

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.04.033>

УДК 537.8: 681.518.3: 620.1: 621.643.2

Р.М. Джала, <https://orcid.org/0000-0002-0197-0389>

Б.Я. Вербенець

В.Р. Джала

М.І. Мельник, <https://orcid.org/0009-0000-1641-4900>

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: dzhala.rm@gmail.com, maryan.mi@gmail.com

Електродинамічний критерій якості ізоляції підземного трубопроводу

Представлено академіком НАН України З.Т. Назарчуком

Описано триєдину математичну модель електромагнетного поля підземного трубопроводу, яка базується на розв'язаннях крайових задач електродинаміки для циліндричних структур, теорії електричних кіл з розподіленими параметрами та теорії розподілу магнетного поля електричних струмів. На цій основі досліджено залежності характеристик поля від параметрів труби і середовища та розроблено методи і засоби діагностичних обстежень протикорозійного захисту магістральних трубопроводів і трубопроводних мереж. Показано доцільність зіставлення коефіцієнта зникання поля вздовж трубопроводу із зниканням електромагнетної хвилі в ґрунті та запропоновано електродинамічний критерій для оцінювання якості захисного покриття на різних ділянках. Наведено приклади оперативного виявлення ділянок з незадовільною ізоляцією підземних магістральних трубопроводів за безконтактними вимірами струмів.

Ключові слова: електромагнетне поле, підземний трубопровід, дисперсійне рівняння, ізоляційний покрив, заступні схеми, зникання струму, безконтактні вимірювання, критерій якості, метод виявлення.

З погляду електродинаміки металевий трубопровід, покритий шаром ізоляції і розміщений у середовищі, є багатошаровою циліндричною структурою, в якій можливі різні неоднорідності та дефекти [1]. Підземними трубопроводами (ПТ) здебільшого транспортують газ, нафту, воду, хімічні продукти, тому вони соціально і економічно значимі та важливі для населення і промисловості. Впливи середовища зумовлюють корозивні пошкодження, які призводять до втрат та перебоїв постачання транспортіваних продуктів, забруднен-

Ц и т у в а н н я: Джала Р.М., Вербенець Б.Я., Джала В.Р., Мельник М.І. Електродинамічний критерій якості ізоляції підземного трубопроводу. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2023. № 4. С. 33—42. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.04.033>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

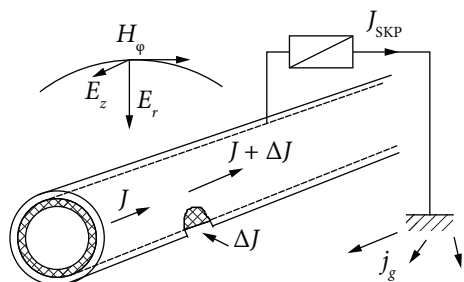


Рис. 1. Підземний трубопровід з ізоляційним покриттям і установкою катодного захисту (SKP). Складові ЕМ поля струму трубопровідної лінії

ня довілля, аварії та катастрофи, для ліквідації яких необхідні великі обсяги робіт і значні фінансові витрати [1, 2].

Сталеві ПТ захищені від корозії ізоляцією, яка перешкоджає прониканню ґрунтового електроліту до поверхні металу і є основою пасивного захисту. Проте під час спорудження та експлуатації ізоляційні покриття руйнуються і старіють зазвичай скоріше від металу. Для гальмування корозії у місцях пошкоджень ізоляції використовують катодну поляризацію спеціальними установками (УКЗ) [1, 2] (рис. 1). Довжина зони дії УКЗ залежить від якості ізоляції ПТ. З метою обґрунтованого планування своєчасного ремонту для запобігання пошкоджень і продовження термінів експлуатації ПТ необхідні періодичні діагностичні обстеження [2].

Традиційно контроль протикорозійного захисту здійснюють контактними електрометричними методами, які достатньо прості [1, 2]. Проте вони мають недолік — трудомісткість і складнощі забезпечення достатньої кількості надійних контактів вимірювальних електродів з трубою і землею. В електрометрії користуються тільки тією частиною інформації, яка є в електричному полі. Магнетне поле здебільшого використовують лише для визначення розміщення ПТ [3]. Застосування безконтактних електромагнетних (ЕМ) методів істотно підвищує оперативність та інформативність обстежень ПТ [2].

Метою роботи є встановлення критерію для експрес-оцінки якості ізоляції ПТ за розподілом ЕМ поля ПТ. Розглянемо коротко електродинамічну модель трубопроводу [2, 4], яка описує поле структури з урахуванням реальних геометричних і ЕМ параметрів та дає можливість дослідити його інформативні характеристики для розробки методів і засобів контролю і діагностики технічного стану об'єкта, визначення вірогідності результатів. Протяжний ізольований трубопровід разом із землею як зворотним проводом можна також розглядати як електричну трубопровідну лінію, розподілені параметри якої визначають на основі розв'язків електродинамічних крайових задач [2, 4]. Для ефективних досліджень вимірюваних характеристик поля, створеного струмами, що протікають по трубопроводах, використовують представлення їх лінійними струмопроводами [3].

Така триєдина модель [2—4] дає можливість ефективно досліджувати як основні закономірності, так і тонку структуру ЕМ явищ, пов'язаних з корозійним станом ПТ, полегшує аналіз та розробку методів і пристроїв контролю, є основою для інтерпретації результатів і діагностики.

Електромагнетне поле ізольованої труби в електропровідному середовищі. ЕМ поле у кожній точці простору і часу описують векторами напруженості електричного і магнітного полів, які задовольняють рівняння Максвелла і відповідні крайові умови. Оскільки довільно змінне в часі поле можна представити розкладом в інтеграл Фур'є по частотах, обмежувемось розглядом монохроматичного поля з частотою $\omega = 2\pi f$, яке описується рівнянням Гельмгольца [4, 5]

$$\Delta\Pi + k^2\Pi = 0, \tag{1}$$

де $k = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - i \omega \mu \sigma}$ — хвильове число середовища характеризує електромагнетні параметри (для кожної з підобластей структури).

У циліндричній системі координат (r, φ, z) з віссю z , направленою вздовж осі труби, поле описують поздовжніми складовими електричного Π_z^E і магнетного Π_z^M векторів Герца (поляризаційні вектор-потенціали), які можна подати розкладом за елементарними хвильовими функціями

$$\Pi_z^{E,M}(r, \varphi, z; \omega) = \int \sum_n R_n^{E,M}(r) \cdot \Phi_n^{E,M}(\varphi) \cdot e^{i\omega t - \gamma z} d\gamma, \quad (2)$$

де $\gamma = \alpha + i\beta$ — поздовжнє хвильове число характеризує поширення поля конкретної хвилі вздовж структури; α — коефіцієнт зникання; β — фаза. Азимутальні $\Phi_n(\varphi)$ і радіальні $R_n(r)$ функції описують поле n -ї азимутальної (просторової) гармоніки у поперечній площині. Вони виражаються комбінаціями тригонометричних і бesselевих функцій відповідно і конкретизуються граничними умовами для кожної підобласті структури.

Вектори напруженості поля пов'язані з векторами Герца формулами [5, 6]

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= k^2 \mathbf{\Pi}^E + \text{grad} \text{ div} \mathbf{\Pi}^E - i\omega \mu \text{rot} \mathbf{\Pi}^M, \\ \mathbf{H} &= (\sigma + i\omega \varepsilon) \text{rot} \mathbf{\Pi}^E + k^2 \mathbf{\Pi}^M + \text{grad} \text{ div} \mathbf{\Pi}^M. \end{aligned} \quad (3)$$

У загальному випадку (наявність дефектів, порушення симетрії структури) хвилі електричного і магнетного типів зв'язані між собою [3, 4]; тоді треба враховувати всі шість компонент напруженості поля.

Для встановлення закономірностей розподілу ЕМ поля вздовж ПТ можна обмежитись дослідженням симетричної структури. Нехай дано циліндричну металеву трубу з внутрішнім a_b та зовнішнім a_T радіусами, покриту шаром ізоляції товщиною $a_i - a_T$ і розміщену в оточуючому слабопровідному середовищі $r > a_i$. У такій структурі існують власні хвилі електричного типу, які можуть поширюватись вздовж труби. За симетрії структури її поле описується компонентами E_z, E_r, H_φ , вирази яких отримують з формул (2)—(3) при $n = 0$, $\Phi_n^M(\varphi) = 0$, $\Phi_n^E(\varphi) = 1$. Маємо [2, 4]

$$E_z = v^2 R_0^E, \quad E_r = -i\gamma R_0^{E'}, \quad H_\varphi = \frac{k^2}{i\omega \mu} R_0^{E'}, \quad (4)$$

де v — поперечне хвильове число для кожної з частинних областей структури; $v_j^2 = k_j^2 - \gamma^2$. Штрих означає диференціювання функції за її аргументом.

Радіальні функції зовнішньої області для такої E -поляризованої хвилі з урахуванням умови випромінення мають вигляд [2—4]

$$R_{c0}(r) = A_c H_0^{(2)}(v_c r), \quad r \geq a_i, \quad (5)$$

де $H_0^{(2)}(v_c r)$ — функція Генкеля [5]. Для області ізоляції запишемо

$$R_{i0}(r) = A_i B_0^{iT}(v_i r), \quad a_T \leq r \leq a_i, \quad (6)$$

де A_i, A_c — невідомі коефіцієнти. З урахуванням умов неперервності E_z і H_ϕ на поверхнях труби $r=a_T$ та $r=a_b$ отримуємо вираз для радіальної функції поля в області ізоляційного покритву:

$$B_0^{iT}(v_i r) = J_0(v_i r) - N_0(v_i r) \frac{v_i Y_r^{Tb} J_0(v_i a_T) - \frac{k_i^2}{i\mu_i \omega} J_0'(v_i a_T)}{v_i Y_r^{Tb} N_0(v_i a_T) - \frac{k_i^2}{i\mu_i \omega} N_0'(v_i a_T)} \quad (7)$$

та аналогічний вираз для поля труби [4]. Тут $J_n(vr)$ і $N_n(vr)$ — функції Бесселя і Неймана; радіальні адмітанси циліндричної труби Y_r^{Tb} та її внутрішньої області Y_r^b мають вигляд:

$$Y_r^{Tb} = \frac{ik_T^2}{\omega \mu_T v_T} \frac{B_0^{Tb'}(v r)}{B_0^{Tb}(v r)} \text{ при } r=a_T, \quad (8)$$

$$Y_r^b = \frac{ik_b^2}{\omega \mu_b v_b} \frac{J_0'(v_b r)}{J_0(v_b r)} \text{ при } r=a_b. \quad (9)$$

Вони введені за співвідношенням $H_\phi = -Y_r E_z$ та враховують геометричні й електромагнетні параметри шарів структури [2—4].

Формули (5) і (6) описують розподіл поля в оточуючому середовищі та в ізоляції з урахуванням електродинамічних параметрів даної чотиришарової структури. У них ще не визначені амплітудні коефіцієнти A_i, A_c та постійна поширення γ . З умов неперервності дотичних компонент поля на зовнішній поверхні ізоляції труби маємо

$$v_i^2 A_i B_0^{iT}(v_i a_i) = v_c^2 A_c H_0^{(2)}(v_c a_i), \quad (10)$$

$$\frac{k_i^2 v_i}{\mu_i} A_i B_0^{iT \odot}(v_i a_i) = \frac{k_c^2 v_c}{\mu_c} A_c H_0^{(2) \odot}(v_c a_i). \quad (11)$$

Ця система однорідних лінійних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів A допускає нетривіальний розв'язок лише тоді, коли її визначник (детермінант) дорівнює нулю. З цієї умови визначають сталу поширення γ . Розкриваючи детермінант, приходимо до трансцендентного рівняння, яке з використанням введених адмітансів записується у компактному вигляді $Y_r^{Tb} = Y_r^{ic}$ при $r = a_T$ [4]. Корені цього (дисперсійного) рівняння γ_{0m} дають допустимі значення сталої поширення і таким чином визначають характеристичні (власні) симетричні поперечно-магнетні хвилі, які можуть поширюватись вздовж даної багатшарової циліндричної структури (уздовж трубопроводу).

За реальних параметрів труби, ізоляції та електропровідності середовища, для низьких частот при $|k_T r_T| \gg 1$, $|v_g r_i| \ll 1$, $|k_g r_i| \ll 1$ функції Бесселя замінюють їх наближеними виразами [4—6] і сталу поширення основного типу квазі-ТЕМ-хвилі знаходять методом послідовних наближень [5, 7].

Наявність поля ПТ у вигляді квазі-ТЕМ-хвилі (яка існує при всіх, включаючи і нульову, частотах) дозволяє використовувати еквівалентні заступні схеми трубопровідної лінії [4, 8,

9)], параметри якої визначають за розв'язками електродинамічної задачі. Цим спрощується дослідження залежностей поширення поля від параметрів труби, стану ізоляції і середовища, що необхідне для контролю стану трубопроводу електромагнетним методом [2, 3].

Досліджено приклади ПТ з різними параметрами ізоляції і середовища [2, 4, 7–10]. Для випадку дуже добре ізольованого металевого циліндра ($\sigma_i \ll \omega \epsilon_i$), розміщеного у морській воді з електропровідністю $\sigma_g > 0,1 \dots 0,01$ Сим/м при невисоких частотах (не менших 100 Гц, але для $|k_g r| < 1$) а також для реальних ПТ, де практично маємо $\sigma_i \gg \omega \epsilon_i$, отримано формули для коефіцієнтів зникання α і фази β [2]. Проведено розрахунки характеристик поширення поля залежно від діаметра труби, опору ізоляції, електропровідності ґрунту і частоти поля [2, 8–10]. Отримані теоретичні результати добре узгоджуються з експериментальними даними. У першому випадку для морських трубопроводів зникання α визначається частотою поля та параметрами ізольованого циліндра і майже не залежить від змін провідності середовища. На відміну від цього, для ПТ, де електропровідність ізоляційного покриття визначають за практично не високим перехідним опором (у шарі ізоляції можна нехтувати струмом зміщення порівняно зі струмами провідності), значення α залежить і від провідності середовища.

Для трубопровідної лінії сталу поширення $\gamma = \sqrt{YZ}$ визначають за повними поперечною провідністю $Y = G + j\omega C$ та поздовжнім опором $Z = R + i\omega L$, де R, L та G, C — погонні поздовжні опір і індуктивність та поперечні провідність і ємність лінії; $\omega = 2\pi f$, де f — частота струму. Ці параметри залежать від розмірів та електромагнетних характеристик труби, ізоляції, ґрунту і частоти поля. Їх визначають на основі розв'язків крайових задач електродинаміки [2–4].

Проведені зіставлення цих параметрів для реальних сталевих магістральних ПТ показують [2, 8–10], що за змінних струмів з частотою 30...1000 Гц, поздовжнім опором металу труби, реактивним опором ізоляційного шару та активним опором ґрунту з електропровідністю $\sigma_g > 10^{-3}$ Ом⁻¹м⁻¹ можна нехтувати порівняно з індуктивним опором ґрунту $R_g \ll \omega L_g$. Таким чином, для ПТ поздовжній повний опір лінії визначається погонною індуктивністю ґрунту за формулою

$$L_g = \frac{\mu_g}{2\pi} (5,98 - \ln a \sqrt{f \sigma_g}), \text{ Гн/м}, \quad (12)$$

де a — зовнішній радіус трубопроводу; σ_g і μ_g — електропровідність і магнетна проникність ґрунту.

Поперечна повна провідність $G + j\omega C$ на одиницю довжини трубопровідної лінії складається з послідовно з'єднаних повних провідностей ізоляційного шару G_i і землі G_g . Для реальних ПТ їх реактивними складовими можна нехтувати $\omega C \ll G$. Поперечна провідність ізоляційного шару пов'язана з його перехідним опором $R_i = 2\pi a / G_i$, який підлягає контролю.

Для оцінки поперечної провідності землі за співвідношенням $Y_g \approx \gamma^2 / Z_g$ маємо [2, 10]

$$G_g \approx \gamma^2 / j\omega L_g, \quad (13)$$

де коефіцієнт поширення ЕМ поля в ґрунті $\gamma = \sqrt{j\omega \mu_g (\sigma_g + j\omega \epsilon_g)} \approx (1 + j)\alpha_g$ з урахуванням $\sigma_g \gg \omega \epsilon_g$; стала зникання ЕМ поля в ґрунті $\alpha_g = \sqrt{0,5\omega \mu_g \sigma_g}$.

Таким чином маємо $G_g \approx \mu_g \sigma_g / L_g$. Сумарна погонна поперечна провідність

$$G = \frac{G_i G_g}{G_i + G_g} \approx \frac{2\pi a \mu_g \sigma_g}{2\pi a L_g + \mu_g \sigma_g R_i}. \quad (14)$$

За вказаних умов коефіцієнт зникання струму вздовж ПТ визначається поперечною активною провідністю ізоляції і ґрунту та внутрішнім індуктивним опором ґрунту:

$$\alpha = \sqrt{\omega L_g G / 2}, \text{ м}^{-1}. \quad (15)$$

Підставляючи (14) у (15) і враховуючи вираз коефіцієнта зникання плоскої хвилі у ґрунті $\alpha_g = \sqrt{\pi f \mu_g \sigma_g}$, отримуємо

$$\alpha = \sqrt{0,5\omega \mu_g \sigma_g \frac{1}{1+M}} = \alpha_g / \sqrt{1+M}, \text{ де } M = \frac{\mu_g \sigma_g R_i}{2\pi a L_g}. \quad (16)$$

З наведених співвідношень видно, що коефіцієнт зникання струму в ПТ менший від коефіцієнта зникання плоскої хвилі в ґрунті $\alpha < \alpha_g$. З фізичної точки зору це пов'язано з тим, що високопровідний сталевий ізольований ПТ є направляючою (каналізуючою) структурою, в якій процес поширення електромагнетного поля (подібно до коаксимального кабелю) має характер квазі-ТЕМ-хвилі, зникання якої менше за зникання плоскої хвилі в оточуючому середовищі з низькою провідністю [2, 10].

Різниця між α і α_g залежить від величини M і за певних умов (зокрема, при зменшенні R_i), коли $M \ll 1$ коефіцієнт зникання α буде близьким до α_g [10]. Очевидно, якщо питомий опір матеріалу ізоляційного шару зменшується (до значень питомого опору ґрунту), то наведені співвідношення для поперечної провідності лінії втрачають силу (стають неправомірними). ПТ втрачає властивості трубопровідної лінії і тоді майже поперечна квазі-ТЕМ-хвиля (яка властива двозв'язній структурі типу коаксимальної лінії) вироджується у Е-поляризовану хвилю, що швидко зникає вздовж структури. Отже α_g можна вважати критичним значенням для α , яке характеризує стан ізоляції ПТ.

Критичне зникання. Для зникання плоскої ЕМ хвилі у ґрунті, враховуючи розмірності у системі СІ значення магнетної проникності (для більшості ґрунтів за відсутності інших даних приймають $\mu_g = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), маємо [2, 3]

$$\alpha_g = 19,86 \cdot 10^{-4} \sqrt{f / \rho_g}, \text{ 1/м} \approx 0,2 \cdot 10^{-2} \sqrt{f / \rho_g}, \text{ 1/м}. \quad (17)$$

де f — частота струму, Гц; ρ_g — питомий електроопір ґрунту, Ом · м; або у відсотках маємо зручну формулу $\alpha_g \approx 0,2 \sqrt{f / \rho_g}$, %/м.

Критичні витрати струму. Електричний струм J , що тече вздовж металеві труби, збуджує в навколишньому середовищі магнетне поле, яке згідно з виразами (2)—(5) описується [4] формулою:

$$H_{\phi c} = \frac{J}{2\pi r} e^{i\omega t - \gamma z}. \quad (18)$$

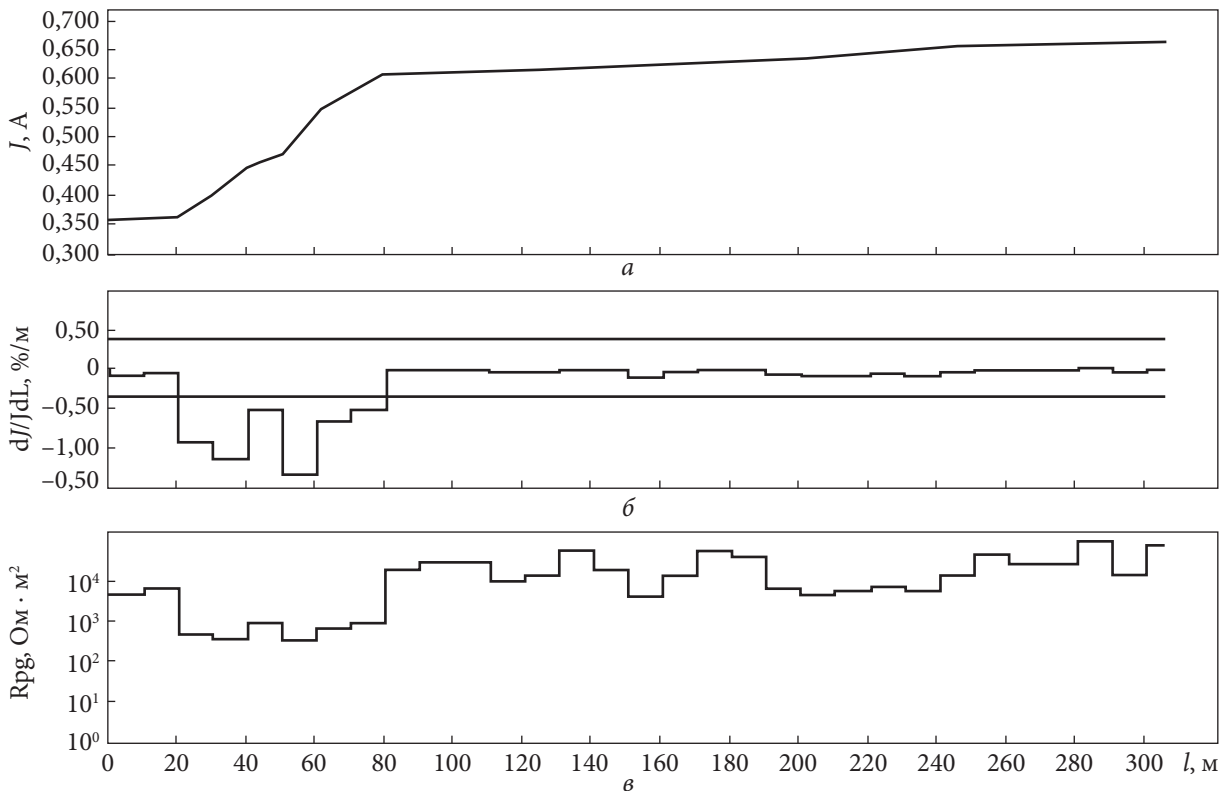


Рис. 2. Розподіл вздовж ділянки магістрального трубопроводу результатів безконтактних вимірювань сили струму J (а) та визначених за ними відносних витрат струму dJ/dl (б), показано рівень критичної витрати струму, перевищення якого вказують місця незадовільної ізоляції ПТ. На нижньому графіку (в) — результати визначення розподілу перехідного опору “труба—земля” $R_{pg}(l)$, Ом·м², що кількісно характеризує стан ізоляції ПТ

Низькочастотне магнетне поле струму ПТ практично не залежить від природної електропровідності ґрунту і не деформується границею розділу “земля—повітря” [2, 4]. Це дозволяє за розподілом магнетного поля безконтактним методом виміряти силу струму J_n , що протікає вздовж ПТ у точках $z=l_n$ [2, 4].

Визначаємо витрати струму на інтервалах Δl_n довжини ПТ: $\Delta J_n = J_n - J_{n-1}$ та відносну лінійну густину натікання струму (відносні витрати струму на одиницю довжини трубопроводу) [2, 3]

$$\delta J_n = \Delta J_n / J_n \Delta l_n, \text{ м}^{-1} \tag{19}$$

Коефіцієнт заникання струму (для кожного інтервалу n) ПТ [2, 3]:

$$\alpha_n = l_n^{-1} \cdot \ln(J_n / J_{n-1}), \text{ Неп/м.} \tag{20}$$

Обмежуючись першим членом розкладу $\ln x = \frac{x-1}{x} + \frac{(x-1)^2}{2x^2} + \dots$, маємо $\alpha_n \approx \delta J_n$. Отже,

Критичні відносні витрати (заникання) $\delta J_{кр}$ зондувального струму в трубопроводі залежно від частоти f і питомого опору ґрунту ρ_g

Частота струму, Гц	Критичне заникання струму $\delta J_{кр}$ (%/м) при ρ_g (Ом·м ²)			
	10	30	60	100
10	0,20	0,115	0,082	0,063
100	0,63	0,36	0,26	0,20

критичне зникання (відносна витрата) струму ПТ дорівнює зниканню плоскої ЕМ хвилі у ґрунті:

$$\delta J_{ed} \approx 0,2\sqrt{f / \rho_g}, \%/\text{м}. \quad (21)$$

Перевищення відносними витратами δJ_n (зниканням) зондувального струму цього значення $\delta J_n > \delta J_{кр}$ вважаємо критерієм незадовільної якості ізоляційного покриття ПТ. Типові значення $\delta J_{ed} = \alpha_g$ для ПТ наведені у таблиці.

На рис. 2, а показано приклад розподілу вздовж ПТ струму J_n , отриманий за безконтактними вимірами апаратурою типу БІТ-КВП [2, 3], налаштованою на частоту 100 Гц випрямленого пульсуючого струму УКЗ. За цими вимірами визначено відносні витрати струму dJ/JdL , наведені на рис. 2, б. Там же показано рівень критичної витрати струму, перевищення якого вказують місця незадовільної ізоляції ПТ ($l = 20 \dots 60$ м). У даному випадку опір ґрунту $\rho_g = 30$ Ом·м і за формулою (21) та згідно з даними таблиці критичне зникання струму з частотою 100 Гц становить $\delta J_{кр} \approx 0,36$ %/м. На рис. 2, в наведено результати визначення розподілу перехідного опору “труба—земля” [2, 3, 11], який кількісно характеризує стан ізоляції ПТ і показує, що на виявленій ділянці ($l = 20 \dots 60$ м) перехідний опір менший за 1 кОм·м², що згідно з нормативними вимогами [1] вказує на поганий стан ізоляції. Додаткові контактні електрометричні обстеження та розкопування трубопроводу підтверджують наявність пошкоджень ізоляції.

Таким чином, зіставлення значень коефіцієнта зникання струму α_n з коефіцієнтом зникання плоскої хвилі у ґрунті α_g дає можливість виконати експрес-оцінку якості ізоляції на різних ділянках підземних трубопроводів.

Розвиток електромагнетного методу і створення у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України апаратури безконтактних вимірювань струмів та їх застосування у діагностичних обстеженнях протикорозійного захисту ПТ [1—4] розкрили нові можливості для оперативного неруйнівного контролю технічного стану трубопроводів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Никифорчин Г.М., Поляков С.Г., Черватюк В.А., Ориняк І.В., Слободян З.В., Джала Р.М. Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посіб. Т. 11. Панасюк В.В. (Ред.). Львів: Сполом, 2009. 504 с.
2. Джала Р.М., Дикмарова Л.П., Джала В.Р., Вербенець Б.Я. Електромагнетний контроль ізоляції підземних трубопроводів. Київ: Наук. думка, 2021. 260 с.
3. Джала Р.М., Джала В.Р., Івасів І.Б., Рибачук В.Г., Учанін В.М. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій. Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій. Довідн. посіб. у 8-ми томах. Назарчук З.Т. (Ред.). Т. 4. Львів: Простір-М, 2018. 356 с.
4. Джала Р.М. Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посіб. Панасюк В.В. (Ред.). Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика. Назарчук З.Т. (Ред.). Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. 2001. С. 263—330.
5. Стрэттон Дж.А. Теорія електромагнетизма. Москва—Ленинград: Гостехиздат, 1948. 539 с.
6. Simonyi K. Theoretische elektrotechnik. Berlin: Ver Deutscher verlag der Wissenschaften, 1956.
7. Добушовский С.П. Постоянная распространения электромагнитных волн в коаксиальных цилиндрических структурах. *Отбор и передача информации*. 1977. Вып.51. С. 42—47.
8. Дикмарова Л.П., Джала Р.М. Математичні моделі підземних трубопроводів у задачах корозійного контролю. *Проблеми управління та інформатики*. 2000. № 1. С. 54—63.

9. Сергованцев В.Т., Артемов В.А., Конев К.А., Степанов В.Е., Сулимин В.Д., Щелкунов Ю.Н., Ямашкин Н.П. Газопровод как канал связи в системах телемеханики. Москва: Недра, 1984. 244 с.
10. Джала Р.М., Дікмарова Л.П. Аналіз інформативності коефіцієнта зникання струму у електромагнітному методі контролю ізоляції трубопроводів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 1999. № 3. С. 45—50.
11. Dzhala, R., Dzhala, V., Savula, R., Senyuk, O., Verbenets, B. Determination of components of transient resistance of underground pipeline. *Procedia Structural Integrity*. 2019. **16**. P. 218—222. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.044>

Надійшло до редакції 12.04.2023

REFERENCES

1. Nikyforchyn, H. M., Polyakov, S. G., Chervatiuk, V. A., Orynyak, I. V., Slobodian, Z. V. & Dzhala, R. M. (2009). Strength and durability of oil and gas pipelines and storage tanks. Fracture mechanics and strength of materials: Reference manual. Ed. V.V. Panasyuk. Vol. 11. Lviv: Spolom, p. 504 (in Ukrainian).
2. Dzhala, R., Dikmarova, L., Dzhala, V. & Verbenets, B. (2021). Electromagnetic control of underground pipelines insulation. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
3. Technical diagnostics of materials and structures: Reference manual. (2018). Ed. Z.T. Nazarchuk. Vol. 4. Dzhala, R. M., Dzhala, V. R., Ivasiv, I. B., Rybachuk, V. G., Uchanin, V. M. Electrophysical methods for nondestructive testing of defects in structural elements. Lviv: Prostir-M (in Ukrainian.).
4. Dzhala, R. M. (2001). Electromagnetic survey and control of corrosion of pipelines. Mechanics of fracture and strength of materials: References. Manual. Ed. V.V. Panasyuk. T.5: Non-destructive testing and technical diagnostics. Ed. Z. T. Nazarchuk. Lviv: G.V. Karpenko Institute of Phys. and Math. of the NAS of Ukraine. Part. 5, pp. 263-330 (in Ukrainian).
5. Stretton, J. A. (1948). Theory of electromagnetism. M.L. Gostekhizdat. P. 539 (in Russian).
6. Simonyi, K. (1956). Theoretische elektrotechnik. Berlin: Ver Deutscher verlag der Wissenschaften.
7. Dobushovsky, S. P. (1977). Constant propagation of electromagnetic waves in coaxial cylindrical structures. Selection and transmission of information. 51, pp. 42-47 (in Ukrainian).
8. Dykmarova, L. P. & Dzhala, R. M. (2000). Mathematical models of underground pipelines in the problems of corrosion control. Problems of management and informatics. 1, pp. 54-63 (in Ukrainian).
9. Sergovantsev, V. T., Artemov, V. A., Konev, K. A., Stepanov, V. E., Sulimin, V. D., Shchelkunov, Y. N. & Yamashkin, N. P. (1984). Gas pipeline as a communication channel in telemechanics systems. Moscow: Nedra (in Russian).
10. Dzhala, R. M. & Dikmarova, L. P. (1999). Analysis of the informativeness of the current decay coefficient in the electromagnetic method of pipeline insulation control. Technical diagnostics and non-destructive testing. 3, pp. 45-50 (in Ukrainian).
11. Dzhala, R., Dzhala, V., Savula, R., Senyuk, O. & Verbenets, B. (2019). Determination of components of transient resistance of underground pipeline. *Procedia Structural Integrity*. 16, pp. 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.044>

Received 12.04.2023

R. M. Dzhala, <https://orcid.org/0000-0002-0197-0389>

B. Ya. Verbenets'

V. R. Dzhala

M. I. Melnyk, <https://orcid.org/0009-0000-1641-4900>

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

E-mail: dzhala.rm@gmail.com, maryan.mi@gmail.com

ELECTRODYNAMIC CRITERION FOR EVALUATING THE QUALITY OF UNDERGROUND PIPELINE INSULATION

A three-unit mathematical model is presented to describe the electromagnetic field of an underground pipeline. This model is based on the solutions of boundary value problems in electrodynamics for cylindrical structures, the theory of electric circuits with distributed parameters, and the theory of the distribution of electric currents and magnetic fields. Using this model, the dependence of field characteristics on the parameters of the pipe and the surrounding environment was investigated. Diagnostic methods and tools for examining the anti-corrosion protection of main pipelines and pipeline networks were developed. By comparing the field attenuation coefficient along the pipeline with the electromagnetic wave attenuation in the soil, an electrodynamic criterion for evaluating the quality of the protective coating in different areas can be proposed. Examples illustrating the prompt detection of areas with unsatisfactory insulation of underground main pipelines through non-contact current measurements are provided.

Keywords: *electromagnetic field, underground pipeline, dispersion equation, insulating coating, substitute circuits, current attenuation, noncontact measurements, quality criterion, detection method.*