

АНАЛІЗ ПОЛЯ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Побудовано та описано алгоритм розрахунку параметрів для оптимізації режиму роботи системи катодного захисту магістральних трубопроводів, числова реалізація якого дає можливість отримати оптимальні величини струму катодних станцій. Проведено аналіз результатів розрахунку, який підтвердив актуальність математичного моделювання такого роду задач. Застосування запропонованих математичних моделей дає можливість заощадження енергії та ресурсів при захисті магістральних трубопроводів від корозії.

Умовні позначення

- m – кількість анодних заземлень, шт;
 U_{nl} – потенціал на поверхні ґрунту над трубопроводом l -ї труби, В;
 ρ – питомий опір ґрунту, Ом·м;
 I_j – струм j -го заземлення, А;
 J_i – лінійна густина струму i -го трубопроводу, А/м;
 h – відстань від поверхні ґрунту до осі труби, м;
 U_{al} – потенціал на зовнішній поверхні протикорозійного покриття l -ї труби, В;
 a_l – радіус l -ї труби, м;
 U_{Tl} – потенціал у довільній точці l -ї труби, В;
 ρ'_l – опір одиниці довжини l -го трубопроводу (лінійний опір), Ом/м;
 φ_{cm} – стаціонарний потенціал металу, В;
 ρ_l – перехідний питомий опір протикорозійного покриття l -ї труби, Ом·м;
 F_l – різниці потенціалів труба–поверхня ґрунту, В.

В роботі [1] побудовано математичну модель розрахунку величини перехідного опору протикорозійного покриття магістрального трубопроводу. В даній роботі описано алгоритм розрахунку за цією моделлю. Необхідність виділення його пов'язана зі складністю задачі. Щоб доступніше описати алгоритм, обмежимося полем відрізка однопіткового магістрального трубопроводу та m анодних заземлень. Дискретний аналог математичної моделі включає співвідношення для визначення:

а) потенціалу U_n на поверхні ґрунту над трубопроводом [2]:

$$U_{nl} = \frac{\rho}{2\pi} \sum_{j=1}^m I_j K_{alj} - \frac{\rho}{2\pi} \sum_{i=1}^n J_i \int_{x_i}^{x_{i+1}} K_l(\xi, h) d\xi, \quad l=1, n, \quad (1)$$

$$K_{alj} = \left[(x_{cl} - x_j)^2 + y_j^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[(x_{cl} + x_j - 2x_1)^2 + y_j^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[(x_{cl} + x_j - 2x_{n+1})^2 + y_j^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$K_l(\xi, s) = \left[(x_{cl} - \xi)^2 + s^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[(x_{cl} + \xi - 2x_1)^2 + s^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[(x_{cl} + \xi - 2x_{n+1})^2 + s^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

де $x_{cl} = (x_{i+1} + x_i)/2$, $x_i = x_1, \dots, x_{n+1}$, вісь Ox проходить поверхнею ґрунту паралельно до осі труби, точка x_i є елементом розбиття Ox на відрізки; $x_j, y_j, 0$ – координати j -го анодного заземлення;

б) потенціалу U_a на зовнішній поверхні протикорозійного покриття труби:

$$U_{al} = \frac{\rho}{2\pi} \sum_{j=1}^m I_j K_{alj} - \frac{\rho}{4\pi} \sum_{i=1}^n J_i \int_{x_i}^{x_{i+1}} \{K_l(\xi, a) + K_l(\xi, 2h)\} d\xi, \quad l=1, n, \quad (2)$$

в) потенціалу U_T труби [1]:

$$\frac{U_{T2} - U_{T1}}{\rho_T(x_2 - x_1)} = J_1 \frac{x_2 - x_1}{2},$$

$$\frac{U_{Tl+1} - U_{Tl}}{\rho_T(x_{l+1} - x_l)} - \frac{U_{Tl} - U_{Tl-1}}{\rho_T(x_l - x_{l-1})} = J_{l-1} \frac{x_l - x_{l-1}}{2} + J_l \frac{x_{l+1} - x_l}{2} - I_j \delta(x_l - x_j),$$

$$l=2, \dots, n-1, \quad j=1, \dots, m,$$

$$U_{Tn+1} = U_0 \quad (3)$$

де δ - δ -функція.

На поверхні труби мають місце співвідношення, які пов'язують величини U_{ai} та U_{Ti} [2]

$$U_{ai} - U_{Ti} + \varphi_{cm} = R_l J_i, \quad i=1, \dots, n. \quad (4)$$

Рівняння балансу струмів, які натікають на відрізок $[x_1, x_{n+1}]$ труби й витікають з неї по кабелю до катодних перетворювачів має вигляд

$$\sum_{j=1}^m I_j = \sum_{i=1}^n J_i (x_{i+1} - x_i) \quad (5)$$

Система ((2) – (5)) $3n+1$ рівнянь відносно невідомих U_{al} , U_{Tl} , J_l , U_0 повна. Зведемо її до системи $n+1$ рівнянь. Для цього побудуємо матрицю, нормальну до матриці системи (3). Позначимо елементи нормальної матриці через a_{li} . В результаті розв'язок системи (3) матиме вигляд

$$U_{Tl} = a_{l1} J_1 \frac{x_2 - x_1}{2} + \sum_{i=2}^n a_{li} \left[J_{i-1} \frac{x_i - x_{i-1}}{2} + J_i \frac{x_{i+1} - x_i}{2} - I_j \delta(x_j - x_i) \right] + U_0, \quad l=1, \dots, n,$$

$$U_{Tn+1} = U_0 \quad (6)$$

($a_{in+1}=1, (i=1, \dots, n+1)$; $a_{n+1,i}=0, (i=1, \dots, n)$).

Підставивши в рівняння (4) замість U_a і U_T їх вирази (2) та (6), в результаті отримаємо

$$R_l J_l + \frac{\rho}{4\pi} \sum_{i=1}^n J_i \int_{x_i}^{x_{i+1}} [K_l(\xi, a) + K_l(\xi, 2h)] d\xi + \sum_{i=1}^{n-1} (a_{li} + a_{li+1}) J_i \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + a_{l,n} J_n \frac{x_{n+1} - x_n}{2} + U_0 =$$

$$= \frac{\rho}{2\pi} \sum_{j=1}^m I_j [K_{alj} - a_{lj}] - \varphi_{cm}, \quad l=1, \dots, n. \quad (7)$$

Розв'язавши систему (5), (7), знайдемо J_l та U_0 . Підставивши J_l і U_0 в (6), отримаємо U_{Tl} . Із (2) матимемо U_{al} , а із (1) – U_{nl} .

В системі (5), (7) величини R_l вважаються заданими. В практиці катодного захисту вони невідомі. Для їх визначення використовують дані електрометричних вимірювань величин $F_l = U_{nl} - U_{Tl}$ (різниця потенціалів труба – поверхня ґрунту над віссю труби). Віднявши від виразу (1) значення U_{Tl} із (6), отримаємо співвідношення

$$\frac{\rho}{2\pi} \sum_{i=1}^n J_i \int_{x_i}^{x_{i+1}} K_l(\xi, h) d\xi + \sum_{i=1}^{n-1} (a_{li} + a_{li+1}) J_i \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + a_{l,n} J_n \frac{x_{n+1} - x_n}{2} + U_0 =$$

$$\frac{\rho}{2\pi} \sum_{j=1}^m I_j [K_{alj} - a_{lj}] - F_l, \quad (8)$$

які разом з (5) утворюють систему рівнянь відносно J_l та U_0 . Підставивши розв'язок в (7), отримаємо R_l . Такий алгоритм можна було б реалізувати за умови, що розв'язок системи (5), (8) стійкий. Тому величини R_l шукатимемо за допомогою ітерацій. За нульове наближення візьмемо $R_{l0} = (F_l + \varphi_{cm})/J_l$.

Величину J_1 знайдемо з системи (5), (8). Підставивши R_{10} в (7), з системи (5), (7) знайдемо перше наближення J_1 та U_0 , за допомогою яких з співвідношень (8) визначаємо eps_1 (нев'язку). Наступні наближення R_{i1} шукаємо за виразом $R_{i+1} = R_i - \text{eps}_1 / J_1$. Із системи (5), (7) за новими величинами R_{i+1} знаходимо наступне наближення J_1 та U_0 . Процес продовжуємо до виконання нерівності $\max \text{eps}_i < \varepsilon$.

Зупинимось на понятті перехідного опору протикорозійного покриття. Величина його є характеристикою якості покриття. Якщо якість покриття висока, величина R_1 більша 10^5 Ом м. При наявності значних пошкоджень (покриття) величина R_1 може бути меншою 10 Ом м. В процесі ітерацій розрахунка величина R_1 може приймати значення більші 10^5 Ом м, а це свідчить про те, що на даному відрізку труби покриття не має пошкоджень, $J_1 = 0$. Тому в процесі ітерацій l -е рівняння системи для визначення J_i , $i=1, n$ замінюємо рівнянням, яке привласнювало б величині $J_i = 0$.

За цим алгоритмом розроблена програма та проведені розрахунки на відрізку діючого в Середній Азії магістрального трубопроводу. На рис. 1 зображено графік зміни різниці потенціалів F труба – поверхня ґрунту, побудований за даними електрометричних вимірювань на відрізку труби [36,5 км, 51,5 км]. На початку вона досягає $-1,9$ В, потім поступово падає до $-1,1$ В. Вже попередній аналіз свідчить про те, що покриття труби якісне на початку відрізка й значно пошкоджене вкінці його. Результати розрахунку підтвердили це. На відрізку [36,5 км, 45 км] величина R_1 більша 10^4 Ом м. Далі вона зменшується до 40 Ом м на $49,5$ км. Потенціал труби U_T на відрізку [36,5 км, 47 км] практично не змінюється, а далі знижується до $-2,1$ В. Найнижче він опускається в точці дренажу $50,25$ км (там розміщений катодний перетворювач, величина струму якого -25 А). Ще два катодних перетворювачі розміщені в точках $39,25$ км (величина струму 1 А) та $48,25$ км (величина струму 5 А), (невеличкі локальні мінімуми можна спостерігати на кривій F рис. 1).

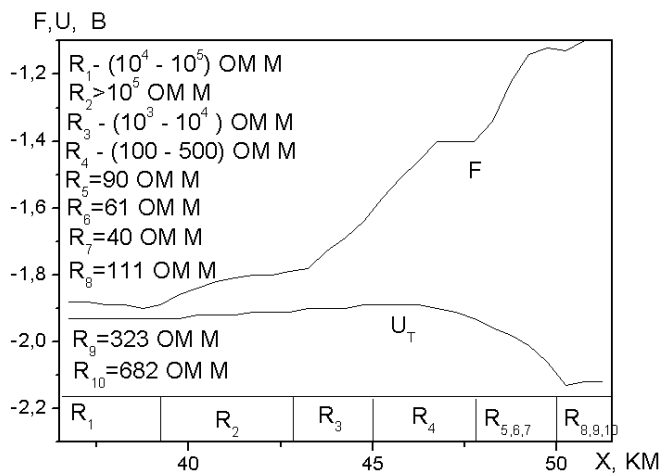


Рис. 1. Графік зміни різниці потенціалів труба – поверхня ґрунту, побудований за даними електрометричних вимірювань

На рис. 2 зображено графік зміни величини струму вздовж труби. Вона збільшується від 0 (на початку відрізка) до $0,16$ А в точці $39,25$ км. В цій же точці вона стрибає вниз до $-0,84$ А (в точці дренажу вона зменшується на величину струму катодного перетворювача й змінює в даному випадку напрям руху струму). Потім збільшується до 0 в околі 46 км і до $8,75$ А в точці $48,25$ км. Далі від $3,75$ А збільшується до $21,58$ А в точці $50,25$ км і від $-3,42$ А – до 0 .

Величина струму на відрізку [36,5 км, 46 км] змінюється дуже повільно, зате різко зростає на [46 км, 51,5 км]. Це означає, що на відрізок труби з якісним покриттям натікає дуже мало струму і дуже багато на поверхню з неякісним покриттям. В даному випадку практично майже весь струм витрачається на захист відрізка [46 км, 51,5 км].

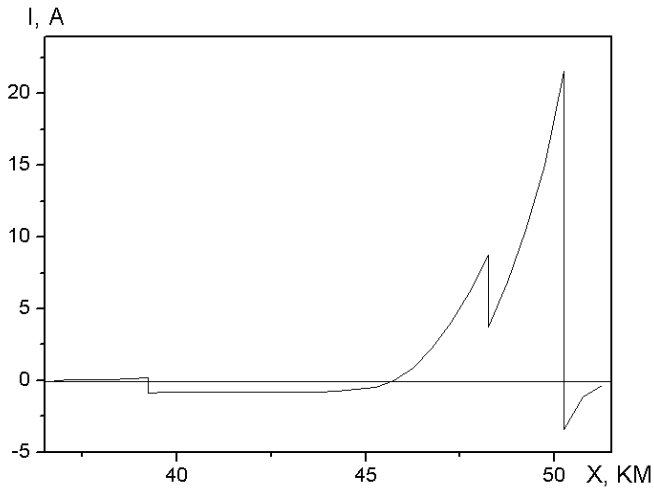


Рис. 2. Графік зміни величини струму вздовж труби

З рис. 2 видно також, що катодні перетворювачі в точках 39,25 км та 48,25 км зайві. Про це пересвідчуємось з рис. 3. Справді, при роботі катодного перетворювача в точці 50,25 км з величиною 25 А забезпечується катодний захист на всьому відрізку (на ньому крива F_1 менша -1 В). Крива I_1 (рис. 4) ще раз підтверджує, що майже весь струм витрачається на захист відрізка [46 км, 51,5 км].

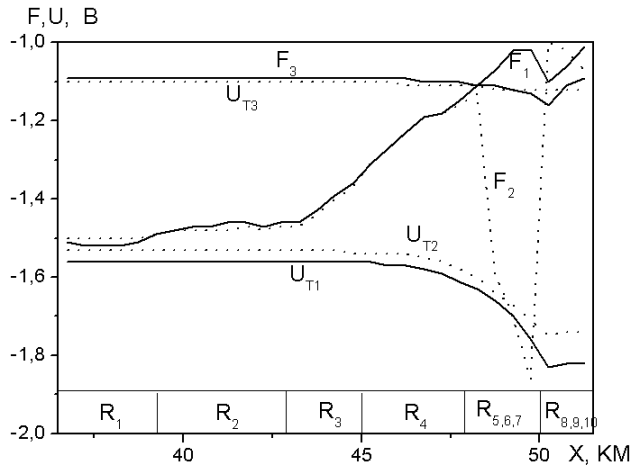


Рис.3. Графік зміни різниці потенціалів труба – поверхня ґрунту

Якщо зробити переізоляцію відрізка [48 км, 50 км] (криві F_2 та U_{T2} на рис. 3), то потенціал U_{T2} дещо підніметься, на цьому відрізку F_2 досягне величини $-1,9$ В. Зате витрати на захист зменшаться вдвічі (крива I_2 на рис. 4). Якщо переізолювати відрізок [45 км, 51,5 км], то на захист труби [36,5 км, 51,5 км] потрібно буде витратити всього лиш 0,8 А струму. Величина U_{T3} (рис. 3) змінюватиметься в околі $-1,2$ В і мало відрізнятиметься від F_3 . А це означає, що потенціал на поверхні ґрунту над трубопроводом близький до нуля ($U_{пз}$ рис. 5).

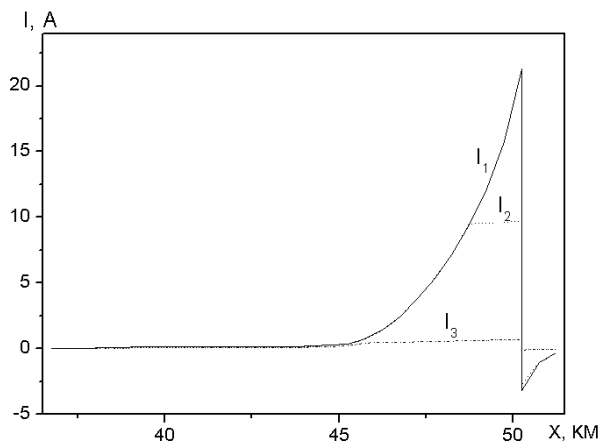


Рис. 4. Графік зміни величини струму вздовж труби

На рис. 5 зображено графіки потенціалів труби U_{Ti} ($i=0,1,2,3$) і відповідних їм потенціалів U_{ni} на поверхні ґрунту, які добре ілюструють залежність їх від якості протикорозійного покриття. При якісному покритті потенціал U_{T3} (рис. 5) близький до -1 В і майже не відхиляється від прямої, а потенціал U_{n3} близький до нуля. Якщо переізолювати лише відрізок труби [48 км, 50 км], то до 47 км U_{T2} теж мало відрізняється від прямої, але вже розміщений нижче $-1,5$ В, а після 47 км змістився вниз. Потенціал U_{n2} від нуля (де якісне покриття) змістився вниз до початку переізолюваної частини труби (48 км), потім виріс і в точці дренажу досяг найвищої точки, від якої знову різко змістився вниз. Зміна величини U_{n2} яскраво ілюструє зміну якості покриття, а також те, що часткова переізоляція істотно не покращує загальний стан захисту (потенціал U_{T1} мало відрізняється від U_{T2}). Потенціал U_{T0} отримано у випадку роботи трьох катодних перетворювачів, два з яких виявились зайвими. Шляхом їх відключення можна підняти U_{T0} до рівня U_{T1} .

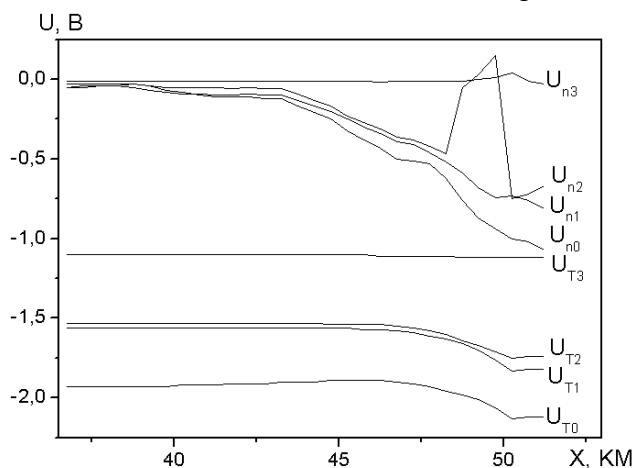


Рис. 5 Графік потенціалів труби U_{Ti} ($i=0,1,2,3$) та відповідних їм потенціалів U_{ni} на поверхні ґрунту

Проведений аналіз результатів розрахунку підтвердив актуальність математичного моделювання такого роду задач. Застосування математичних моделей дає можливість заощадження енергії та ресурсів при захисті магістральних трубопроводів від корозії.

The algorithm of calculation of parameters for optimization of an operating mode of system of cathodic protection of the main pipelines which numerical realization enables is constructed and described to receive optimum sizes of a current of cathodic stations. The analysis of results of calculation which has confirmed a urgency of mathematical modelling of such problems is lead. Applications of the offered mathematical models enables savings of energy and resources at protection of the main pipelines against corrosion.

Література

1. Лукович В. В., Ямко М.П., Хомишин В.Г. Поле мережі провідників, розміщених в електропровідному середовищі // Вісник ТДТУ. – 2004, Т.9, № 4. – С. 127-134.
2. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии / Остапенко В.Н., Ягупольская Л.Н., Лукович В.В. и др. – К.: Наук. думка, 1988. – 252 с.

Одержано 18.05.2005 р.