

НОВІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ КОРОЗІЇ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА ВИМІРАМИ СТРУМІВ ТА ПОТЕНЦІАЛІВ

Р. М. ДЖАЛА¹, Б. Я. ВЕРБЕНЕЦЬ¹, М. І. МЕЛЬНИК¹, А. Б. МИЦИК²,
Р. С. САВУЛА², О. М. СЕМЕНЮК¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² УМГ "Львівтрансгаз" ПАТ "Укртрансгаз" НАК "Нафтогаз України"

Показано, що метод безконтактних вимірювань струму (БВС) дає змогу оперативного контролювати стан захисту від корозії на різних ділянках підземних трубопроводів (ПТ), оцінювати стан і виявляти пошкодження ізоляції ПТ. Метод одночасного вимірювання постійної і змінної електричної напруги дає можливість визначати поляризаційний потенціал (з вилученням омичного складника), який вважається головним критерієм для контролю електрохімічного захисту металу від корозії в електропровідному середовищі. Реалізація цього методу в апаратурі ВПП забезпечує можливість знаходити пошкодження ізоляції як на змінному струмі (метод Пірсона), так і за різницею потенціалів на поверхні ґрунту (градієнтний метод). Використання в створеній апаратурі БВС-К модуля GPS забезпечує автоматичне визначення географічних координат і часу вимірювання струму та глибини ПТ, що значно полегшує обробку і документування результатів обстежень, зокрема, під час визначення густини струму, його витрат і перехідного опору "труба-земля" на різних ділянках ПТ. БВС разом з ВПП дозволяють визначати розподіли густини струму катодного захисту, питомих опорів ґрунту навколо труби та захисної ізоляції на різних ділянках ПТ.

Ключові слова: підземний трубопровід, безконтактні вимірювання, електричний струм, ізоляція, опір, електрохімічний захист, поляризаційний потенціал, апаратура, контроль.

Корозія підземних трубопроводів (ПТ) часто призводить до їх пошкоджень з втратами транспортованих продуктів і важкими екологічними наслідками та є основним чинником, від якого залежить тривалість придатності до безаварійної експлуатації трубопровідних систем [1]. Сталеві ПТ захищають від корозії ізоляційними покриттями і катодною поляризацією. Оскільки ізоляційні покриття старіють і руйнуються зазвичай значно скоріше від металу і з часом змінюється електродинамічна ситуація на трасах, то стан як пасивного (ізоляції), так і активного (електрохімічного – поляризації) протикорозійного захисту (ПКЗ) треба контролювати періодично і по всій довжині ПТ [1, 2].

Діагностичні обстеження ПТ традиційно виконують контактними електрометричними методами (КЕМ) [2, 3], основними недоліками яких є складність забезпечення достатньої кількості надійних контактів вимірювача (вольтметра) з металом ПТ і ґрунтом та локальний характер контролю. Ці недоліки усувають, застосовуючи безконтактні методи [1, 4, 5], серед яких достатньо широко використовують лише методи і засоби визначення розміщення ПТ (трасошукачі) та вимірювачі глибини залягання ПТ. Проте безконтактні вимірювання струму (БВС), які значно переважають КЕМ за оперативністю та продуктивністю обстежень ПТ і дають нову інформацію про стан ПКЗ, використовують недостатньо. Для цього необхідні спеціальні апаратура та методи опрацювання вимірів.

На основі виконаних у ФМІ НАН України теоретичних та експериментальних досліджень розвинуто метод і створено нові зразки апаратури БВС, розроблено систему комплексних діагностичних обстежень і контролю ПКЗ ПТ. Нижче описуємо методи обстежень і визначення параметрів ПКЗ ПТ за безконтактними вимірами струмів, а також за новими контактними вимірами постійних і змінних електричних напруг з встановленням поляризаційного потенціалу, та можливості їх використання у комплексі для контролю корозії ПТ.

Оперативні обстеження ПТ методом БВС. Основні особливості обстежень і контролю параметрів ПКЗ ПТ методом БВС описані у працях [1, 4–6] та цитованих у них публікаціях. Практично важливо вимірювати змінну складову випрямленого пульсуючого струму установки катодного захисту (УКЗ) [1, 5] (за відсутності такого міряють струм, збуджений у ПТ спеціальним генератором). Використовуючи апаратуру типу БІТ чи БВС, міряють струм у різних місцях ПТ, визначають його розподіл, за яким роблять висновки [4, 5] про стан захисту та найімовірніші місця корозії.

Під час вимірювань струмів ПТ важливо перевіряти наявність завад та враховувати їх під час опрацювання вимірів [6]. Необхідно також перевіряти та забезпечувати стабільність джерела струму, або враховувати його нестабільність.

Інтегральні обстеження здійснюють біля УКЗ, вимірюючи струм у всіх плечах і нитках трубопроводів, підключених до неї. Визначають розподіл витрат струму УКЗ між гілками трубопроводів, за яким отримують інтегральні відносні оцінки перехідного опору захисних покривів [1], що дає змогу оперативно виявляти гілки трубопроводів з аномально великими витратами струму УКЗ та з неякісною ізоляцією. Саме вони потребують першочергових обстежень для визначення подальшого ремонту чи коригування засобів ПКЗ для їх оптимізації.

Диференційні обстеження виконують шляхом вимірювань струму у різних точках вздовж ПТ. За різницями значень струмів J_n ($n = 0, 1, 2, \dots$), які протікають трубопроводом у точках l_n його довжини, визначають абсолютні витрати струму на інтервалах $\Delta l_n = l_n - l_{n-1}$ довжини ПТ між вимірами

$$\Delta J_n = J_n - J_{n-1}, \text{ A}; \quad (1)$$

питомі витрати струму на одиницю довжини трубопроводу – лінійну густину натікання (витікання) струму

$$\Delta J_n / \Delta l_n, \text{ A/m}; \quad (2)$$

відносні витрати струму на одиницю довжини трубопроводу – відносну лінійну густину натікання (витікання) струму

$$\delta J_n = \frac{\Delta J_n}{J_{nc} \cdot \Delta l_n} \cdot 100, \%/\text{m}, \quad (3)$$

де $J_{nc} = (J_n + J_{n-1})/2$ – середнє значення струму в трубопроводі на n -ому інтервалі.

Довжину інтервалів Δl_n на трасах міряють рулеткою, кроками чи іншими пристроями. На відміну від них, інстальований в апаратурі типу БВС-К модуль глобальної системи позиціонування GPS дає координати (φ_n, λ_n) у градусах, висоту над рівнем моря, дату і час вимірювання, які разом з вимірами струму і глибини залягання ПТ записуються у пам'ять апаратури БВС-К.

Для розрахунку відстані між точками вимірювань на поверхні Землі з координатами (φ_1, λ_1) і (φ_2, λ_2) використовуємо формулу гаверсинусів [7]

$$\Delta l = R \cdot 2 \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right), \quad (4)$$

де $\Delta \varphi$ та $\Delta \lambda$ – різниця координат по широті та довготі в радіанах, відповідно;

середній радіус Землі $R = 6371032$ м.

Відносна питома витрата струму δJ по суті відповідає зниканню струму вздовж ПТ. Його доцільно зіставляти із зниканням електромагнетної хвилі в ґрунті, яке описують відомою формулою $\alpha_g = \sqrt{\pi f \mu \sigma_g}$, де f – частота (Hz); μ і σ_g – магнетна проникність (Hn/m) і електропровідність ґрунту ($\Omega \cdot \text{m}$)⁻¹. Вважаючи, що більшість ґрунтів немагнетні ($\mu = \mu_0$), для критичного зникання (відносної витрати) струму маємо [1] формулу

$$\delta J_{cr} = \alpha_{cr} = 0,2 \sqrt{f \sigma_g}, \%/\text{m}. \quad (5)$$

Якщо відносні витрати струму на ділянці ПТ перевищують критичне значення $\delta J_n > \delta J_{cr}$, то на цій ділянці ізоляція незадовільна. Отримуємо якісну оцінку ізоляції на різних ділянках ПТ.

БВС дають можливість отримати кількісне значення перехідного опору “труба–земля” R_{mg} , яке використовують під час розрахунків електрохімічного захисту ПТ від корозії та для планування ремонтів захисних покривів. За зниканням струму на n -ій ділянці трубопроводу R_{mg} (на одиницю поверхні труби з діаметром D) обчислюють за відомою [1] формулою

$$R_{mg}(n) = R_b \pi D / \delta J_n, \Omega \cdot \text{m}^2, \quad (6)$$

де R_b – вхідний опір трубопровідної лінії (за відсутності інших даних для магістрального ПТ можна прийняти $R_b = 1 \Omega$).

Нові методи електрометричних обстежень. Під час електрометричних обстежень для контролю катодної поляризації ПТ вимірюють різницю потенціалів U_{mg} між металом споруди і встановленим на поверхні ґрунту електродом порівняння [2]. Отримують потенціал поляризації з омичною складовою. Для вимірювань поляризаційного потенціалу U_p застосовують релаксаційний метод, за яким треба одночасно вимикати всі УКЗ, які поляризують дану ділянку трубопроводу.

Для визначення місць пошкоджень захисного покриву ПТ розміщують на поверхні ґрунту над трубопроводом два електроди і міряють змінну напругу V_{gg} (метод Пірсона) або постійну напругу U_{gg} (метод поперечного градієнта потенціалу) [2]. Об’єднання цих вимірювань дає змогу визначити поляризаційний потенціал за формулою [8, 9]

$$U_p = U_{mg} - V_{mg} \cdot U_{gg} / V_{gg}. \quad (7)$$

Для реалізації такого методу створено апаратуру для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу (ВПП) [10, 11] з електронною пам’яттю. ВПП можна використовувати для контролю за вказаними характеристиками ПКЗ ПТ та інших металоконструкцій. У варіанті ВПП-М встановлено модуль GPS, що дає змогу додатково автоматично фіксувати місце і час контролю. Це значно полегшує опрацювання і документування масивів даних, зокрема, суміщення вимірів потенціалів з вимірами струму під час їх опрацювання і визначення параметрів ПКЗ ПТ.

У формулі (7) другий член є омичною складовою потенціалу [8–12], яка також характеризує стан захисного покриву. Співвідношення змінної напруги до постійної $V_{gg}/U_{gg} = k$ – це вимірний коефіцієнт гармоніки, який показує відношення витрати вимірюваної змінної складової струму до постійної. Його використовуємо для оцінки витрат постійної складової струму УКЗ на ділянках ПТ [4–6] та для визначення розподілу густини струму катодного захисту [13].

Новий метод комплексного обстеження ПКЗ ПТ. Для ілюстрації комплексного методу розглянемо результати контролю корозійного стану ПТ за вимірами розробленої апаратури БВС-К і ВПП-М, отриманими під час натурних випробу-

вань і експериментальних обстежень ділянок магістральних газопроводів УМГ “Львівтрансгаз”.

Частину результатів безконтактних вимірювань апаратурою БВС-К глибини h залягання ПТ і змінної з частотою 100 Hz складової J випрямленого пульсуючого струму УКЗ та контактних вимірів апаратурою ВПП-М постійних і змінних з частотою 100 Hz напруг і поляризаційного потенціалу наведено у табл. 1. Точки вимірювань l_n визначено за записаними у пам’яті апаратури координатами GPS за формулою (4). Тут точки вимірювань струму і потенціалів збігаються, проте вони можуть відрізнятися.

Таблиця 1. Виміряні параметри протикорозійного захисту ПТ (фрагмент)

n	$l_n, \text{ m}$	БВС-К		ВПП-М				
		$h_n, \text{ m}$	$J_n, \text{ A}$	$U_{mg}, \text{ V}$	$V_{mg}, \text{ V}$	$U_{gg}, \text{ V}$	$V_{gg}, \text{ V}$	$U_p, \text{ V}$
8	103,7	1,6	0,301	-1,05	0,314	-0,016	0,101	-1,000
9	119,2	1,7	0,293	-1,04	0,306	-0,018	0,109	-0,989
10	133,5	1,7	0,286	-1,03	0,294	-0,015	0,094	-0,983
11	146,2	1,8	0,278	-1,02	0,288	-0,013	0,081	-0,974
12	158,5	1,4	0,273	-1,01	0,281	-0,014	0,086	-0,964

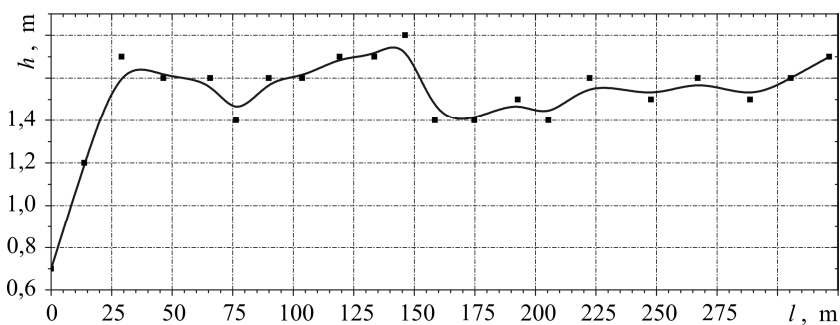


Рис. 1. Розподіл глибини залягання ПТ уздовж траси.

Fig. 1. Distribution of the underground pipeline (UGP) along the rout.

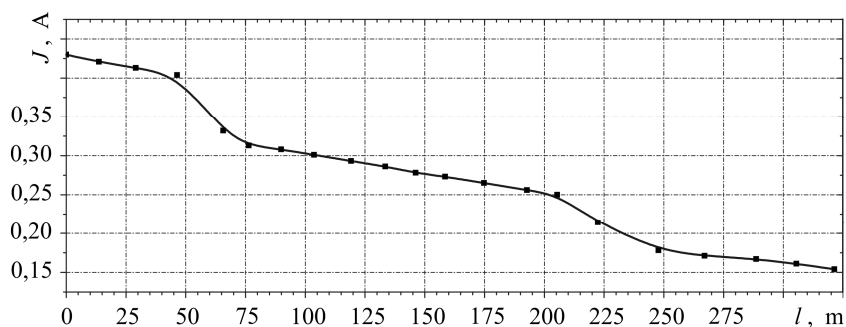


Рис. 2. Розподіл сили струму $J(l)$ УКЗ ПТ.

Fig. 2. Distribution of current $J(l)$ of the UGP cathodic protection equipment.

За результатами БВС-К розподіли вздовж траси глибини $h(l)$ залягання ПТ і струму $J(l)$ зображені графічно на рис. 1 і 2. Відомо, що струм у ПТ з віддаленням від УКЗ чи іншого джерела зменшується; і навпаки – з наближенням збільшується. Якщо БВС дає немонотонну зміну струму, то відхилення від монотонності розцінюємо як похибки (або промахи) вимірювань і для коректного подальшого опрацювання їх необхідно вилучати чи згладжувати [6]. Розподіл від-

носних витрат струму $\delta J(l)$ вздовж ПТ, визначений за вимірами J_n за формулою (3), показано графічно на рис. 3. За цим графіком виявляють місця ПТ з гіршою і кращою ізоляцією.

Для оцінки якості ізоляції ПТ зіставляємо отримані відносні витрати струму $\delta J(l)$ з критичним зниканням (5), яке залежить від питомого опору ґрунту ρ_g . Його можна вимірювати з допомогою відомої чотириелектродної установки або визначати за вказаними вище вимірами струму ПТ і напруги на поверхні землі [14] за формулою

$$\rho_g = \frac{2\pi l_n V_{gg}}{\Delta J_n \ln(1 + x^2/h^2)}, \Omega \cdot \text{m}, \quad (8)$$

де x – відстань між електродами. В реальних умовах на трасах ПТ ρ_g змінюється в діапазоні від 10 до 100 $\Omega \cdot \text{m}$. Для частоти струму $f = 100$ Hz, за формулою (5), маємо діапазон змін критичного зникання від 0,63 до 0,2 %/m. Приймаючи середнє значення для цієї ділянки $\rho_g = 30$ $\Omega \cdot \text{m}$, отримуємо $\delta J_{cr} = 0,36$ %/m (рис. 3, штрихова лінія) як рівень критичного зникання струму для даної ділянки ПТ.

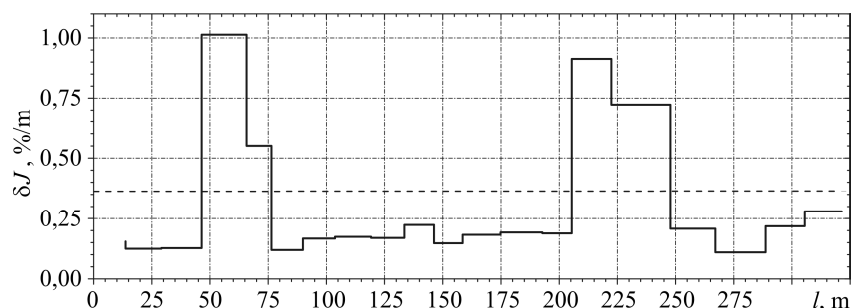


Рис. 3. Розподіл відносних витрат струму $\delta J(l)$ уздовж ПТ.

Fig. 3. Distribution of the relative loss of current $\delta J(l)$ along the UGP.

У двох місцях на інтервалах $n = 5$ і 6 та $n = 15$ і 16 ($l = 46 \dots 76$ m та $l = 206 \dots 248$ m) зникання струму δJ перевищує критичне значення δJ_{cr} , що вказує на незадовільну там ізоляцію ПТ. Числові результати вимірювань і визначення параметрів корозійного стану у цих і суміжних місцях ПТ наведені у табл. 2. Саме там слід першочергово здійснювати локальні детальні обстеження ПТ.

Таблиця 2. Результати вимірів і визначення параметрів корозії у місцях незадовільної ізоляції ПТ

n	l , m	$\Delta J/\Delta S$, mA/m ²	U_{mg}	U_p	R_{mg}	R_i	Ізоляція захисна	Катодна поляризація
			V		$\Omega \cdot \text{m}^2$			
4	46,4	0,24	-1,08	-1,021	1997	1321	+	+
5	65,7	1,70	-1,01	-0,955	224	101	-	+
6	76,4	0,81	-1,07	-1,017	747	228	-	+
7	89,9	0,17	-1,06	-1,008	2732	1387	+	+
14	205,4	0,22	-0,97	-0,930	1855	1217	+	+
15	222,4	0,96	-0,92	-0,881	283	113	-	+
16	247,8	0,64	-0,84	-0,801	239	43	-	-
17	267,1	0,16	-0,90	-0,864	1097	417	-	+
18	288,7	0,08	-0,92	-0,886	1858	1074	+	+

Кількісні оцінки за формулою (6) розподілу перехідного опору “труба–земля” R_{mg} за БВС ПТ з діаметром $D = 0,7$ m подані на рис. 4 суцільною лінією. У вказаних двох місцях маємо $R_{mg} < 10^3 \Omega \cdot \text{m}^2$, що, згідно з нормативними вимогами [2], підтверджує попередні якісні оцінки (рис. 3) щодо незадовільної ізоляції.

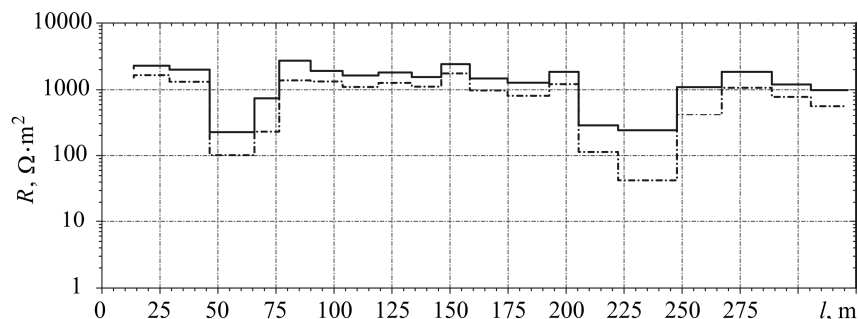


Рис. 4. Розподіл перехідного опору “труба–земля” $R_{mg}(l)$ та опору ізоляції $R_i(l)$ уздовж ПТ.

Fig. 4. Distribution of the transition resistance “pipe–ground” $R_{mg}(l)$ and insulation resistance $R_i(l)$ along the UGP.

Результати вимірювань апаратурою ВПП постійної і змінної напруг “труба–земля” U_{mg} і V_{mg} та “земля–земля” U_{gg} і V_{gg} та поляризаційного потенціалу U_p зображені графічно на рис. 5, 6. Як видно з рис. 5, значення U_{mg} і V_{mg} у вказаних вище двох місцях ПТ помітно збільшуються. Це за методами поперечного градієнта і Пірсона вказує на місця пошкодження захисного покриття ПТ і підтверджує висновки, отримані за БВС.

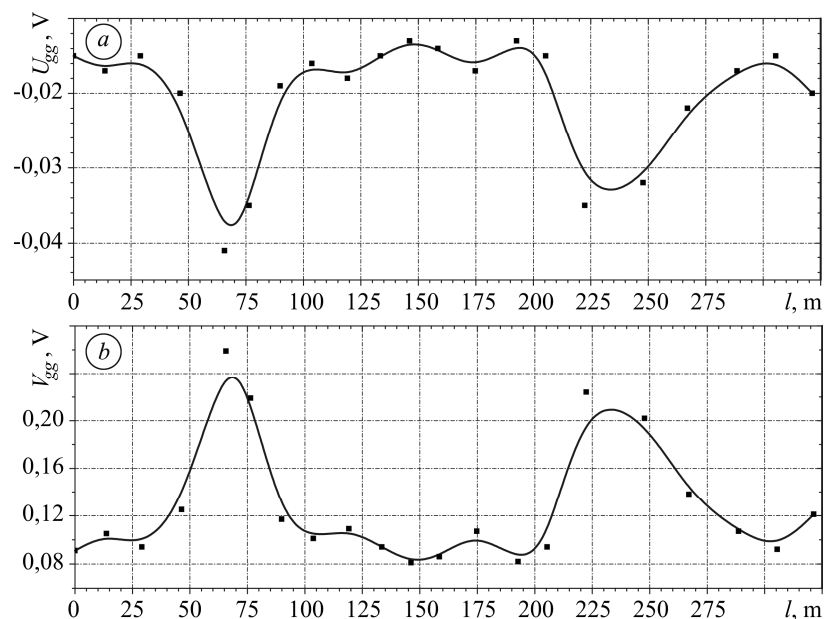


Рис. 5. Розподіл постійної $U_{gg}(l)$ (a) та змінної $V_{gg}(l)$ (b) напруги “земля–земля” уздовж ПТ.

Fig. 5. Distribution of DC voltage “ground–ground” $U_{gg}(l)$ along the UGP.

Виміряні значення потенціалу “труба–земля” $U_{mg}(l)$ (з омичною складовою) та поляризаційного потенціалу $U_p(l)$ вздовж ПТ з віддаленням від УКЗ загалом зменшуються (рис. 6), а у вказаних вище двох місцях є локальні зменшення. При цьому у першому місці пошкодження ізоляції (46...76 m) поляризаційний потенціал (основний критерій електрохімічного захисту від корозії) $U_p < -0,85$ V від-

повідляє встановленим вимогам [2]. Водночас у другому місці пошкодження ізоляції ПТ поляризаційний потенціал не задовольняє вимог електрохімічного захисту: $U_p = -0,801$ V на інтервалі $n = 16$ ($222,4 < l_{16} < 247,8$), а отже захист від корозії не забезпечено (табл. 2). В цьому місці найімовірніші корозійні пошкодження ПТ, тому потрібно ремонтувати ізоляційний покрив ПТ або коригувати катодну поляризацію.

Межі ділянки ПТ з незадовільним захистом від корозії (стан ізоляції і поляризації) можна уточнити описаними методами, додатково вимірюючи з інтервалом 1...2 м.

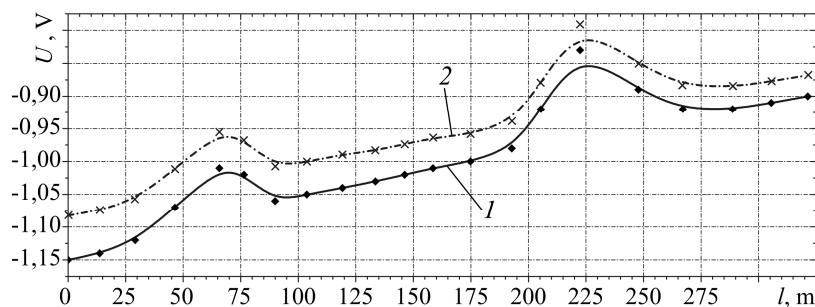


Рис. 6. Розподіл постійної напруги “труба–земля” $U_{mg}(l)$ (крива 1) та поляризаційного потенціалу $U_p(l)$ (крива 2) вздовж ПТ.

Fig. 6. Distribution of DC voltage “pipe–ground” $U_{mg}(l)$ (curve 1) and polarization potential $U_p(l)$ (curve 2) along the UGP.

Питомий опір ізоляції R_i , як нормативну величину, яка характеризує стан пасивного захисту від корозії ПТ, для кожного інтервалу l_n між точками вимірювань струму ПТ обчислюємо за формулами [1, 2, 4]

$$R_{in} = U_{in} / i_n, \quad (9)$$

де густина постійної складової струму катодного захисту [13] на n -му інтервалі довжини ПТ

$$i_n = \frac{\Delta I_n}{S_n} = \frac{\Delta J_n}{\pi D(l_n - l_{n-1})k_n}, \quad (10)$$

а зниження потенціалу на ізоляційному покриві ПТ [4]

$$U_i = U_{mg} - U_{gg} - U_p. \quad (11)$$

За зниження потенціалу на n -му інтервалі приймаємо середнє значення вимірів апаратурою ВПП на ньому.

Результати визначення питомого опору ізоляції R_i за вимірами апаратів БВС-К і ВПП показані на рис. 4 штриховою лінією. Характер розподілу $R_i(l)$ подібний до $R_{mg}(l)$.

Відмітимо, що описаний тут метод визначення R_i значно простіший від відомого [2], де використовують “опір розтіканню струму в ґрунті”, який обчислюють шляхом розв’язання трансцендентного рівняння. Крім цього, недоліком відомого методу є те, що він дає лише деяке усереднене значення перехідного опору ПТ на всій зоні дії УКЗ, межі якої чітко не визначені. На відміну від нього, описаний метод дає змогу визначати розподіл перехідного опору захисних покривів на різних ділянках, що суттєво підвищує інформативність обстежень корозійного стану ПТ.

ВИСНОВКИ

Метод безконтактних вимірювань струму дає змогу оперативно обстежувати і контролювати стан протикорозійного захисту на різних гілках і ділянках ПТ,

виявляти аномалії витрат струму та місця незадовільної їх ізоляції, де першочергово слід здійснювати детальні обстеження для визначення обсягів ремонту для запобігання пошкодженню і продовження термінів експлуатації ПТ.

Новий метод одночасних вимірювань постійних і змінних електричних напруг дає змогу визначити поляризаційний потенціал (з вилученням омичного складника), який вважають основним критерієм для контролю електрохімічного захисту металу від корозії в електропровідному середовищі. Реалізація цього методу в апаратурі ВПП дає можливість додатково його використовувати для пошуку пошкодженню ізоляції ПТ як на змінному струмі (за відомим методом Пірсона), так і за різницею потенціалів (методом градієнта) на поверхні ґрунту.

Завдяки застосуванню у створеній апаратурі БВС-К модуля системи глобального позиціонування GPS забезпечують автоматичну фіксацію географічних координат і часу вимірювань струму і глибини залягання ПТ, що суттєво полегшує опрацювання і документування результатів обстежень. За координатами визначаємо віддалі між вимірами струму, що необхідно для обчислень густини витрат вимірюваного зондувального (змінного) струму, його зникання та перехідного опору “труба–земля” на різних ділянках ПТ.

БВС у комплексі з ВПП дають змогу визначити розподіли густини струму катодного захисту, питомих опорів ґрунту, що оточує трубопровід (показник агресивності середовища), та захисної ізоляції на різних ділянках ПТ.

РЕЗЮМЕ. Показано, что метод бесконтактных измерений токов (БИТ) позволяет оперативно контролировать состояние защиты от коррозии на различных участках подземных трубопроводов (ПТ), оценивать состояние и выявлять повреждения изоляции ПТ. Метод одновременного измерения постоянного и переменного электрического напряжения позволяет определить поляризационный потенциал (исключая омическую составляющую), который считается главным критерием контроля электрохимической защиты металла от коррозии в электропроводящей среде. Реализация этого метода в аппаратуре ВПП обеспечивает возможность находить повреждения изоляции, как на переменном токе (метод Пирсона), так и по разнице потенциалов на поверхности почвы (градиентный метод). Использование в созданной аппаратуре БВС-К модуля GPS обеспечивает автоматическое определение географических координат и времени измерения тока и глубины ПТ, что значительно облегчает обработку и документирование результатов обследований, в частности, при определении плотности тока, его расходов и переходного сопротивления “труба–земля” на различных участках ПТ. БИТ вместе с ВПП позволяют определять распределения плотностей тока катодной защиты, удельных сопротивлений почвы, окружающей трубу, и защитной изоляции на разных участках ПТ.

SUMMARY. The method of non-contact measuring of currents (CMC) allows a quick inspection and monitoring of the state of corrosion protection on different branches of underground pipelines (UGP), assessment of the state and detection of damages of the UGP insulation. The method of simultaneous measurement of DC and AC electrical voltages allows to obtain the value of polarization potential (with the removal of ohmic component), which is considered to be the main criterion of control of electrochemical protection of metal against corrosion in the electroconductive environment. The implementation of this method in the device for measuring polarization potential (MPP) provides an opportunity to use MPP in detection of the damaged UGP insulation both at alternating current (Pearson’s method) and by the potential difference (gradient method) on the surface of the soil. The use in the created device БВС-К of GPS modulus provides automatic fixing of geographical coordinates and time of current measuring and the UGP depth, which greatly facilitates the processing and documentation of the inspection results. The coordinates define the distance between current measurements. It is necessary for computing the current density, its losses, and transition resistance “pipe–ground” in different parts of the UGP. CMC together with MPP enable us to determine the density of cathodic protection current distributions, the resistivity of the soil surrounding the pipe, and the resistivity of the protective insulation on different sections of the UGP.

1. *Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк, І. В. Ориняк, З. В. Слободян, Р. М. Джала / Під. ред. Г. М. Никифорчина. – Львів: Сполом, 2009. – 504 с.*
2. *ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 72 с.*
3. *Аналіз нормативної документації з контролю протикорозійного захисту ПТ / Р. М. Джала, А. Ю. Біличенко, Б. Я. Вербенець, Р. С. Савула, О. М. Семенюк // 7-а Міжнар. наук.-техн. конф. і виставка “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання”. – Ів.-Франківськ: НТУНГ, 2014 р. – С. 326–328.*
4. *Визначення параметрів протикорозійного захисту підземних трубопроводів за безконтактними вимірами струму / Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, М. І. Мельник, Т. І. Шевчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – 45, № 3 – С. 106–111.
(Determination of parameters of corrosion protection of underground pipelines from non-contact measurements of current / R. M. Dzhalala, B. Ya. Verbenets', M. I. Mel'nyk, T. I. Shevchuk // Materials Science. – 2009. – 45, № 3 – P. 441–146.)*
5. *Технологія обстежень підземних трубопроводів з використанням безконтактних вимірювань струмів / Р. М. Джала, С. Ф. Савула, Б. Я. Вербенець, О. Й. Винник, В. Р. Джала, М. І. Мельник, Т. І. Шевчук // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 22. – С. 22–27.*
6. *Контроль протикорозійного захисту магістральних трубопроводів за безконтактними вимірами струму в умовах завод / Р. Джала, Б. Вербенець, М. Мельник, Р. Савула, О. Семенюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – Спец. вип. № 10, Т. 2. – С. 539–544.*
7. *Gade, Kenneth. A non-singular horizontal position representation // J. Navigation. – Cambridge: University Press, 2010. – Vol. 63 (3). – P. 395–417.*
8. *Патент 43130A UA. G01R19/00, C23F13/00. Спосіб визначення поляризаційного потенціалу підземної споруди / Р. М. Джала. – Опубл. 15.11.2001; Бюл. № 10.*
9. *Джала Р. М., Вербенець Б. Я., Мельник М. І. Вимірювання поляризаційного потенціалу з вилученням омичного складника // Вісник Східноукраїн. нац. ун-ту. – 2013. – № 14 (203). – С. 147–151.*
10. *Патент 102424 UA. МПК G01R19/25, G01N17/02, C23F13/04. Пристрій для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу / Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, М. І. Мельник. – Опубл. 26.10.2015; Бюл. № 20.*
11. *Джала Р. М., Вербенець Б. Я., Мельник М. І. Вимірювання електричних потенціалів для діагностування протикорозійного захисту металокопункцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, № 1 – С. 126–130.*
12. *Патент 2350971 RU. МПК G01R19/00. Устройство для измерения составляющих потенциала (поляризационной и омической) подземного металлического сооружения в зонах действия установок катодной защиты с пульсирующим напряжением на выходе / А. Х. Валиев, А. К. Мочалов, К. К. Григорович, А. В. Предущенко, С. П. Степанов, А. Я. Капустин. – Опубл. 27.03.2009.*
13. *Патент 94798 UA. МПК G01R19/08, C23F13/02. Спосіб визначення густини струму захисту від корозії на ділянці підземного трубопроводу / Р. М. Джала. – Опубл. 10.06.2011; Бюл. № 11.*
14. *Патент 42313 A UA. МПК G10R27/18, C23F13/00. Спосіб визначення опору ґрунту на трасі підземного трубопроводу / Р. М. Джала. – Опубл. 15.10.2001; Бюл. № 9.*

Одержано 10.05.2016