

УДК 620.197.5

В.Лукович, докт. тех. наук; М.Ямко, канд. техн. наук; В.Хомишин

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ПОЛЕ МЕРЕЖІ ПРОВІДНИКІВ, РОЗМІЩЕНИХ В ЕЛЕКТРОПРОВІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Побудовано математичну модель розрахунку параметрів для оптимізації режиму роботи системи катодного захисту магістральних трубопроводів, числова реалізація якої дасть можливість отримати оптимальні величини струму катодних станцій. Запропоновані теоретичні міркування можуть бути використані при розробці програми повного обстеження траси магістральних трубопроводів, зокрема для дослідження електричного поля нескінченного провідника, який розміщується в напівскінченному електропровідному середовищі.

Умовні позначення

U_{Ti}, U_{ik} , – потенціал у довільній точці та на кінцях відрізка l -ї труби, В;
 U_{ik+i}
 ρ_{Ti}' – опір одиниці довжини l -го трубопроводу (лінійний опір), Ом/м;

I	– струм у трубопроводі, A ;
N	– кількість труб, шт ;
$I_{ок}$	– струм в точці дренажу, A ;
I_{oj}	– струм j -го заземлення, A ;
x_{aj}, y_{aj}	– координати j -го заземлення, m ;
J_i	– густина струму i -го трубопроводу, A/m ;
ξ	– біжуча координата, яка відраховується вздовж осі трубопроводу, m ;
y_i, h_i	– координати i -го трубопроводу, m ;
ρ	– питомий опір ґрунту, $\text{Ом}\cdot m$;
$F_{\text{кл}}$	– різниці потенціалів труба–поверхня ґрунту, B ;
$\Phi_{\text{ст}}$	– стаціонарний потенціал металу, B ;
a_l	– радіус l -ї труби, m ;
h_l	– відстань від поверхні ґрунту до осі труби, m ;
ρ_l	– перехідний питомий опір протикорозійного покриття l -ї труби, $\text{Ом}\cdot m$.

У попередніх публікаціях, де обговорюється дана проблема, назві цієї статті відповідала б наступна: “Поле системи катодного захисту магістральних трубопроводів”. В першій з них надається перевага полю на поверхні труби (поверхні металу), у другій – зовнішньому полю трубопроводів. Відсутність належної уваги до моделювання поля на поверхні труби призвела до значної перевитрати електроенергії на протикорозійний захист. Вже в методиці проектування катодного захисту магістральних трубопроводів зосереджена увага на зовнішнє поле трубопроводів. Саме виходячи з дослідження поля нескінченного провідника, який знаходиться в напівнескінченному електропровідному середовищі, побудовані формули для знаходження зони захисту, опору розтіканню анодного заземлення, вхідного опору, потенціалу анодного заземлення та потенціалу труби в точці дренажу (відносно нескінченно віддаленої точки). Але ж в розрахованій зоні захисту знаходиться відрізок труби, який є частиною мережі труб (провідників струму) в системі магістральних трубопроводів. Тому в переважній більшості випадків розраховані при проектуванні потенціал труби та анодного заземлення в реальних умовах експлуатації систем захисту слід відрегулювати. В програму повного обстеження траси магістральних трубопроводів також входить в основному дослідження зовнішнього поля (електрометричні вимірювання методом виносного електроду та градієнта потенціалу). При цьому нехтуються вимірювання потенціалу анодного заземлення, за допомогою якого легко знайти величину потенціалу труби в точці дренажу. Нехтуються вимірювання різниці потенціалів сусідніх труб, а також на відрізку труби між двома сусідніми контрольно-вимірювальними пунктами (КВП). Цієї інформації було б цілком досить, щоб визначити значення потенціалів в точках дренажу та в точках розміщення КВП. Як наслідок нехтування цими величинами є невиконання технології захисту на діючій трасі. Часто зона захисту однієї катодної станції поширюється на зони сусідніх станцій. А це призводить до перевитрати електроенергії, до невиправданого збільшення величини захисного потенціалу, яка інколи перевищує допустиму. Відсутність цих величин в даних електрометричних вимірювань завадила розробці математичної моделі розрахунку оптимального режиму роботи катодного захисту.

Побудуємо таку модель з врахуванням того, що величини потенціалів труб в точках дренажу та точках розміщення КВП нам відомі. Розглянемо деякі співвідношення на поверхні труби. Потенціал U_{Tl} в довільній точці $[x_k, x_{k+1}]$ відрізка l -ї труби, на кінцях якого задані значення U_{lk} та U_{lk+1} потенціалів, визначається за формулою [3]:

$$U_{Tl} = U_{lk} \frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}} + U_{lk+1} \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} + \rho'_{Tl} \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} \int_k^x (\xi - x_k) J_l(\xi) d\xi +$$

$$+ \rho' \frac{-x - x_k}{\pi (x_{k+1} - x_k)} \int_x^{x_{k+1}} (x - \xi) J_l(\xi) d\xi. \quad (1)$$

Величину струму I в довільній точці цього відрізка знайдемо за формулою:

$$\frac{1}{\rho_{T'l}} \frac{dU_{Tl}}{dx} = I. \quad (2)$$

Продиференціювавши вираз (1) по x та поділивши його на $\rho_{T'l}$, отримаємо:

$$I = \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho' (x_{k+1} - x_k)} - \frac{1}{x - x_k} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (\xi - x_k) J_l(\xi) d\xi + \frac{1}{x - x_{k+1}} \int_{x_{k+1}}^{x_k} (x - \xi) J_l(\xi) d\xi. \quad (3)$$

В точці $x = x_k$ матимемо

$$I_{lk} = \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho' (x_{k+1} - x_k)} + \frac{1}{x_{k+1} - x_k} \int_{x_{k+1}}^{x_k} (x - \xi) J_l(\xi) d\xi, \quad (4)$$

а в точці $x = x_{k+1}$

$$I_{lk+1} = \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho' (x_{k+1} - x_k)} - \frac{1}{x_{k+1} - x_k} \int_{x_{k+1}}^{x_k} (\xi - x) J_l(\xi) d\xi. \quad (5)$$

Формули (3)–(5) виражають закон Ома провідника, розміщеного в електропровідному середовищі. Віднявши вираз (5) від (4), отримаємо

$$I_{lk} - I_{lk+1} = \int_{x_k}^{x_{k+1}} J_l(\xi) d\xi. \quad (6)$$

За формулою (6) сумарна величина струму обміну між відрізком $[x_k, x_{k+1}]$ труби та електропровідним середовищем, в якому він знаходиться, дорівнює різниці величин струмів на кінцях цього відрізка. Іншими словами, величина струму I_{k+1} змінилась щодо до I_k на сумарну величину струму обміну між відрізком та середовищем. Побудуємо ще одне співвідношення для величини струму в точці x_k

$$I_{lk} = \frac{U_{lk} - U_{lk-1}}{\rho' (x_k - x_{k-1})} - \frac{1}{x_k - x_{k-1}} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (\xi - x_{k-1}) J_l(\xi) d\xi. \quad (7)$$

Віднявши (7) від (4), отримаємо

$$I_{lk}^+ - I_{lk}^- = \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho' (x_{k+1} - x_k)} - \frac{U_{lk} - U_{lk-1}}{\rho' (x_k - x_{k-1})} - \frac{1}{x_{k+1} - x_k} \int_{x_{k+1}}^{x_k} (x - \xi) J_l(\xi) d\xi - \frac{1}{x_k - x_{k-1}} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (\xi - x_{k-1}) J_l(\xi) d\xi. \quad (8)$$

У формулі (8), за правилом Кірхгофа, $I_{k-} - I_{k+} = 0$ (через I_{k+} позначено величину струму за виразом (4), а через I_{k-} – за виразом (7)), якщо в точці k відсутній відвід струму (з даної труби на іншу (перемичка), або до катодної станції (точка дренажу)), або $I_{k-} + I_{k+} = I_k$ при наявності такого відводу. В результаті вираз (8) набуде вигляду

$$0 = \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho_{lk+1}'(x_{k+1} - x_k)} - \frac{U_{lk} - U_{lk-1}}{\rho_{lk}'(x_k - x_{k-1})} - \frac{1}{x_{k+1} - x_k} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - \xi) J_l(\xi) d\xi - \frac{1}{x_k - x_{k-1}} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (\xi - x_{k-1}) J_l(\xi) d\xi, \quad (9)$$

у випадку відсутності відводу струму з точки x_k та

$$I_{lk} = \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho_{lk+1}'(x_{k+1} - x_k)} - \frac{U_{lk} - U_{lk-1}}{\rho_{lk}'(x_k - x_{k-1})} - \frac{1}{x_{k+1} - x_k} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - \xi) J_l(\xi) d\xi - \frac{1}{x_k - x_{k-1}} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (\xi - x_{k-1}) J_l(\xi) d\xi \quad (10)$$

при наявності його.

Побудуємо ще декілька співвідношень, між величинами потенціалів та струмів при наявності перемичок. Припустимо, що струм не стікає з перемички в ґрунт і не натікає з ґрунту на неї. Якщо відомий опір перемички між двома трубами, то, згідно із законом Ома, отримаємо рівність

$$U_{l+1,k} - U_{lk} = R_{lpk} I_{lpk}. \quad (11)$$

Якщо в околі перемички відсутня точка дренажу (відсутній кабель, по якому струм з труби проходить до катодної станції), то алгебраїчна сума струмів перемички дорівнює нулю, а при наявності її (точки дренажу) – струму в цій точці. Ці рівності мають вигляд

$$\sum_{l=1}^{N-1} I_{plk} = 0, \quad (12)$$

$$\sum_{l=1}^{N-1} I_{plk} = I_{0k}. \quad (13)$$

Підставивши в (12) та в (13) замість I_{lpk} їх вираз (10), отримаємо, відповідно, рівняння

$$\sum_{l=1}^{N-1} \left\{ \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho_{lk+1}'(x_{k+1} - x_k)} - \frac{U_{lk} - U_{lk-1}}{\rho_{lk}'(x_k - x_{k-1})} - \frac{1}{x_{k+1} - x_k} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - \xi) J_l(\xi) d\xi + \frac{1}{x_k - x_{k-1}} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (\xi - x_{k-1}) J_l(\xi) d\xi \right\} = 0; \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^{N-1} \left\{ \frac{U_{lk+1} - U_{lk}}{\rho_{lk+1}'(x_{k+1} - x_k)} - \frac{U_{lk} - U_{lk-1}}{\rho_{lk}'(x_k - x_{k-1})} - \frac{1}{x_{k+1} - x_k} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - \xi) J_l(\xi) d\xi + \frac{1}{x_k - x_{k-1}} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (\xi - x_{k-1}) J_l(\xi) d\xi \right\} = I_{0k}. \quad (15)$$

Кількість рівнянь (14) та (15) дорівнює кількості перемичок на вибраній ділянці траси.

У співвідношення (9) входять лише потенціали U_{lk-1} , U_{lk} , U_{lk+1} в околі трьох сусідніх КВП та густини струмів відрізків $[x_{k-1}, x_k]$ та $[x_k, x_{k+1}]$. Так як значення потенціалів U_{lk-1} , U_{lk} , U_{lk+1} відомі, то співвідношення (9) можемо використати як

рівняння відносно невідомих густин струмів на відрізках $[x_{k-1}, x_k]$ та $[x_k, x_{k+1}]$. Їх буде стільки, скільки точок КВП (на вибраній ділянці траси), в яких відсутній відвід струму (відсутні перемички в точці x_k).

Використовуючи співвідношення (4), (5), (6), побудуємо рівняння, які описують баланс струмів кожної нитки вибраної ділянки траси. Адже сумарна величина струму, який натікає з ґрунту на трубу (або витікає з труби в ґрунт (при наявності анодних зон на трубі)), дорівнює алгебраїчній сумі величин струмів, в точках дренажу та перемичок, а також струмів на кінцях труби. Побудовані таким чином рівняння з невідомими величинами густини струму (величини потенціалів, які входять в ці рівняння, вважаємо відомими). Всі вони належать до рівнянь на поверхні труб (описують поле труб, тобто мережі провідників).

Доповнимо ці рівняння співвідношеннями, які описують зовнішнє поле трубопроводів. Потенціал поля точкових джерел (анодних заземлень) та трубопроводів опишемо за допомогою співвідношення [1]

$$U = \frac{\rho(x)}{4\pi} \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} I_i \left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-(-1)^i h)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \frac{\rho(x)}{4\pi} \sum_{j=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} J_j(\xi) \sum_{i=1}^N \left[(x-\xi)^2 + (y-y_i)^2 + (z-(-1)^i h)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi. \quad (16)$$

Розрахунок поля проводиться в околі труби. Тому допускаємо, що величина $\rho(x)$ на однорідних ділянках траси стала і дорівнює заданому значенню цієї величини. На межі переходу від однієї однорідності до другої візьмемо середню величину питомого опору ґрунту $\rho_{12} = \frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$.

Виділимо ділянку траси довжиною $2L$. Допустимо, що на кінцях цієї ділянки виконуються умови симетрії. Замінімо нескінченні границі інтегрування на L та обмежимося лише трьома відрізками інтегрування $[-3L, -L]$, $[-L, L]$ та $[L, 3L]$. На поверхні ґрунту вираз (16) з врахуванням цих обмежень матиме вигляд

$$U = \sum_{n=-1}^1 \left\{ \frac{\rho(x)}{4\pi} \sum_{j=1}^M \int_{-L}^L J_j(\xi) \left[(x-\xi+2Ln)^2 + (y-y_i)^2 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi - \frac{\rho(x)}{2\pi} \sum_{i=1}^N \int_{-L}^L I_i \left[(x-x_i+2Ln)^2 + (y-y_i)^2 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\}. \quad (17)$$

За даними електрометричних вимірювань величина $U_{nl}-U_{lk}$ чисельно дорівнює різниці потенціалів труба-поверхня ґрунту F_{lk1} , отриманій методом виносного електроду. В результаті отримаємо

$$U_{nl}-U_{lk} = \sum_{n=-1}^1 \left\{ \frac{\rho(x)}{4\pi} \sum_{j=1}^M \int_{-L}^L J_j(\xi) \left[(x-\xi+2Ln)^2 + (y-y_i)^2 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi - \frac{\rho(x)}{2\pi} \sum_{i=1}^N \int_{-L}^L I_i \left[(x-x_i+2Ln)^2 + (y-y_i)^2 + h^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} - F_{lk1}, \quad k1=1, N1. \quad (18)$$

Через $N1$ позначено кількість значень величини F_{lk1} , виміряних в точках (x_{k1}, y_1) поверхні ґрунту над l -им трубопроводом. Система інтегральних рівнянь (18) матиме сенс лише в тому випадку, якщо, скориставшись апроксимацією функції F_{lk1} , заданої в

точках, поширити їх на весь відрізок. В даній роботі функцію F_{clk1} на відрізку $[x_{k1}, x_{k1+1}]$ замінимо середнім значенням її на кінцях цього відрізка,

$$F_{clk1} = \frac{F_{lk1} + F_{lk1+1}}{2}. \quad (19)$$

Перейшовши від неперервної моделі (18) до дискретного її аналогу, отримаємо квадратну систему рівнянь відносно невідомих J_{lk1} . Доповнивши її дискретними аналогами рівнянь (4) – (15) на поверхні l -ї труби, отримаємо алгебраїчну систему, кількість рівнянь в якій перевищуватиме кількість невідомих. Помноживши зліва трансформовану матрицю системи на розширену матрицю (включає праву частину), отримаємо матрицю, в якій кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих. Підставимо розв'язок її в дискретний аналог рівняння

$$\rho J + \sum_{n=-1}^1 \left\{ \frac{\rho(x_{lk1})}{4\pi} \sum_{i=1}^L J(\xi) \sum_{il=0}^{k1} \left[(x - \xi + 2Ln)^2 + W \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi \right\} =$$

$$= \sum_{n=-1}^1 \left\{ \frac{\rho(x_{lk1})}{2\pi} \sum_{j=1}^M I_{0j} \left[(x - x_{lk1} + 2Ln)^2 + (y - y_{lk1})^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - U_{lk1} - \Phi_{cm} \right\}, \quad k1=1, N1; \quad (20)$$

$$W_{liil} = \begin{cases} a_l^2, & l=i, i1=0; \\ 4h_l^2, & l=i, i1=1; \\ (y - y_{lk1})^2 + (h_l - (-1)^{i1} h_l)^2. \end{cases}$$

З рівняння (20) знайдемо величину перехідного опору протикорозійного покриття l -ї труби ρ_l . Знаючи величину ρ_l , можна побудувати математичну модель для знаходження оптимальних величин струму I_{0j} , тобто таких, які б забезпечували захист кожного із трубопроводів при раціональному використанні струму катодними станціями.

За даною методикою побудовані алгоритм та програма розрахунку величин ρ_l та I_{0j} .

На рис. 1 зображені графіки різниці потенціалів труба–поверхня ґрунту чотириниткового трубопроводу, побудовані за даними електрометричних вимірювань на ділянці 63 – 85 км одного з магістральних трубопроводів в Середній Азії. На захист цієї ділянки працюють 7 катодних станцій в режимі спільного захисту. Сумарна витрата струму в такому режимі роботи – 118 А. За даними розрахунку побудовані нові графіки цієї ж ділянки траси, які зображені на рис. 2.

Порівнюючи графіки обох малюнків, бачимо, що на мал. 2 вони нижчі, ніж відповідні їм графіки на рис. 1. Сумарна витрата струму на повний захист виділеної ділянки 102.4 А. Зазначимо, що розрахунки проведені в режимі спільного захисту. Якщо провести захист з регульованим відводом струму з точок дренажу кожної труби безпосередньо до катодної станції, режим роботи системи захисту можна ще покращити.

На рис. 3 зображені графіки величини перехідного опору протикорозійного покриття труб цієї ж ділянки траси. Два нижні графіки ілюструють зниження якості покриття труб практично на всій ділянці траси. Два графіки, розміщені над нижніми, свідчать про пошкодження порівняно нового покриття. Саме для труб з таким покриттям потрібен оптимальний режим роботи захисту. Не можна допускати погіршення покриття саме в провалах, бо досягнення захисту в провалах призведе не тільки до невиправданих витрат струму, а й збільшить величину захисного потенціалу

на ділянках цієї труби з якісним покриттям до розмірів, які значно перевищують допустиму верхню межу.

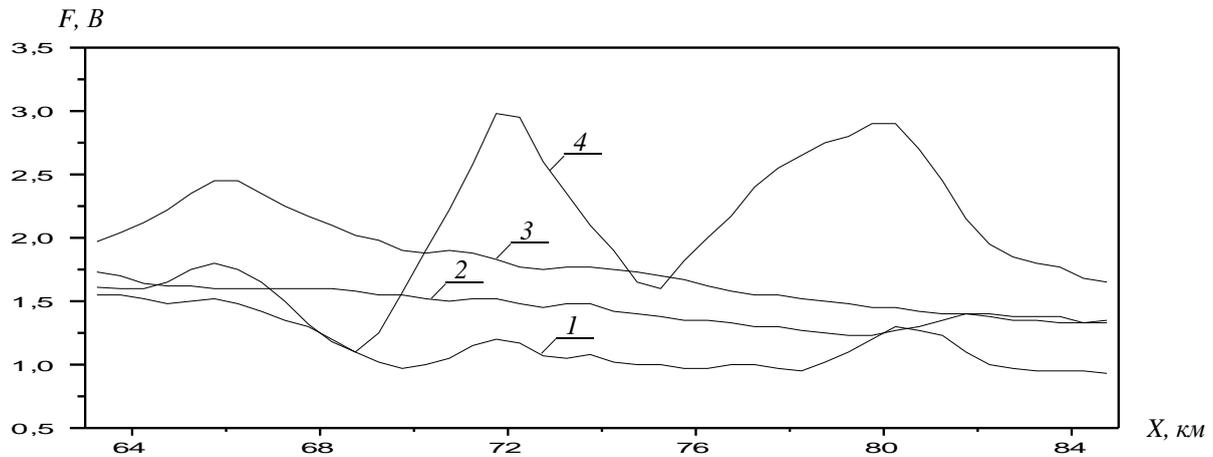


Рис. 1. Графіки зміни різниці потенціалів трубопровід–поверхня ґрунту 4-ниткового магістрального трубопроводу, побудовані за даними електрометричних вимірювань

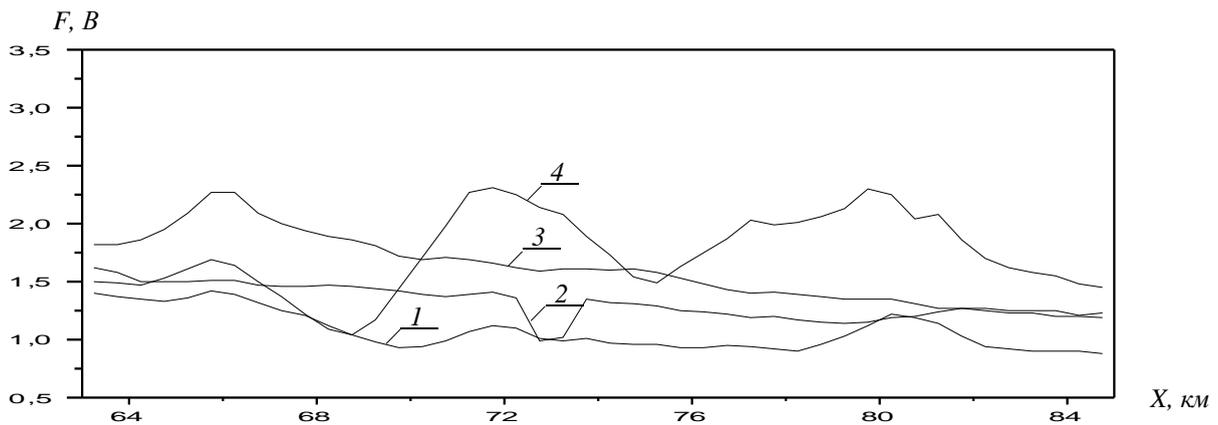


Рис. 2. Графіки зміни різниці потенціалів трубопровід–поверхня ґрунту 4-ниткового магістрального трубопроводу, побудовані за результатами розрахунку за запропонованою моделлю

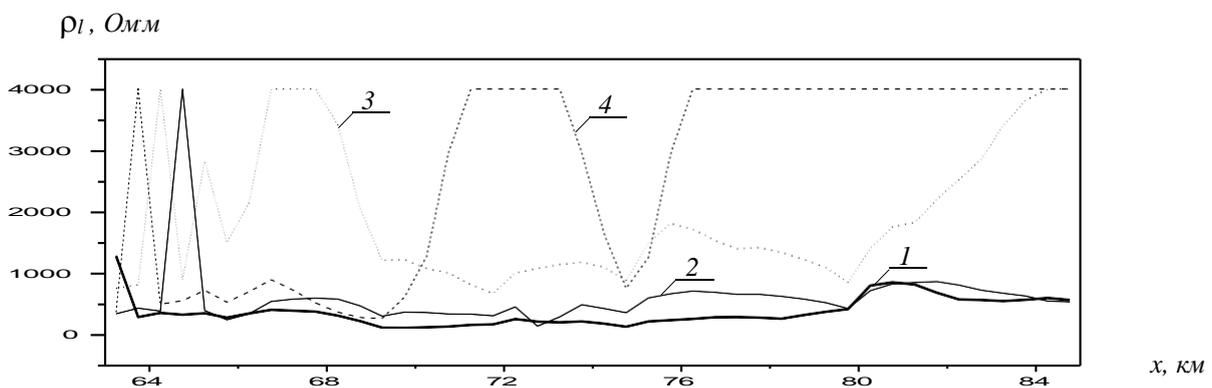


Рис. 3. Графіки зміни величини перехідного опору протикорозійного покриття трубопроводів, побудовані за результатами розрахунку за запропонованою моделлю

Отримані результати ще раз переконують в необхідності перебудови всієї системи протикорозійного захисту магістральних трубопроводів. Спільними зусиллями теорії та практики потрібно перебудувати методика проектування та експлуатації системи захисту.

Built mathematical model of calculation of parameters for optimization of a duty of a system of a cathodic protection of long distance pipe lines which numerical embodying will enable to gain optimal magnitudes of currents of cathodic stations.

Література

1. Инструкция по проектированию и расчету электрохимической защиты магистральных трубопроводов и промышленных объектов. – М.: издание ВНИИСТа, 1980. – 175 с.
2. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии / Остапенко В.Н., Ягупольская Л.Н., Лукович В.В. и др. – К.: Наук. думка, 1988. – 252 с.
3. Лукович В.В. Модель розрахунку оптимального режиму роботи катодного захисту магістральних газопроводів // Геофіз. журнал. – 2002. – № 24. – С. 121-124.

Одержано 11.05.2004 р.