

Paweł Stochaj
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Badanie skuteczności ochrony katodowej trzyelektrodową metodą pomiarowo-obliczeniową

W artykule omówiono zagadnienia skuteczności ochrony katodowej. Przeprowadzono rozpoznanie metod służących do jej oceny, oraz przedstawiono trzy metody eliminacji spadków napięcia z mierzonej wartości potencjału: metodę pomiaru potencjału wyłączeniowego, metodę pomiarowo-obliczeniową trzyelektrodową i metodę sondy pomiarowej. Zaprezentowano i omówiono wyniki pomiarów uzyskanych wymienionymi metodami, wraz z analizą obliczeniową.

Evaluation of the effectiveness of cathodic protection by the three-electrode measuring-computational method

In the article discusses the effectiveness of cathodic protection. Conducted to identify methods for evaluating the effectiveness of cathodic protection. Presented three methods for eliminate voltage falls from the measured values of voltage potential: a method for measuring the off potential, three electrodes measurement calculation method and the method of test probe. Presented and discussed the results of measurements obtained in mentioned methods and computational analysis.

Analiza sposobów oceny skuteczności ochrony katodowej

Ochrona katodowa jest techniką tzw. czynnego zabezpieczenia przed korozją metalowej konstrukcji, stykającej się z gruntem lub z wodą. Zabezpieczenie czynne jest uzupełnieniem zabezpieczenia biernego, realizowanego przez zastosowanie powłoki izolacyjnej, oddzielającej konstrukcję od środowiska korozyjnego. Powłoka izolacyjna i ochrona katodowa mają za zadanie ograniczyć korozję tak, aby jej szybkość była akceptowalna, tj. aby korozja nie zagrażała konstrukcji w stopniu uniemożliwiającym jej bezpieczne użytkowanie w wymaganym okresie czasu.

Ochrona katodowa jest techniką ochrony elektrochemicznej. Ochrona elektrochemiczna jest to ochrona przed korozją uzyskana w wyniku elektrycznej regulacji potencjału korozyjnego [5]. Potencjał korozyjny jest to różnica potencjałów mierzona pomiędzy konstrukcją i elektrodą odniesienia, umieszczoną w tym samym środowisku elektrolitycznym co konstrukcja. Ochrona katodowa jest to ochrona elektrochemiczna uzyskana przez obniżenie potencjału korozyjnego do poziomu, przy którym szybkość korozji metalu ulega znacznemu zmniejszeniu [5].

Przesunięcie potencjału metalu w kierunku ujemnym (katodowym) uzyskuje się dostarczając do powierzchni metalu prąd elektryczny (elektrony). Prąd ten pochodzi z zewnętrznego źródła (prostownika) i dopływa do powierzchni metalu z ziemi za pośrednictwem układu

(uziomu) anodowego, z którym jest połączony dodatni biegun źródła prądu. Prąd ochrony katodowej może też być prądem ogniwa utworzonego przez połączenie konstrukcji z anodą galwaniczną, ujemną elektrochemicznie w stosunku do konstrukcji.

Potencjał E konstrukcji metalowej, przy którym szybkość korozji jest mniejsza niż 0,01 mm/rok, jest potencjałem ochrony E_p . Postęp korozji z szybkością nie większą niż 0,01 mm/rok jest technicznie i ekonomicznie akceptowalny [5]. Kryterium ochrony katodowej jest więc:

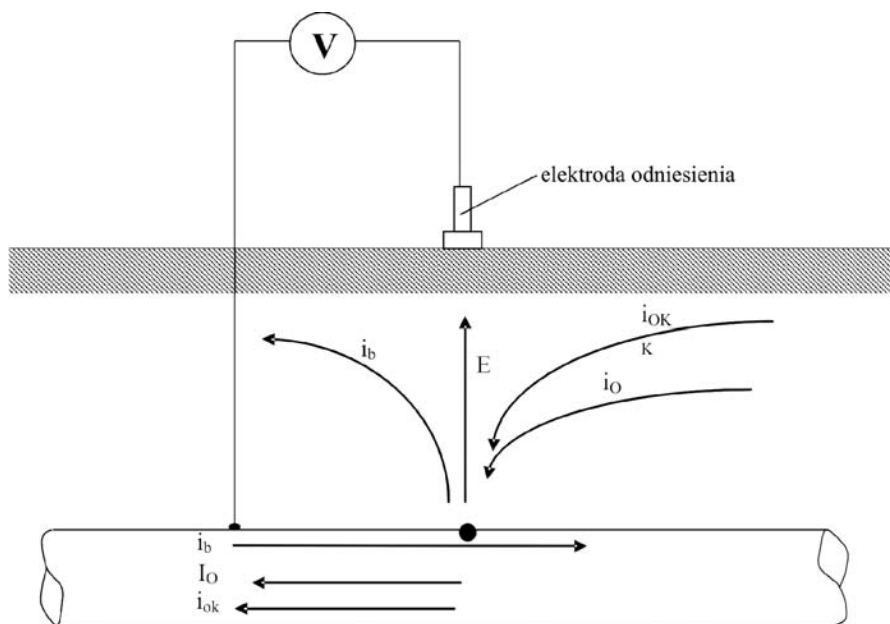
$$E \leq E_p \quad (1)$$

Nie ma jednej wartości potencjału ochrony E_p dla danego metalu. Norma PN-EN 12954:2004 [2] różnicuje wartości E_p dla stali w zależności od rezystywności gruntu, temperatury konstrukcji i zagrożenia działalnością bakterii powodujących korozję mikrobiologiczną. Podaje też wartości graniczne potencjału (tzw. krytyczne ujemne), których nie należy przekraczać z uwagi na możliwość tzw. katodowego odspajania powłoki izolacyjnej oraz nawodnienia stali, prowadzącego do kruchości wodorowej (to ostatnie dotyczy stali o wysokiej wytrzymałości).

Ochronę katodową należy zaprojektować i eksploatować tak, aby była ona skuteczna, co oznacza, że system ochrony katodowej powinien działać w taki sposób by

szybkość korozji konstrukcji była akceptowalna. Innymi słowy – potencjały konstrukcji powinny być równe lub bardziej ujemne od potencjałów ochrony. Powstaje jednak problem; jak mierzyć potencjał konstrukcji, aby zmierzona wartość można było wiarygodnie porównać z kryterium ochrony? Kryterium podaje wartość potencjału na granicy faz metal-elektrolit. Nie ma technicznej możliwości wykonania takiego pomiaru. Elektrode odniesienia umieszcza się jak najbliżej konstrukcji, w praktyce najczęściej na

powierzchni ziemi nad konstrukcją. W przestrzeni pomiędzy konstrukcją a elektrodą płyną w ziemi różnego rodzaju prądy: prąd ochrony katodowej, prądy ogniw utworzonych w ramach jednej konstrukcji lub pomiędzy różnymi stykającymi się konstrukcjami, prądy błądzące. Prądy te wywołują spadki napięcia w ziemi (rysunek 1). W rezultacie mierzona wartość potencjału nie jest wartością wolną od spadków napięcia (IR), a tylko taka (E_{IRfree}) mogłaby być wiarygodnie porównana z wartością kryterium ochrony.



Prądy elektryczne przepływające pomiędzy gazociągiem (defektem powłoki) a ziemią:

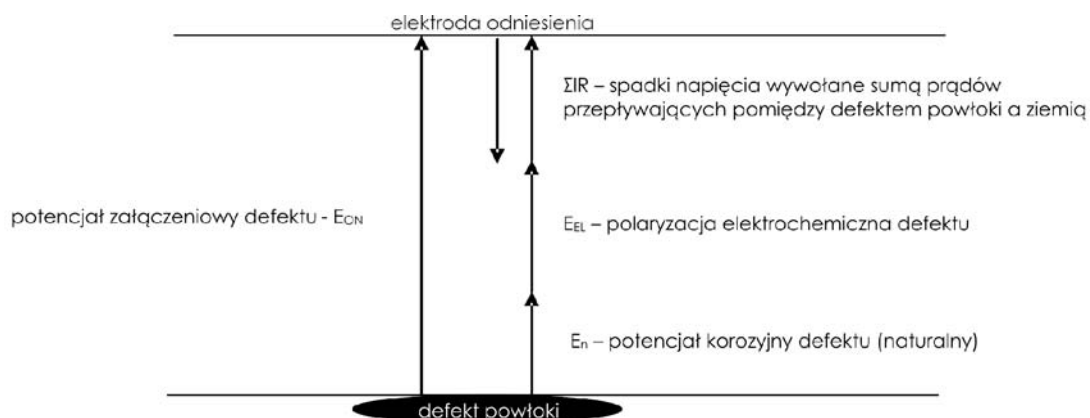
i_{OK} – prąd ochrony katodowej defektu,

i_O – prąd ogniwa, którego elektrodami są: defekt i inny defekt, albo obca elektroda (pręt zbrojeniowy, uziom FeZn),

I_b – prąd błądzący,

E – potencjał defektu mierzony względem elektrody odniesienia ustawionej na powierzchni ziemi:

- przy włączonej ochronie katodowej $E = E_{ON}$
- przy wyłączonej ochronie katodowej $E = E_{OFF}$
- jeżeli $i_b = 0, i_O = 0$ to $E_{OFF} = E_{IRfree}$



Rys. 1. Potencjał defektu powłoki izolacyjnej gazociągu i spadki napięcia przy defekcie

Tak więc dla oceny skuteczności ochrony katodowej z pewnością nie można posłużyć się wartością tzw. potencjału załączeniowego konstrukcji (gazociągu) E_{on} . Jest to potencjał mierzony podczas przepływu prądu ochrony katodowej. Jeżeli prąd ten jest jedynym prądem wywołującym spadek napięcia w przestrzeni pomiędzy gazociągiem a elektrodą odniesienia, to z wartością kryterium można porównać wartość potencjału wyłączeniowego E_{off} , zmierzoną podczas chwilowego wyłączenia źródła (źródła) prądu ochrony katodowej. Jeżeli jednak gazociąg przebiega przez tereny o zróżnicowanym gruncie, albo styka się z obcymi konstrukcjami metalowymi, to po wyłączeniu prądu ochrony katodowej w ziemi nadal płyną prądy ogniw nierównomiernego napowietrzenia lub prądy ogniw utworzonych z obcymi katodami (zbrojenia żelbetu, miedziane uziomy) i anodami (ocynkowana taśma uziemiająca). Prądy te wywołują spadki napięcia. Źródłem spadków napięcia mogą być również prądy błądzące. W rezultacie ocena skuteczności ochrony katodowej na podstawie wartości potencjału wyłączeniowego E_{off} staje się niewiarygodna.

Można wówczas zastosować metodę pomiarowo-obliczeniową trzelektrodową, która pozwala obliczyć wartość

potencjału defektu E_{IRfree} wolnego od spadków napięcia. Metoda trzelektrodowa sprawdza się bardzo dobrze, gdy pomiary i obliczenia wykonuje się dla wcześniej wyznaczonych defektów powłoki (np. metodą DCVG).

Jeżeli nie można wyznaczyć wartości potencjałów konkretnych defektów powłoki izolacyjnej metodą trzelektrodową, ponieważ:

- mierzone wartości gradientów załączeniowych i wyłączeniowych potencjału są małe i nie różnią się wystarczająco od siebie,
- defekt znajduje się na tyle daleko od punktu pomiarowego, że wyniesienie elektrody odniesienia staje się uciążliwe,
- gazociąg znajduje się w obrębie stożka (stożków) potencjałowych obcych katod, anod lub szyn trakcyjnej elektrycznej,

to wykonuje się pomiary potencjałów sztucznych defektów o znanej powierzchni. Defekty te, tzw. elektrody symulujące, umieszcza się na stałe pod ziemią przy powierzchni gazociągu i łączy się kablem z gazociągiem przez listwę zaciskową w słupku pomiarowym. Na czas wykonania pomiaru potencjału, elektroda symulująca jest odłączana od gazociągu.

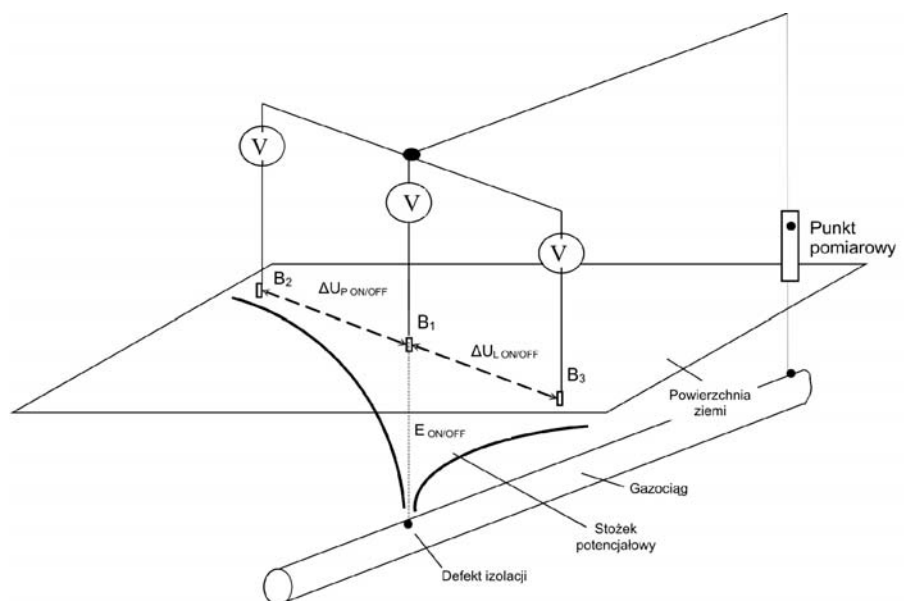
Wykonanie pomiarów metodą trzelektrodową i ocena wyników

W metodzie trzelektrodowej mierzy się potencjały załączeniowe gazociągu E_{on} i wyłączeniowe E_{off} względem elektrody odniesienia ustawionej nad gazociągiem oraz (równocześnie) poprzeczne gradienty napięcia; ΔU_{on} przy włączonym prądzie ochrony katodowej i ΔU_{off} przy wyłączonym prądzie ochrony katodowej.

Gradienty mierzy się w dwóch kierunkach prostopadłych do osi gazociągu, pomiędzy elektrodami odniesienia odległymi od siebie zwykle o 10 m, przy czym jedna z nich jest ustawiona nad gazociągiem. Jest to ta sama elektroda, względem której mierzy się potencjał gazociągu. Jeżeli warunki lokalne uniemożliwiają ustawienie elektrod odniesienia w odległości 10 m od gazociągu to odległość tę można zmniejszyć do 5 m (rysunek 2).

Dzięki uzupełnieniu pomiaru potencjału konkretnego defektu w powłocie izolacyjnej o pomiary poprzecznych gradientów napięcia:

załączeniowego i wyłączeniowego, metoda trzelektrodowa pozwala wyznaczyć, drogą obliczeniową, potencjał defektu E_{IRfree} wolny od spadków napięcia w ziemi. Metoda została upowszechniona przez normę DIN 50925 [1], a następnie znalazła się w normie europejskiej PN-EN 13509 [3].



Rys. 2. Schemat układu elektrod i mierników do pomiarów metodą trzelektrodową

Stosuje się siarczano-miedziane elektrody odniesienia Cu/nas. CuSO_4 . Różnica napięć ($\Delta U_{on} - \Delta U_{off}$) jest to poprzeczny różnicowy gradient napięcia.

Pomiary wykonuje się w jednakowych odstępach, np. co 5 m, posuwając się wzdłuż gazociągu – stąd określenie „pomiaru intensywność”. Dany pomiar może, ale nie musi odnosić się do konkretnego defektu w powłoce izolacyjnej gazociągu. Jeżeli defektów jest dużo to zostają one objęte pomiarami; elektrody prawie zawsze będą umieszczone w pobliżu jakiegoś defektu lub nawet nad defektem. Jeżeli defektów jest mało to opisany wyżej *scanning* gazociągu nie ma sensu, ponieważ na długich odcinkach pomiędzy defektami mierzy się potencjały i gradienty niezwiązane z konkretnymi defektami. W rezultacie wylicza się fałszywe, nieprzydatne wartości potencjałów, które nie są potencjałami E_{IRfree} . Istotą metody trzelektrodowej jest to, że pozwala ona wyznaczyć potencjały E_{IRfree} konkretnych defektów. Nie można mówić o potencjale E_{IRfree} gazociągu. Trzeba więc najpierw zlokalizować defekty, potem wykonać w tych miejscach pomiary potencjałów i gradientów, a następnie wyliczyć wartości potencjałów tych defektów wolne od spadków napięcia w ziemi.

Wykonanie pomiaru wartości chwilowych potencjałów i gradientów napięcia w jednym miejscu wymaga kilkunastu sekund, a łącznie z ustawieniem elektrod – jednej do dwóch minut, w zależności od rodzaju terenu. Jeżeli jednak gazociąg podlega oddziaływaniu prądów błądzących to zmierzenie wartości chwilowych jest niewystarczające, ponieważ potencjały i gradienty podlegają zmianom w czasie, często dynamicznym. Potrzebna jest więc rejestracja mierzonych wielkości w długim okresie czasu – co najmniej 1 godziny, oraz opracowanie statystyczne uzyskanych wyników. W takich warunkach wykonywanie pomiarów z pięciometrowym krokiem pomiarowym jest całkowicie niepraktyczne. Metoda trzelektrodowa w wersji *scanningowej* nie nadaje się do wyznaczania wartości potencjałów E_{IRfree} gdy gazociąg podlega oddziaływaniu prądów błądzących (zwłaszcza pochodzących z bliskiego źródła, a nawet z dalekiego) i gdy powłoka izolacyjna gazociągu jest wysokiej jakości. Wówczas efekty potencjałowe oddziaływania prądów błądzących są widoczne zarówno blisko, jak i daleko od źródła (torów trakcji elektrycznej). Jeżeli jednak obiektami pomiarów są pojedyncze defekty to można dla nich przeprowadzić wymagane długotrwałe rejestracje potencjałów i gradientów, po czym poddać analizie obliczone wartości maksymalne, minimalne i średnie E_{IRfree} .

Wartość potencjału defektu E_{IRfree} oblicza się korzystając z następującej zależności:

$$E_{IRfree} = E_{off} - \frac{\Delta U_{off}}{\Delta U_{on} - \Delta U_{off}} (E_{on} - E_{off}) \quad (2)$$

gdzie:

- E_{on} – potencjał załączeniowy defektu,
- E_{off} – potencjał wyłączeniowy defektu,
- ΔU_{on} – poprzeczny gradient załączeniowy napięcia,
- ΔU_{off} – poprzeczny gradient wyłączeniowy napięcia.

Uwaga: gradienty ΔU_{on} i ΔU_{off} są to średnie arytmetyczne z wartości gradientów zmierzonych w dwóch prostopadłych kierunkach. Przepływy prądów wyrównawczych i błądzących po obu stronach gazociągu mogą się kształtować niejednakowo, stąd potrzeba uśrednienia gradientów napięcia.

Z analizy wzoru na E_{IRfree} defektu wynika, że:

- jeżeli po wyłączeniu prądu ochrony katodowej w ziemi nie płynie żaden prąd ($\Delta U_{off} = 0$) to $E_{IRfree} = E_{off}$ – jest to przypadek, gdy potencjał wyłączeniowy defektu jest miarodajny dla określenia skuteczności ochrony katodowej w defekcie,
- jeżeli po wyłączeniu prądu ochrony katodowej w ziemi nadal płynie prąd, i to w kierunku do defektu, to E_{IRfree} jest mniej ujemny od E_{off} ,
- jeżeli po wyłączeniu prądu ochrony katodowej w ziemi nadal płynie prąd, ale w kierunku od defektu, to E_{IRfree} jest bardziej ujemny od E_{off} .

Orientacyjnie można oszacować, że wiarygodne potencjały E_{IRfree} mieszczą się w zakresie od około $-0,20$ V do około $-1,25$ V względem elektrody Cu/nas. CuSO_4 . Potencjały mniej elektroujemne od około $-0,20$ V i bardziej elektroujemne od około $-1,25$ V można uznać za niewiarygodne. Z arytmetycznego punktu widzenia, wartości E_{IRfree} mieszczące się w wiarygodnym zakresie od $-0,20$ ÷ $-1,25$ V otrzymuje się zwykle, gdy stosunek ΔU_{on} do ΔU_{off} jest duży (wynosi przynajmniej 3). Dotyczy to zarówno przypadków, gdy obydwa gradienty są dodatnie (prąd płynie w kierunku do gazociągu przy włączonej i przy wyłączonej ochronie katodowej), jak i przypadków, gdy obydwa gradienty są ujemne (prąd płynie w kierunku od gazociągu przy włączonej i wyłączonej ochronie katodowej). Ten drugi przypadek z fizycznego punktu widzenia musi być odrzucony, ponieważ nie dotyczy polaryzacji katodowej defektu. Wiarygodne wyniki obliczeń E_{IRfree} otrzymuje się także gdy gradient załączeniowy ΔU_{on} jest dodatni (prąd płynie w kierunku do gazociągu), a gradient wyłączeniowy ΔU_{off} jest ujemny (prąd płynie w kierunku od gazociągu). Należy mieć na uwadze, że jeżeli różnica pomiędzy potencjałami załączeniowym E_{on}

i wyłączeniowym E_{off} jest duża, np. sięga 1 V, to wartość stosunku ΔU_{on} do ΔU_{off} większa od 3 nie gwarantuje

jeszcze otrzymania arytmetycznie wiarygodnej wartości potencjału E_{IRfree} .

Przykłady wyników pomiarów i obliczeń przy stosowaniu kroku pomiarowego

Przykład 1

$$E_{on} = -1,47 \text{ V}$$

$$E_{off} = -1,12 \text{ V}$$

$$\Delta U_{on} = 15 \text{ mV}$$

$$\Delta U_{off} = 11 \text{ mV}$$

$$E_{IRfree} = -1,12 - \frac{11}{15-11}(-1,47+1,12) = -0,15 \text{ V}$$

Gradyenty napięcia ΔU_{on} i ΔU_{off} są dodatnie, czyli prąd płynie w kierunku do gazociągu zarówno przy włączonej, jak i przy wyłączonej ochronie katodowej, ale stosunek gradientu ΔU_{on} do ΔU_{off} nie przekracza 2 (wynosi 1,36). Oprócz prądu ochrony katodowej w kierunku gazociągu płynie dominujący nad nim obcy prąd (błądzący?), raczej niezwiązany z konkretnym defektem w rejonie wykonywania pomiarów. Wyliczoną wartość E_{IRfree} należy zignorować.

Przykład 2

$$E_{on} = -1,42 \text{ V}$$

$$E_{off} = -1,08 \text{ V}$$

$$\Delta U_{on} = 53 \text{ mV}$$

$$\Delta U_{off} = 50 \text{ mV}$$

$$E_{IRfree} = -1,08 - \frac{50}{53-50}(-1,42+1,08) = 4,58 \text{ V}$$

Powyższy wynik jest całkowicie nieprzydatny. Nie dotyczy on żadnego defektu.

Przykład 3

$$E_{on} = -1,47 \text{ V}$$

$$E_{off} = -1,13 \text{ V}$$

$$\Delta U_{on} = 4 \text{ mV}$$

$$\Delta U_{off} = 2 \text{ mV}$$

$$E_{IRfree} = -1,13 - \frac{2}{4-2}(-1,47+1,13) = 0,79 \text{ V}$$

Wynik jest wiarygodny, ale z pomiarowego punktu widzenia wartość E_{IRfree} może budzić wątpliwości ze względu na bardzo małe wartości gradientów napięcia – na granicy błędów odczytu, które mogą być spowodowane różnicami się potencjałami elektrod odniesienia. Według [1] i [3] nie należy obliczać E_{IRfree} gdy zmierzona wartość ΔU_{on}

jest mniejsza od 20 mV. Jeżeli jednak przyjąć, że wyniki pomiarów gradientów nie są obciążone błędem i że są związane z konkretnym defektem, to świadczą one o tym, że defekt jest mały. Skoro tak, to przypuszczalnie jest skutecznie chroniony, a jego potencjał wolny od składowej omowej jest raczej bliższy E_{off} (-1,13 V), niż obliczonemu E_{IRfree} (-0,79 V).

Przykład 4

$$E_{on} = -1,39 \text{ V}$$

$$E_{off} = -1,12 \text{ V}$$

$$\Delta U_{on} = 4 \text{ mV (prąd płynie w kierunku do gazociągu)}$$

$$\Delta U_{off} = -7 \text{ mV (prąd płynie w kierunku od gazociągu)}$$

$$E_{IRfree} = -1,12 - \frac{-7}{4-7}(-1,39+1,12) = 1,21 \text{ V}$$

Wynik wiarygodny – potencjał E_{IRfree} dotyczy konkretnego defektu.

Przykład 5

$$E_{on} = -1,47 \text{ V}$$

$$E_{off} = -1,12 \text{ V}$$

$$\Delta U_{on} = -11 \text{ mV (prąd płynie w kierunku od gazociągu)}$$

$$\Delta U_{off} = -5 \text{ mV (prąd płynie w kierunku od gazociągu)}$$

$$E_{IRfree} = -1,12 - \frac{-5}{-11+5}(-1,47+1,12) = 0,83 \text{ V}$$

Wynik fizycznie fałszywy – nie dotyczy żadnego defektu. Przy włączonej ochronie katodowej prąd płynie od gazociągu i jest większy niż przy ochronie wyłączonej.

Pomiary metodą kroku pomiarowego wykonuje się przy użyciu specjalistycznej aparatury, która składa się z zestawu trzech mierników napięcia i kompletu elektrod odniesienia, a także z oprogramowania do akwizycji danych pomiarowych i wykonywania obliczeń oraz wizualizacji wyników – wykresów potencjałów i gradientów wzdłuż gazociągu oraz tabel wartości zmierzonych i obliczonych. Operatorzy sieci i firmy świadczące usługi pomiarowe w Polsce posługują się na ogół aparaturą MoData, niemieckiej firmy Weilekes Elektronik. W tabelicy 1 i na wykresie 1. przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń wykonanych aparaturą MoData.

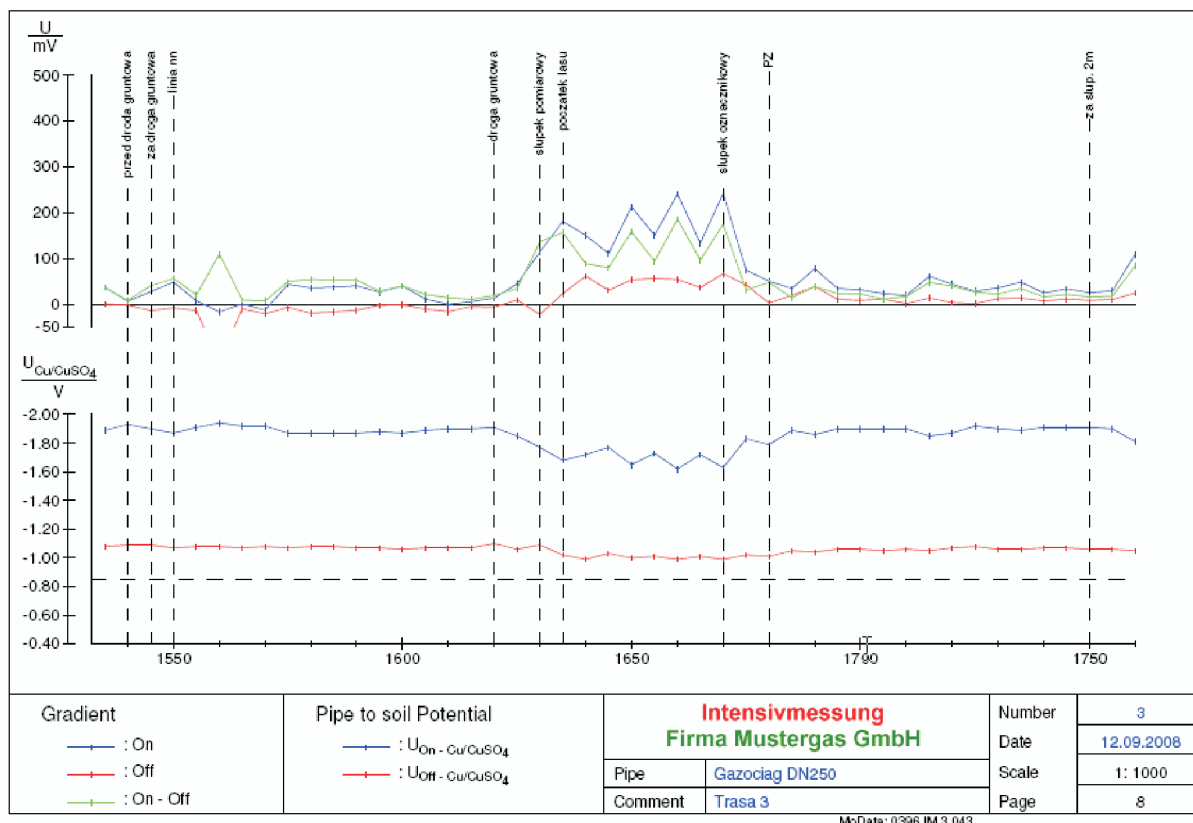
Tablica 1. Przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń wykonanych przy użyciu aparatury MoData

Page : 8 Date : 12.09.2008		INTENSIVE MEASUREMENT			wefelkes elektronik		
Pipe : Gazociąg DN250 Number : 3 Comment : Trasa 3 Section : 0 - 1780							
Meter [m]	Potential [V]			Gradient [mV]			Comment
	On	Off	IR-free	On	Off	Diff.	
1610	-1.90	-1.07	-1.90	0	-15	15	
1615	-1.90	-1.07	-1.48	6	-8	11	
1620	-1.91	-1.10	-1.34	14	-6	20	droga gruntowa
1625	-1.85	-1.06	-0.83	45	10	35	
1630	-1.77	-1.09	-1.20	115	-22	137	słupek pomiarowy
1635	-1.68	-1.02	-0.91	181	24	157	początek lasu
1640	-1.72	-0.99	-0.47	151	62	89	
1645	-1.77	-1.03	-0.73	111	31	80	
1650	-1.65	-1.00	-0.77	213	54	159	
1655	-1.73	-1.01	-0.57	151	57	94	
1660	-1.62	-0.99	-0.80	241	55	186	
1665	-1.72	-1.01	-0.73	134	37	97	
1670	-1.63	-0.99	-0.74	242	67	175	słupek oznacznikowy
1675	-1.83	-1.02	0.07	75	43	32	
1680	-1.79	-1.01	-0.96	51	3	48	PZ
1685	-1.89	-1.05	0.07	35	20	15	
1690	-1.86	-1.04	-0.22	78	39	39	
1695	-1.90	-1.06	-0.65	35	11	24	
1700	-1.90	-1.06	-0.73	32	9	23	
1705	-1.90	-1.06	-0.20	24	12	12	
1710	-1.90	-1.06	-0.94	20	2	18	
1715	-1.85	-1.06	-0.80	62	14	48	
1720	-1.87	-1.07	-0.98	44	4	40	
1725	-1.92	-1.08	-1.01	29	2	27	
1730	-1.90	-1.06	-0.58	36	13	23	
1735	-1.89	-1.06	-0.71	49	14	35	
1740	-1.91	-1.07	-0.67	25	8	17	
1745	-1.91	-1.07	-0.61	34	12	22	
1750	-1.91	-1.06	-0.58	26	9	17	za słup. 2m
1755	-1.90	-1.06	-0.57	30	11	19	
1760	-1.81	-1.05	-0.82	110	25	85	
1765	-1.60	-0.97	-0.67	288	92	196	
1770	-1.52	-0.89	-0.38	381	170	211	
1775	-1.86	-1.06	-0.99	51	4	47	
1780	-1.91	-1.07	-1.09	16	0	16	koniec lasu

Komentarz do tablicy 1 i wykresu 1

Ocena wyników obliczeń E_{IRfree} przedstawia się następująco:

- 3 pomiary od 1610 m do 1620 m – małe gradienty, wyniki fizycznie niewiarygodne, brak defektów,
- 10 pomiarów od 1625 m do 1670 m – wyniki wiarygodne; defekty w miejscach albo obok miejsc pomiarów, co najmniej dwa defekty nie chronione katodowo (1640 m i 1655 m); brak informacji o rezystywności gruntu, dlatego nie można ocenić czy w defektach w 1645 m, 1650 m, 1660 m, 1665 m i 1670 m jest spełnione kryterium ochrony,
- pomiary w 1675 m i 1685 m – wyniki niewiarygodne arytmetycznie, małe wartości stosunków gradientów; jako E_{IRfree} należy przyjąć E_{off}
- pomiar w 1680 m – wynik wiarygodny, defekt chroniony katodowo,
- pomiary w 1690 m i 1705 m – małe stosunki gradientów, ale prąd płynie w kierunku gazociągu, więc istnienie defektów jest możliwe (jednak potencjały E_{IRfree} są niewiarygodne, a ponadto brak jest informacji o rezystywności gruntu),
- pomiary w 1695 m i 1700 m – wyniki wiarygodne, defekty przypuszczalnie chronione katodowo – brak informacji o rezystywności gruntu,
- 12 pomiarów od 1710 m do 1765 m – wyniki wiarygodne, połowa defektów chroniona katodowo, na pewno nie są chronione defekty w 1730 m, 1745 m, 1750 m i 1755 m,
- pomiar w 1770 m – wynik wiarygodny, może być defekt w wysokoomowym gruncie, niechroniony katodowo,



Wykres 1. Graficzne zestawienie wyników pomiarów i obliczeń wykonanych przy użyciu aparatury MoData

- pomiary w 1775 m i 1780 m – wyniki wiarygodne, defekty chronione katodowo.

Z powyższej analizy i oceny wynika, że:

- dokładność zlokalizowania defektu wynosi tylko około 2,5 m przy kroku pomiarowym 5 m,
- wykonuje się szereg zbędnych pomiarów w miejscach, gdzie nie ma defektów,
- brak pomiarów rezystywności gruntu uniemożliwia porównanie obliczonej wartości E_{IRfree} z kryterium ochrony,
- w niektórych miejscach nie ma pewności czy wykonane pomiary dotyczą defektu, czy nie są związane z żadnym defektem.

Przydatność wykonywania pracochłonnego *scanningu* gazociągu jest wątpliwa. Pomiary metodą trzelektrodową należy wykonywać w miejscach zlokalizowanych uprzednio defektów powłoki izolacyjnej.

Przykład takiego podejścia do problemu oceny skuteczno-

ści ochrony katodowej przedstawiono w tabelicy 2. Wartości potencjałów i gradientów są wartościami średnimi z rejestracji, trwających od 10 minut do jednej godziny, przy czasie próbkowania 0,1 s. Czas rejestracji dobierano w zależności od zakresu wahań mierzonych wielkości spowodowanych oddziaływaniem prądów błądzących.

Tabela 2. Wyniki pomiarów metodą trzelektrodową w wybranych defektach powłoki ochronnej na gazociągu tranzytowym DN1400

Nr defektu	ρ	E_{ON}	E_{OFF}	ΔE_{ON}	ΔE_{OFF}	E_{IRfree}
	[Ωm]	[V]	[V]	[mV]	[mV]	[V]
U25	471	-1,51	-1,12	22,0	20,7	+5,09
U29	96	-1,49	-1,13	-46,8	-27,6	-0,61
U51	33	-1,54	-1,18	6,0	-36,0	-1,49
U52	33	-1,55	-1,18	5,0	-20,0	-1,48
	30	-1,56	-1,26	17,7	-22,9	-1,43
U174	> 5000	-1,25	-0,98	210	111	-0,67
U177	49	-1,50	-1,12	7,5	-1,4	-1,18
	48	-1,53	-1,17	40,9	24,8	-0,61
U4	1480	-1,36	-0,98	122	48	-0,72
U5	247	-1,44	-1,07	58	-30	-1,20
U28	52	-1,50	-1,04	21	-18	-1,25
U35	29	-1,44	-1,08	65	14	-0,98
U153	573	-1,39	-1,04	53	13	-0,75

Komentarz do tablicy 2

Mała różnica pomiędzy gradientami napięcia przy defekcie U25 dowodzi, że gradienty te nie są związane z prądem ochrony katodowej defektu. Wartość E_{IRfree} jest wynikiem arytmetycznym nie mającym nic wspólnego z fizyczną wartością potencjału wolnego od spadków napięcia.

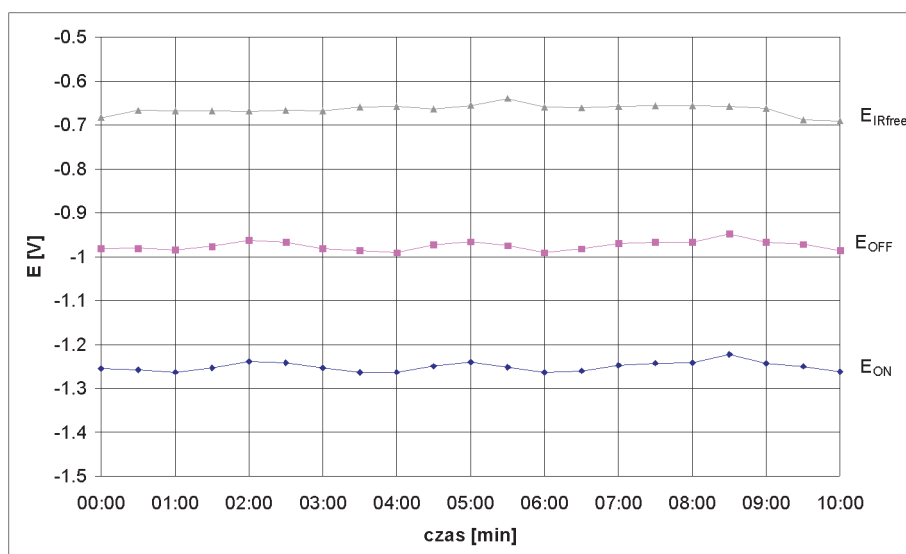
Defekty U51 i U52 są defektami na armaturze. Obliczone wartości E_{IRfree} mieszczą się poza zakresem fizycznie wiarygodnym – są zbyt elektroujemne. Ponadto na niewiarygodność wyników obliczeń rzutują małe wartości gradientów załączeniowych.

Wyniki obliczeń E_{IRfree} w defektach U4, U35 i U153 są wiarygodne. Stosunki gradientu załączeniowego do wyłączeniowego są duże. Kryterium ochrony katodowej jest w każdym przypadku spełnione. Podobnie wiarygodne są wartości E_{IRfree} w defektach U5 i U28. Stosunki gradientów są małe, ale gradienty wyłączeniowe zmieniają znak.

Kryterium ochrony katodowej jest w obu przypadkach spełnione. W defekcie U177 pomiary wykonano najpierw w okresie bez opadów. Z powierzchnią defektu stykał się suchy, betonowy obciążnik. Powtórzono pomiary po opadach, przy wysokim poziomie wód gruntowych. Dopływ prądu do defektu pod obciążnikiem był ułatwiony z powodu zawilgocenia obciążnika; stąd zwiększone gradienty ΔE_{ON} i ΔE_{OFF} . W okresie suchym defekt jest skutecznie chroniony katodowo – kryterium ochrony $E_p = -0,85$ V jest spełnione. W okresie wilgotnym kryterium ochrony nie jest spełnione, dlatego defekt został zakwalifikowany do naprawy.

Wyniki obliczeń E_{IRfree} w defektach U29 i U174 są wiarygodne. Kryterium ochrony katodowej $E_p = -0,85$ w defekcie U29 nie jest spełnione. W defekcie U174 kryterium ochrony $E_p = -0,65$ V jest spełnione.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki rejestracji potencjałów E_{on} i E_{off} oraz obliczeń E_{IRfree} w defekcie U174.



Rys. 3. Wyniki dziesięćminutowej rejestracji potencjałów i obliczeń E_{IRfree} w defekcie U174

Podsumowanie

Korozja podziemnego gazociągu może się rozwijać w miejscach, gdzie powierzchnia rury styka się z elektrolitem glebowym, czyli w miejscach defektów powłoki izolacyjnej. Miejsca te zabezpiecza się przed korozją stosując ochronę katodową. Ochrona powinna być tak zaprojektowana i wyregulowana, aby była skuteczna w tych właśnie miejscach. Pojęcie skuteczności odnosi się nie do „gazociągu”, lecz do defektów powłoki. Miara skuteczności ochrony katodowej jest wartość potencjału chronionej konstrukcji względem otaczającego środowiska elektrolitycznego. Wartość ta winna speł-

niać kryterium ochrony, tzn. powinna być odpowiednio elektroujemna. Kryterium ochrony dotyczy wartości potencjału na granicy faz metal-elektrolit. W warunkach technicznych, terenowych, pomiar potencjału na granicy faz jest niewykonalny. Potencjał mierzy się względem elektrody odniesienia ustawionej w pewnym oddaleniu od eksponowanej powierzchni gazociągu. W rezultacie w mierzonej wartości potencjału mieszczą się spadki napięcia pochodzące od prądu ochrony katodowej, prądów błądzących i prądów wyrównawczych makroogniw korozyjnych. Fałszują one wynik pomiaru.

Stosuje się trzy metody eliminacji spadków napięcia z mierzonej wartości potencjału: metodę pomiaru potencjału wyłączeniowego, metodę pomiarowo-obliczeniową trzeielektrodową i metodę sondy pomiarowej.

Jeżeli z powodów omówionych na wstępie artykułu nie można użyć metody pomiaru potencjału wyłączeniowego to należy zastosować metodę pomiarowo-obliczeniową trzeielektrodową. Metoda ta jest bardzo skuteczna gdy

pomiary i obliczenia wykonuje się dla wcześniej wyznaczonych defektów powłoki (np. metodą DCVG), a następnie analizuje się i ocenia wiarygodność otrzymanych wyników. Prawidłowa interpretacja wyników pomiarów uzyskanych metodą trzeielektrodową powinna zawierać analizę uwzględniającą warunki istniejące w danym miejscu pomiarów (rezystywność gruntu, pH, oddziaływanie prądów błądzących, połączenia z obcymi konstrukcjami).

Recenzent: doc. dr inż. Andrzej Froński

Literatura

- [1] DIN 50 925:1992. *Nachweis der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes erdverlegter Anlagen.*
- [2] PN-EN 12954:2004. *Ochrona katodowa konstrukcji metalowych w gruntach lub w wodach – Zasady ogólne i zastosowania dotyczące rurociągów.*
- [3] PN-EN 13509:2005. *Metody pomiarowe w ochronie katodowej.*
- [4] PN-EN 50162:2005. *Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błądzące pochodzące z systemów prądu stałego.*
- [5] PN-EN ISO 8044:2002. *Korozja metali i stopów – Podstawowe terminy i definicje.*



Mgr inż. Paweł STOCHAJ – absolwent AGH, Kierownik Laboratorium Techniki Eksploatacji Gazociągów w INiG w Krakowie. Główny przedmiot zainteresowań – przesył i dystrybucja paliw gazowych i ropy, ochrona katodowa oraz powłoki ochronne na rurociągach.

ZAKŁAD TECHNIKI STRZELNICZEJ

Zakres działania:

- konstrukcja urządzeń strzelniczych, przeznaczonych do udostępniania poziomów ropo- i gazonośnych;
- opracowywanie technologii i metod prowadzenia prac udostępniających, przy wykorzystaniu własnych rozwiązań konstrukcyjnych sprzętu strzelniczego;
- konstrukcja urządzeń strzelniczych, przeznaczonych do prac specjalnych i ratunkowych w otworach wiertniczych (korki detonacyjne, ładunki o działaniu pionowym, obcinacze rur okładzinowych i płuczkowych);
- przywracanie cyrkulacji w odwiercie – uwalnianie przewodu wiertniczego;
- intensyfikacja oraz stymulacja przyływów medium do odwiertu (uszczelnianie strefy przyotworowej złoża prochowymi generatorami ciśnienia);
- badania atestacyjno-wytrzymałościowe sprzętu strzałowego;
- małoseryjna produkcja urządzeń strzelniczych (perforatory, korki detonacyjne, obcinacze do rur).

Kierownik: mgr inż. Antoni Frodyma

Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków

Telefon: 12 653-25-12 wew. 137

Faks: 12 653-16-65

E-mail: antoni.frodyma@inig.pl

