент д.т.н., проф. Гурин А.Г.*