

УДК 537.8: 620.1: 621.643.2

## ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

*Р. М. ДЖАЛА, Б. Я. ВЕРБЕНЕЦЬ, М. І. МЕЛЬНИК*

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

Проаналізовано відомі методи визначення поляризаційного потенціалу металевих споруд в електропровідному середовищі. Описано будову та принцип дії нової апаратури для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та визначення поляризаційного потенціалу з вилученням омичного складника. Оцінено її переваги під час контролю катодного захисту металевих конструкцій. Наведено приклад використання в діагностичних обстеженнях стану активного і пасивного захисту від корозії підземних магістральних трубопроводів та виявлено широкі можливості застосування апаратури в польових умовах.

**Ключові слова:** *метал, корозивне середовище, потенціал поляризації, діагностування, апаратура.*

Поляризаційний потенціал (ПП) вважають основним критерієм захисту від корозії металевих конструкцій в електропровідному середовищі [1–4]. Емпірично встановлено і підтверджено багатьма дослідженнями, що захисний ПП для сталевих підземних трубопроводів (ПТ) повинен знаходитись у межах від  $-0,85$  до  $-1,15$  V відносно мідносльфатного електрода порівняння (ЕП). Помірне його перевищення зазвичай не шкодить захисній конструкції. Основними недоліками тут є втрати електроенергії і допоміжних анодів. Проте за значного перевищення на захисній поверхні виділяється водень, який зумовлює відшарування органічних захисних покривів та водневе окрихчення чи розтріскування сталі. За катодної поляризації металокопункцій в електропровідному середовищі потенціал треба контролювати і підтримувати у певних діапазонах, які забезпечують необхідний захист металу від корозії.

Потенціал між ЕП і металом підзахисної конструкції, виміряний високоомним вольтметром, містить, крім поляризаційного складника, ще й омичний спад напруги  $IR$  внаслідок проходження катодного струму  $I$  через ефективний опір  $R$  між ЕП і металом конструкції [1, 4]. Але тільки поляризація поверхні обумовлює ефект катодного захисту, тому для точного регулювання ПП підзахисної конструкції відносно ЕП з вимірною різницею потенціалів треба вилучати омичний складник.

**Аналіз методів вимірювань поляризаційного потенціалу.** Для зменшення омичного падіння потенціалу просте наближення ЕП до поверхні металу часто неприйнятне технологічно та не усуває можливих похибок через високий опір покриву металу. Важливість проблеми спричинила низку досліджень і розробок методів та засобів визначення ПП [1]. Найвідоміші з них – компенсаційні, релаксаційні, допоміжних електродів, розрахункові.

За компенсаційним методом між спорудою і додатковим електродом подають струм, силу і полярність якого регулюють, прагнучи відсутності струму через вимірювальний ЕП. Недоліками цього методу є складність вимірювальних схем і

копітка процедура регулювання. Крім цього, компенсувальний струм може змінити потенціал контрольованої поверхні металу.

Використовуючи релаксаційні методи (вимкнення, перемикання), необхідно кожному катоду установку ЕХЗ (яка діє у зоні контролю) обладнати спеціальними комутаторами та їх синхронізувати [1–3], що ускладнює вимірювання. Проте не завжди є впевненість, що вимикачі встановлено на всіх установках, які діють у зоні обстежень. Крім того, цим методом властиві похибки, спричинені затримками моменту міряння, вирівнювальними струмами, гетерогенністю системи метал–ізоляція–грунт, блукальними струмами, яких неможливо позбутись [3].

Метод допоміжного електрода передбачає встановлення ЕП біля поверхні металу, що складно і забезпечує лише локальний контроль, а тому не завжди придатне для великогабаритних конструкцій та трубопроводів. З часом електроди змінюють свій потенціал, що зумовлює додаткові похибки.

У розрахунковому методі міряють напругу змінного струму між об'єктом і вимірювальним зондом. За ПП беруть різницю між вимірами постійної і ефективної змінної напруг з множенням останньої на коефіцієнт  $-1,8 V_{eff}$ , оцінений наближено [1, 4]. Проте в реальних умовах співвідношення між постійним і змінним складниками струму, що протікає між металом і середовищем, може значно відрізнятись через різні характеристики випрямлячів та реактивних опорів.

Ці недоліки відомих методів усували, використовуючи запропонований [5] метод визначення ПП з вилученням омичного складника за вимірами постійних і змінних електричних напруг. Щоб позбутись омичного складника з виміру різниці потенціалів  $U_{MG}$ , значення змінної напруги ставили у відповідність до постійної з допомогою коефіцієнта гармоніки, визначеного за вимірами постійної  $U_{GG}$  і змінної  $V_{GG}$  напруг на одному і тому ж опорі між ЕП і допоміжним електродом (ДЕ).

ПП визначаємо за формулою

$$U_p = U_{MG} - V_{MG} \cdot U_{GG} / V_{GG}, \quad (1)$$

де відношення  $k = V_{GG} / U_{GG}$  – вимірний коефіцієнт гармоніки.

**Апаратура для вимірювань поляризаційного потенціалу.** Для реалізації запропонованого методу розробили апаратуру ВПП, функціональну схему якої [6] ілюструє рис. 1. Її аналогова частина складається з чотирьох вимірювальних каналів. Для міряння постійних напруг застосовано підсилювач з високим входним опором і малим зміщенням вихідної напруги та детектор полярності. Для міряння змінних напруг уведено попередні підсилювачі з високим входним опором і масштабні підсилювачі, для виділення корисного сигналу від завад – смугові фільтри, для випрямлення змінного сигналу – випростовувач. З аналогових каналів сигнали поступають на входи аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Процес вимірювань здійснюється автоматично. Роботою апаратури керує мікропроцесор за спеціально розробленою програмою з обчисленням ПП за формулою (1). Забезпечено запис вимірів у пам'ять і перегляд отриманих результатів на цифровому дисплеї. Реалізовано передачу даних з приладу через інтерфейс у комп'ютер для подальшого опрацювання і документування.

**Застосування апаратури ВПП.** Апаратура придатна для контролю основних характеристик активного і пасивного захисту від корозії металевих конструкцій. З її допомогою можна визначати поляризаційний потенціал за вимірами постійних і змінних електричних напруг [5]; виявляти пошкодження захисного покриття за вимірами поперечного градієнта потенціалу [2, 6]; шукати місця наскрізних пошкоджень ізоляції за вимірами змінних напруг (методом Пірсона) [2, 6]. Її можна також використовувати під час визначення перехідного опору [7].

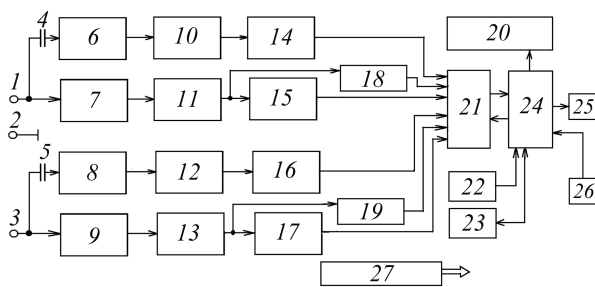


Рис. 1. Функціональна блок-схема апаратури для вимірювань постійних і змінних напруг та визначення поляризаційного потенціалу: 1–3 – вхідні клеми; 4, 5 – два роздільні конденсатори; 6, 8 – вхідні підсилювачі першого і другого каналів вимірювання змінних напруг; 7, 9 – високоомні дільники першого і другого

каналів вимірювання постійних напруг; 10, 12 – смугові фільтри першого і другого каналів вимірювання змінної напруги; 11, 13 – підсилювачі першого і другого каналів вимірювання постійних напруг; 14, 16 – випрямлячі першого і другого каналів вимірювання змінних напруг; 15, 17 – перший і другий детектори постійної напруги; 18, 19 – перший і другий детектори полярності; 20 – цифровий індикатор; 21 – аналого-цифровий перетворювач; 22 – модуль позиціонування; 23 – пам’ять; 24 – мікропроцесор; 25 – інтерфейс; 26 – клавіатура; 27 – блок живлення з акумулятором.

Fig. 1. Functional block diagram of devices for measuring direct and alternating voltages and determining the polarization potential: 1–3 – input terminals; 4, 5 – two flowchart blocking capacitors; 6, 8 – input amplifiers of the first and the second channels of alternating voltage measuring; 7, 9 – high-resistance voltage divider of the first and the second channels of direct voltage measuring; 10, 12 – narrow-band filters of the first and the second channels of alternating voltage measuring; 11, 13 – amplifiers of the first and the second channels of direct voltage measuring; 14, 16 – rectifiers of the first and the second channels of alternating voltage measuring; 15, 17 – the first and second detectors of direct voltage; 18, 19 – the first and second detectors of polarity; 20 – digital indicator; 21 – analog-digital converter; 22 – positioning unit; 23 – memory; 24 – microprocessor; 25 – interface; 26 – keyboard; 27 – power supply unit with accumulator.

Для визначення перехідного опору захисних покривів ПТ доцільно застосувати ВПП у комплексі з безконтактним вимірювачем струму (БВС) [7]. Перехідний опір “труба–земля”  $R_{MG}$  і питомий опір ізоляції  $R_i$  для кожного інтервалу  $l_n$  між точками вимірювань струмів обчислюємо так:

$$R_{MG} = \frac{R_b \pi D}{|\alpha_n|}, \text{ де } \alpha_n = \frac{\ln(I_n / I_{n-1})}{l_n - l_{n-1}}; R_{in} = \frac{U_{in}}{i_n}, \quad (2)$$

де густина струму катодного захисту на  $n$ -му інтервалі довжини ПТ, яку визначаємо за допомогою БВС [7, 8]

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

а падіння потенціалу на ізоляційному покриві ПТ – за вимірами ВПП:

$$U_i = U_{MG} - U_{GG} - U_p.$$

Описана методика визначення питомого опору ізоляції  $R_i$  значно простіша за відому [2], де використовують “опір розтіканню струму в ґрунті”, який обчислюють, розв’язуючи трансцендентне рівняння.

Загальний вигляд апаратури ВПП подано на рис. 2, а схему підключення її до об’єкта контролю та електродів ЕП і ДЕ – на рис. 3.

Натурні випробування апаратури ВПП виконували на трасах підземних магістральних трубопроводів, які особливо чутливі до експлуатаційної деградації [8–10]. Визначили розподіли вздовж ПТ поляризаційного потенціалу (рис. 4a), змінної напруги “земля–земля” (рис. 4b), а також перехідного опору “труба–земля”  $R_{MG}$  і перехідного питомого електричного опору ізоляційного покриву  $R_i$  (рис. 4c).



Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Загальний вигляд апаратури ВПП.

Fig. 2. General view of the VPP device.

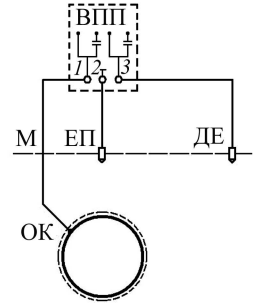


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. З'єднання входних клем ВПП під час вимірювань поляризаційного потенціалу: клемма 1 з'єднана з металом (М) об'єкта контролю (ОК); 2 і 3 – з електродом порівняння (ЕП) і з допоміжним (ДЕ).

Fig. 3. Connection of input terminals of VPP device when measuring a polarization potential: terminal 1 is connected to metal (EM) of the control object (OK); 2 – to the reference electrode (EP); 3 – with auxiliary (DE).

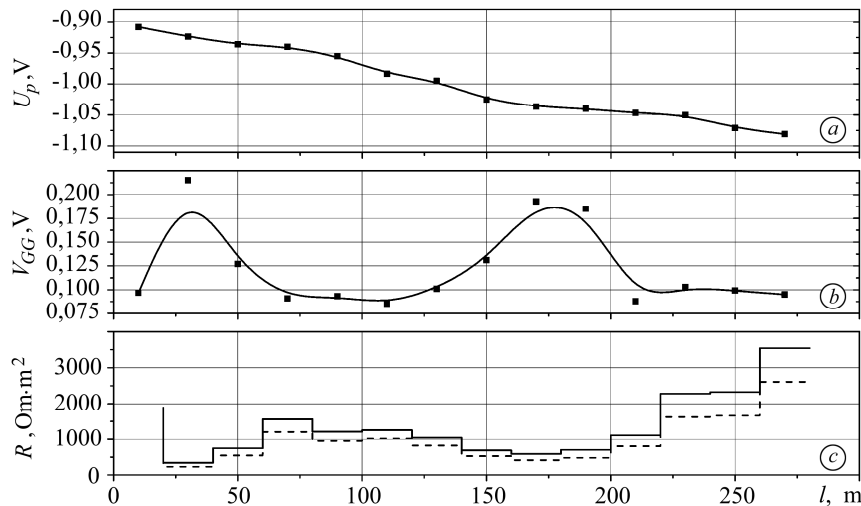


Рис. 4. Розподіл уздовж магістрального трубопроводу поляризаційного потенціалу  $U_p$  (a), змінної напруги “земля–земля”  $V_{GG}$  (b) за даними ВПП та перехідного опору “труба–земля”  $R_{MG}$  (суцільна лінія) і перехідного питомого опору ізоляційного покриття  $R_i$  (штрихова) ПТ (c).

Fig. 4. Distribution of polarization potential  $U_p$  (a), alternating voltage “ground–ground”  $V_{GG}$  (b) along the pipeline according to the data of DPP and the transition resistance “pipe–ground”  $R_{MG}$  (solid line) and also transitional insulation resistance  $R_i$  (dashed line) of the underground pipe (c).

### ВИСНОВКИ

На основі запропонованого методу створено нову апаратуру ВПП для контролю протикорозійного захисту металевих конструкцій в електропровідному середовищі, яка дає змогу вимірювати постійні і змінні електричні напруги та поляризаційний потенціал з показом вимірів на цифровому індикаторі. Результати вимірювань автоматично фіксуються у пам'яті ВПП, що суттєво полегшує подальше їх опрацювання. Координати місць вимірювання визначає модуль глобального позиціонування (GPS), що суттєво спрощує процедуру документування. Натурні випро-

бування на трасах підземних магістральних трубопроводів підтвердили придатність ВПП для пошуку пошкоджень ізоляції ПТ як за різницею потенціалів (метод градієнта), так і на змінному струмі за відомим методом Персона, а також для визначення за новим способом [5] поляризаційного потенціалу металоконструкцій. Крім цього, ВПП у комплексі з безконтактними вимірами струмів дає змогу визначати розподіли густини постійного складника струму установки катодного захисту та питомого опору ізоляції на різних ділянках підземних трубопроводів.

*РЕЗЮМЕ.* Проанализированы известные методы определения поляризационного потенциала металлических сооружений в электропроводящей среде. Описано устройство и принцип действия новой аппаратуры для измерений постоянных и переменных электрических напряжений и определения поляризационного потенциала с исключением омической составляющей. Оценены ее преимущества при контроле катодной защиты металлических конструкций. Приведен пример использования в диагностических обследованиях состояния активной и пассивной защиты от коррозии подземного магистрального трубопровода и выявлены широкие возможности применения аппаратуры в полевых условиях.

*SUMMARY.* The known methods for determining the polarization potential of metallic structures in electroconductive environment are analyzed. The structure and principle of the new equipment operation for measuring direct and alternating electrical voltages and determining the polarization potential with removing ohmic component are described. Its advantages when controlling metal structures cathode protection are shown. The example of use in diagnostic inspection of the state of active and passive corrosion protection of the underground pipelines is presented and wide possibilities of application of the equipment in field conditions are found.

1. Джала Р. М., Мельник М. І. Методи визначення потенціалу поляризації металеві споруди в електропровідному середовищі // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів: Фіз.-мех. ін-т НАНУ, 2009. – Вип. 14. – С. 125–128.
2. ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. – К.: Держстандарт України, 2003. – 74 с.
3. Методы контроля и измерений при защите подземных сооружений от коррозии / Н. П. Глазов, И. В. Стрижевский, А. М. Калашникова, В. И. Глазков, Л. Ф. Щербакова. – М.: Недра, 1978. – 216 с.
4. Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии / Пер. с нем. Под ред. И. В. Стрижевского. – М.: Металлургия, 1984. – 496 с.
5. Патент 43130А. Україна. G01R19/00, C23F13/00. Спосіб визначення поляризаційного потенціалу підземної споруди / Р. М. Джала. – Опубл. 15.11.2001; Бюл. № 10.
6. Патент 102424. Україна. 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.
7. 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. Dzhalá, B. Ya. Verbenets', M. I. Melnyk, T. I. Shevchuk // Materials Science. – 2009. – 45, № 3. – P. 441–446.)
8. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / 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.
9. Слободян З. В., Никифорчин Г. М., Петрущак О. І. Корозійна тривкість трубної сталі у нафтоводних середовищах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 3. – С. 93–96.  
(Slobodyan Z. V., Nykyforchyn H. M., and Petrushchak O. I. Corrosion resistance of pipe steel in oil-water media // Materials Science. – 2002. – № 3. – P. 424–429.)
10. Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 11–20.  
(Kryzhaniv's'kyi E. I. and Nykyforchyn H. M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // Materials Science. – 2011. – 47, № 2. – P. 127–138).

Одержано 07.08.2015