

В.О. Самарін, викладач, НУЦЗУ,
О.І. Камардаш, викладач, НУЦЗУ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ТЕПЛООБМІНУ

(представлено д-ром техн. наук Куценко Л.М.)

Вирішено двовимірну задачу теплопровідності для тришарового кабелю в зоні з обмеженим тепловідведенням. Проведено оцінку пожежної небезпеки режиму перевантаження кабельних ліній в умовах обмеженого теплообміну.

Ключові слова: Кабельні лінії, електричні перевантаження, температурне поле, пожежна небезпека, чисельне моделювання.

Постановка проблеми. Щорічно в Україні від електротехнічних виробів відбувається близько 20...25% пожеж від загального їх числа.

Традиційно найбільш пожежонебезпечними з року в рік (понад 60% від загального числа пожеж від електроустановок) є кабельні вироби [1], для яких характерно несприятливе поєднання наявності горючих матеріалів з виникненням в аварійних режимах експлуатації джерел запалювання: електричних іскор; дуг; контактних з'єднань і струмоведучих жил, нагрітих до температур, що перевищують допустимі. Пожежна небезпека перегріву струмоведучих жил полягає в займанні ізоляції, а також горючих матеріалів, що знаходяться в безпосередньому контакті з електричним кабелем.

«Першість» кабельних виробів з пожежної небезпеки серед всіх електротехнічних виробів особливо наочно підтверджує інтегральний показник - ранг пожежної небезпеки, який включає три основних статистичних показника: кількість пожеж, величина матеріального збитку й кількість загиблих на пожежі людей [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До теперішнього часу оцінка пожежної небезпеки кабельних виробів проводилася при допущенні, що температура по перетину провідника не змінюється і важливим є лише зміна температури поверхні кабелю в часі [2].

Розв'язання типової задачі [2] зведено до вирішення рівняння теплопровідності з урахуванням тепловиділення в жилі та термічного розкладання ізоляції кабелю у вигляді:

$$(\rho_1 c_1 S_1 + \rho_2 c_2 S_2) \frac{dT}{dt} = \frac{I^2 \gamma}{S_1} - \alpha F(T - T_0) + q \frac{dm}{dt}, \quad (1)$$

де $\frac{dm}{dt} = mk^0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$. Тут ρ_1, ρ_2 - щільність матеріалу жили й оболонки, c_1, c_2 - питома теплоємність матеріалу жили і оболонки, S_1, S_2 - перетин жили й оболонки; T - температура провідника; t - час; I - сила струму; γ - питомоелектричний опір жили; α - коефіцієнт теплообміну; F - довжина кола ізоляції; T_0 - початкова температура; q - теплота газифікації матеріалу ізоляції; m - маса ізоляції для одиниці довжини провідника; k^0, E - предекспонента й енергія активації хімічної реакції термічного розкладання оболонки; R - універсальна газова стала.

Модель [2] є занадто спрощеною й використовується для визначення тимчасових характеристик піролізу і займання ізоляції при перевантаженні кабельних ліній. Вона не враховує умов, коли теплообмін з навколишнім середовищем ускладнений (кабель замуrowаний в стіну або поміщений в короб).

Постановка задачі та її розв'язання. З метою прогнозування пожежної небезпеки кабельних ліній в умовах обмеженого теплообміну й перевантаження потрібно створити математичну модель температурних полів в кабельних лініях й провести оцінку пожежної небезпеки режимів їх перевантаження в умовах обмеженого теплообміну.

Для вирішення поставленого завдання був обраний одножильний кабель з двома шарами ізоляції. Вибір обумовлений тим, що наявність декількох жил не може значно вплинути на зміну температури через високу теплопровідності металів, з яких вони виготовляються. Багат шарова ізоляція може бути представлена одним шаром при вирішенні задачі, тому що більшість ізоляційних матеріалів мають близькі за значенням теплофізичні характеристики.

Розв'яжемо двомірну задачу теплопровідності для одножильного тришарового електричного кабелю, частина якого знаходиться в повітряному середовищі, а інша замуrowана в стіну, так як загоряння найчастіше відбувається на межі контакту кабелю з електроустановкою або на ділянках з обмеженим тепловідведенням [4]. Геометрія області рішення задачі приведена на рис. 1.

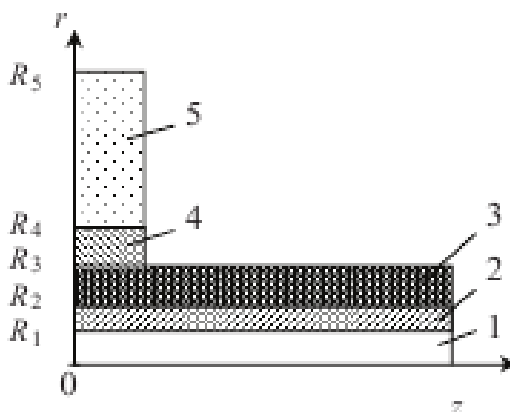


Рис. 1 - Схема області рішення задачі: 1) жила, 2) ізоляція; 3) оболонка кабелю, 4) кабельна проходка, 5) перебірка (стіна)

Математичне моделювання досліджуваного процесу зведено до вирішення системи рівнянь теплопровідності для системи «струмопровідна жила - ізоляція - оболонка - кабельна проходка - стіна» з нелінійними граничними умовами.

Температурне поле в кожному шарі описується диференціальним рівнянням теплопровідності. Так як кабелі в більшості випадків являють собою багат шарові циліндри, система рівнянь теплопровідності записується в циліндричних координатах.

Термічне розкладання матеріалу оболонки кабелю та герметика, яким кабель закріплений у стіні, описується рівнянням Ареніуса [3]. Розкладання полімерів протікає з помітною швидкістю лише при досягненні характерною для кожного матеріалу температури, близької до температури займання [2]. У зазначеному діапазоні температур енергія активації термічного розкладання залишається незмінною. Не будемо враховувати зміну теплофізичних властивостей матеріалів в процесі термічного розкладання. Математична постановка задачі:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + \frac{I^2 \gamma}{S}, \quad 0 < r < R_1, \quad 0 < z < L; \quad (2)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad R_1 < r < R_2, \quad 0 < z < L; \quad (3)$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) + q_3 \rho_3 \frac{d\varphi_3}{dt},$$

$$R_2 < r < R_3, \quad 0 < z < L; \quad (4)$$

$$-\frac{d\varphi_3}{dt} = \varphi_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E}{RT_3}\right), \quad (5)$$

$$c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right) + q_4 \rho_4 \frac{d\varphi_4}{dt},$$

$$R_3 < r < R_4, \quad 0 < z < Z; \quad (6)$$

$$-\frac{d\varphi_4}{dt} = \varphi_4 k_4^0 \exp\left(-\frac{E}{RT_4}\right), \quad (7)$$

$$c_5 \rho_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_5 \left(\frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_5}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} \right), \quad R_4 < r < R_5, \quad 0 \leq z \leq Z. \quad (8)$$

Тут ρ_i , λ_i , c_i - щільність, коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність матеріалу i -го шару системи; R_i - радіус i -го шару системи; S - перетин жили; Z - товщина стіни; L - довжина кабелю; T_i - пото-

чне значення температури ; k_i^0 , E_i - предекспонента й енергія активації хімічної реакції термічного розкладання і-го шару системи; q_i - теплота газифікації матеріалу і-го шару системи; φ_i - поточне значення об'ємної частки компонента, що піддається термічному розкладанню.

Початкові і граничні умови:

$$t = 0 : T_i = T_0, 0 \leq r \leq R_5, 0 \leq z \leq L; \quad (9)$$

$$r = 0 : \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, t > 0; \quad (10)$$

$$z = 0 : \frac{\partial T_i}{\partial z} = 0, 0 < r \leq R_5, t > 0; \quad (11)$$

$$z = L : \frac{\partial T_i}{\partial z} = 0, 0 < r \leq R_3, t > 0. \quad (12)$$

Тут φ_0 – об'ємна частка компонента, здатна термічно розклас-тися; T_0 - початкова температура системи.

На поверхні кабелю й стіни відбувається теплообмін з навколишнім середовищем, який описується граничними умовами третього роду:

$$r = R_3 : -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha(T^e - T_3), Z < z < L, t > 0; \quad (13)$$

$$r = R_5 : -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} = \alpha(T^e - T_5), 0 < z < Z, t > 0; \quad (14)$$

$$z = Z : \begin{cases} -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} = \alpha(T^e - T_4), R_3 < r < R_4, t > 0; \\ -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} = \alpha(T^e - T_5), R_4 < r < R_5, t > 0. \end{cases} \quad (15)$$

Тут T^e – температура навколишнього середовища.

Теплова взаємодія між шарами даної системи описується граничними умовами четвертого роду:

$$\begin{cases} T_1(t, r, z) = T_2(t, r, z), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \end{cases} \text{ при } r = R_1, 0 < z < L; \quad (16)$$

$$\begin{cases} T_2(t, r, z) = T_3(t, r, z), \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, \end{cases} \text{ при } r = R_2, 0 < z < L; \quad (17)$$

$$\begin{cases} T_3(t, r, z) = T_4(t, r, z), \\ -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r}, \end{cases} \text{ при } r = R_3, 0 < z < Z; \quad (18)$$

$$\begin{cases} T_4(t, r, z) = T_5(t, r, z), \\ -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r}, \end{cases} \text{ при } r = R_4, 0 < z < Z. \quad (19)$$

Система диференціальних рівнянь з відповідними початковими і граничними умовами вирішена методом кінцевих різниць. Крок за часом $\tau = 10^{-3}$ с, крок по просторовим координатам $\Delta r = 10^{-4}$ м, $\Delta z = 10^{-3}$ м. Отримані різницеві рівняння вирішені методом прогонки з використанням неявної чотириточкової схеми.

Були проведені чисельні дослідження для кабелю з перетином мідної жили $0,5 \text{ мм}^2$, порцеляною ізоляцією й оболонкою з фторопласта-4 [2]. Матеріал стіни - сталь. Кабельна проходка, за допомогою якої кабель закріплений в перегородці (стіни), також виконана з фторопласта-4. Температурне поле перегородки розраховувалося для ділянки, що дорівнює 4-м радіусам оболонки кабелю, оскільки на більшій відстані від поверхні кабелю температура перегородки практично не змінюється.

Дослідження проводилися для струмового навантаження в 20 А, що є значним перевантаженням.

Теплофізичні характеристики шарів даної системи [5]:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 384 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, \lambda_2 = 1 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, \lambda_3 = 0,25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, \\ \lambda_4 &= 0,25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, \lambda_5 = 46 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, \\ \rho_1 &= 8800 \text{ кг/м}^3, \rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3, \rho_3 = 2200 \text{ кг/м}^3, \rho_4 = 2200 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_5 &= 7800 \text{ кг/м}^3, \\ c_1 &= 381 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, c_2 = 1200 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, \\ c_3 &= 1 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, c_4 = 1 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, c_5 = 460 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}. \end{aligned}$$

Геометричні розміри кабелю і перегородки:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,0004 \text{ м}, R_2 = 0,0007 \text{ м}, R_3 = 0,0019 \text{ м}, \\ R_4 &= 0,0025 \text{ м}, R_5 = 0,01 \text{ м}, Z = 0,05 \text{ м}, L = 0,25 \text{ м}. \end{aligned}$$

Параметри термічного розкладання фторопласта-4 [2]:

$$\begin{aligned} k^0 &= 3 \cdot 10^{19} \text{ 1/с}, q = -1,86 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \varphi_0 = 0,4, \\ R &= 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}, E = 347 \text{ кДж/моль}. \end{aligned}$$

Умови теплообміну з навколишнім середовищем:

$$T_0 = 300 \text{ К}, T^e = 300 \text{ К}, \alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}.$$

Тривалість перевантаження: $t = 3600$ с.

Згідно [4], для проводів з гумовою ізоляцією допускається тривала температура нагріву жил, що не перевищує 338 К, а для прово-

дів з пластмасовою ізоляцією - 343 К. В аварійних режимах роботи (при перевантаженні) допустиме значення температури проводів становить 363 К.

Встановлено, що для типових значень параметрів, що характеризують роботу кабельних ліній, можливі досягнення температур, які істотно перевищують зазначені вище гранично допустимі значення. Результати чисельних досліджень у вигляді полів ізотерм наведено на рис. 2.

Струмове навантаження, що допускається, за умовами пожежної безпеки для провідника такого перетину становить 11 А. При номінальному значенні сили струму 10 А температура кабелю залишається в допустимих межах. Максимальне значення температури становить 321 К.

Розподіл температури в даній системі при силі струму 20 А наведено на рис. 2.

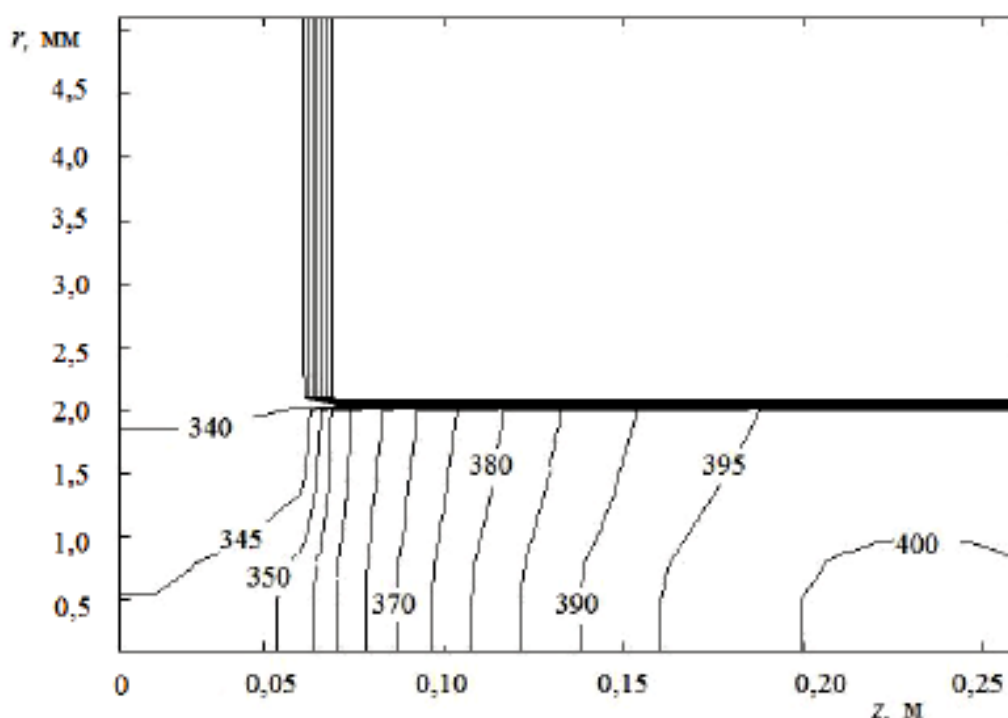


Рис. 2 - Розподіл температури в досліджуваній системі при струмовому навантаженні 20 А

Видно, що всі допустимі температурні межі істотно перевищені.

Результати чисельного аналізу показують, що максимальний нагрів кабелю спостерігається на деякій відстані від перегородки. Це пояснюється тим, що ділянки кабелю знаходяться в різних умовах теплообміну.

Висновки. Вирішено двовимірну задачу теплопровідності для тришарового силового кабелю в умовах обмеженого теплообміну. Запропоновано математичну модель температурних полів в кабельних лініях в умовах перевантаження і обмеженого теплообміну.

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение вероятности пожара от кабелей и проводов электрических сетей / Методические рекомендации. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. – 40 с.

2. Болодьян И.А. О термической деструкции полимерной изоляции электрического проводника при токовой перегрузке / И.А. Болодьян, В.А. Третьяков // Вопросы горения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах. Сборник трудов ВНИИ ИПО, вып. 1. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1981. – С. 75–80.

3. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.

4. Кабели и провода электрические. Показатели пожарной опасности. Методы испытаний : НПБ 248-97 [Действующий от 1998-01-01]. – М.: ГУ ГПС МВД России, 1998. – 31 с. – (Нормы пожарной безопасности)

5. Григорьева М.М. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий. / М.М. Григорьева, Г.В. Кузнецов // Известия Томского политехнического университета. – Томск: НИТПУ, 2010. - Т. 316. № 4. - С.34-38.

nuczu.edu.ua

В.А. Самарин, А.И. Камардаш

Математическая модель температурных полей в кабельных линиях в условиях ограниченного теплообмена

Решена двумерная задача теплопроводности для трехслойного кабеля в зоне с ограниченным теплоотводом. Проведена оценка пожарной опасности режима перегрузки кабельных линий в условиях ограниченного теплообмена.

Ключевые слова: Кабельные линии, электрические перегрузки, температурное поле, пожарная опасность, численное моделирование.

V.O. Samarin, O.I. Kamardash

Mathematical model of temperature fields in cable lines in the heat exchange limited

The two-dimensional heat conduction problem for a three-layer cable in an area with limited heat sink is solved. The evaluation of fire danger by overloading of mode cables with limited heat is held.

Key words: Cable lines, electrical overload, temperature field, fire danger, numerical modeling.