



**WYBRANE ASPEKTY DOTYCZĄCE POMIARÓW  
REZYSTANCJI PRZEJŚCIA PODZIEMNYCH RUROCIĄGÓW**

**SOME ASPECTS OF THE MEASUREMENTS  
OF UNDERGROUND PIPELINE TO SOIL RESISTANCE**

Marek Fiedorowicz, Michał Jagiełło

Operator Gazociągów Przesyłowych  
GAZ-SYSTEM S.A. Oddział w Gdańsku

Słowa kluczowe: powłoka, rurociąg zaizolowany, ochrona katodowa, rezystancja przejścia, punkty pomiarów elektrycznych  
Keywords: coating, insulated pipeline, cathodic protection, structure to soil resistance (coating resistance), test stations

**Streszczenie**

Pomiary rezystancji przejścia są jednymi z ważniejszych pomiarów wykonywanych w celu oceny stanu ochrony przeciwkorozyjnej podziemnych, stalowych rurociągów. W artykule przedstawiono podstawy oraz metodykę pomiarową wyznaczania rezystancji przejścia rurociągów i ich odcinków. Wskazano właściwe techniki wykonywania pomiarów w przypadku rurociągów pokrytych powłokami o wysokim stopniu szczelności, rurociągów krótkich i rurociągów pokrytych powłoką szczelną, bezdefektową. Przedstawiono przykłady typowych błędów w wykonawstwie punktów pomiarowych oraz metody pomiarowe pozwalające na wykrycie tych błędów. Niniejszy artykuł pomyślany jest jako materiał szkoleniowy dla kursów certyfikacyjnych personelu ochrony katodowej drugiego stopnia.

**Summary**

Measurements of structures to soil resistance (coating resistances) are one of the most important ones taken in order to assess the condition of anticorrosion protection of underground steel pipelines. This article shows the basics and measurements methodic of setting of coating resistances of pipelines as well as their segments. Correct techniques of measurements have been specified for: tight insulation coated pipelines, short pipelines and pipelines with tight and defectless/flawless coating. Examples of typical mistakes in the constructions of test stations have been given as well as measurement methods that help to identify these mistakes. This paper is meant as a basis for training courses for second grade staff certification.

## 1. Wstęp

Pomiary rezystancji przejścia podziemnych, metalowych rurociągów izolowanych obecnie są bardzo ważnym faktorem w badaniach ochrony przeciwkorozyjnej – z roli pomiarów pomocniczych ewoluowały do roli pomiarów ważkich, a niekiedy – kluczowych. Zwłaszcza w przypadku rurociągów pokrytych powłokami o wysokim poziomie szczelności, wyniki tych pomiarów dostarczają ważnych, pierwszoplanowych informacji.

Rezystancja przejścia rurociągu jest zależna od jego zewnętrznej powierzchni bocznej, rodzaju powłoki izolacyjnej (rodzaju materiału powłoki, rezystywności tego materiału i grubości), wielkości powierzchni odsłoniętej rurociągu, stykającej się z otaczającym środowiskiem elektrolitycznym oraz od rezystywności tego środowiska.

W przypadku odcinków i całych rurociągów o długościach mniejszych od długości charakterystycznej, rezystancja przejścia rurociągu/powłoki  $R_{CO}$  jest wypadkową rezystancją równoległego połączenia zastępczej rezystancji przejścia (uziemia) w defektach izolacji  $R_{def}$  i rezystancji przejścia powłoki bez defektów  $R_{CO0}$ :

$$\frac{1}{R_{CO}} = \frac{1}{R_{def}} + \frac{1}{R_{CO0}} \quad (1)$$

gdzie:

- $R_{CO}$  – rezystancja przejścia odcinka rurociągu,  
 $R_{def}$  – wypadkowa (zastępcza) rezystancja przejścia w defektach powłoki,  
 $R_{CO0}$  – rezystancja przejścia powłoki bez defektów.

Zatem

$$R_{CO} = \frac{R_{CO0} \times R_{def}}{R_{CO0} + R_{def}} \quad (2)$$

Biorąc pod uwagę, że rezystancja przejścia w defektach powłoki  $R_{def}$  jest wypadkową równoległego połączenia rezystancji przejścia (uziemia) w poszczególnych defektach powłoki  $R_{defi}$ , a  $R_{CO0}$  jest o wiele rzędów wielkości większa niż  $R_{def}$ , to w rezultacie rezystancja przejścia odcinka rurociągu pokrytego powłoką z nieszczelnościami (defektami) jest wypadkową rezystancją równoległego połączenia rezystancji uziemień poszczególnych defektów wg zależności:

$$\frac{1}{R_{CO}} = \sum_i \frac{1}{R_{defi}} \quad (3)$$

gdzie:

- $R_{CO}$  – rezystancja przejścia odcinka rurociągu,  
 $R_{defi}$  – rezystancja przejścia i-tego defektu powłoki.

Zatem rezystancja przejścia odcinka rurociągu zależy przede wszystkim ilości i wielkości defektów (nieciągłości) w powłoce izolacyjnej.

Wyniki pomiarów rezystancji lub jednostkowych rezystancji przejścia wykorzystuje się w:

- ocenach powłok izolacyjnych rurociągów „po zasypaniu” (im większa jest łączna powierzchnia odsłonięta rurociągu, stykająca się ze środowiskiem elektrolitycznym, tym mniejsza jest rezystancja przejścia);

- monitorowaniu ingerencji stron trzecich, naruszających powłokę izolacyjną rurociągu (powstanie nowej nieciągłości w powłoce powoduje zmniejszenie rezystancji przejścia odcinka, a czasami – całego rurociągu);
- ocenach skuteczności ochrony katodowej rurociągów zaizolowanych powłokami o wysokim poziomie szczelności (zasady tej metody podano w [1]);
- ocenach skuteczności ochrony przeciwkorozyjnej opartej na bezdefektowych powłokach izolacyjnych.

Tzw. powierzchniowa jednostkowa rezystancja przejścia  $r_{CO}$  jest średnią rezystancją przejścia powierzchni rurociągu o wielkości jednostki, np.  $1 \text{ m}^2$ , uwzględniającą występowanie defektów izolacji:

$$r_{CO} = R_{CO} \times S \quad (4)$$

gdzie:

$R_{CO}$  – rezystancja przejścia odcinka/rurociągu wg zał. (1) w  $[\Omega]$ ,

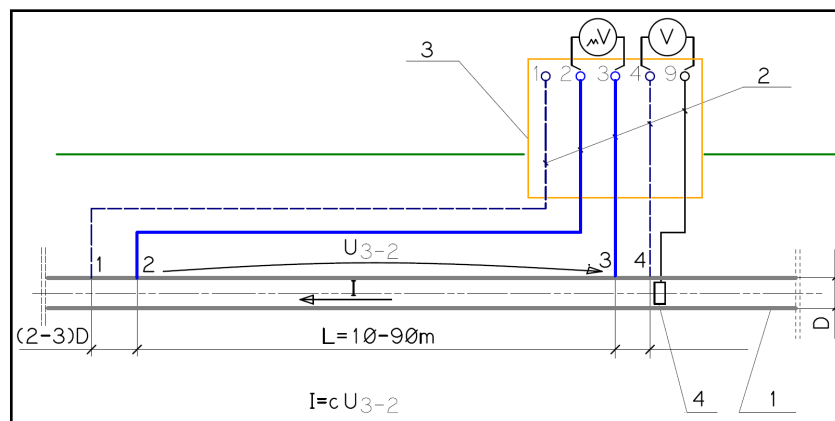
$S$  – zewnętrzną powierzchnią boczną ocenianego odcinka/rurociągu w  $[\text{m}^2]$ .

Przyjmuje się, że w przypadku rurociągów pokrytych powłokami PE i PP  $r_{CO} \geq 10^8 \Omega \text{m}^2$  jest wyznacznikiem bezdefektowości powłoki odcinka rurociągu.

W gazownictwie od 1995 r. przepisy państwowe - kolejne rozporządzenia, w tym aktualnie obowiązujące [2], w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie wymagają, aby w dokumentacji projektowej stalowego gazociągu określać wymaganą jednostkową rezystancję przejścia i aby „po zasypaniu” dokonać pomiaru tej rezystancji w celu sprawdzenia, czy wymagane kryterium zostało spełnione.

## 2. Wyznaczanie rezystancji przejścia pododcinka dłuższego rurociągu

Aby wyznaczanie rezystancji przejścia pododcinków dłuższego rurociągu, zespolonego i zasypanego, było możliwe, rurociąg powinien być wyposażony w tzw. prądowe punkty pomiarowe PIsE. Punkt prądowy umożliwia pośrednie wyznaczenie natężenia prądu płynącego w rurociągu w miejscu, w którym taki punkt jest zamontowany (rys. 1).



Rys. 1. Punkt pomiarowy PIsE; 1 – rurociąg, 2 – kable punktu pomiarowego, 3 – słupek/szafka połączeniowa, 4 – stała, zakopana elektroda odniesienia

Natężenie prądu płynącego w punkcie  $n$  wyznacza się z zależności:

$$I_n = c \times U_n \quad (5)$$

gdzie:

$I_n$  – natężenie prądu płynącego w rurociągu w punkcie  $n$ ,

$U_n$  – spadek napięcia w rurociągu zmierzony w punkcie pomiędzy punktami 3 a 2,

$c$  – przewodność odcinka pomiarowego spadku napięcia pomiędzy punktami 3 a 2.

Spadek napięcia  $U_n$  określa się jako różnicę pomiędzy spadkiem  $U_{\text{non}}$  zmierzonym w punkcie  $n$  przy załączonym i spadkiem  $U_{\text{noff}}$  zmierzonym bezpośrednio po wyłączeniu prądu:

$$U_n = U_{n_{\text{on}}} - U_{n_{\text{off}}} \quad (6)$$

Tak wyznaczony spadek napięcia  $U_n$  nazywany jest spadkiem różnicowym.

Aby wyznaczyć przewodność odcinka pomiarowego w punkcie PIs, pomiędzy przewodami zewnętrznymi - drenażowymi (1 i 4) punktu przyłącza się przenośne źródło prądu o stabilnym natężeniu prądu wyjściowego, np. ok. 1 A. Źródłem prądu może być np. zasilacz pracujący w trybie galwanostatycznym (zasilany z agregatu przenośnego, akumulatora lub przetwornicy) lub sam akumulator o dostatecznie dużej pojemności, połączony szeregowo z rezystorem o odpowiednio dobranej rezystancji. Natężenie prądu wyjściowego  $I_s$  należy mierzyć za pomocą amperomierza lub miernika cęgowego prądu stałego. Pomędzy przewodami wewnętrznymi – pomiarowymi (3 – 2) wykonuje się za pomocą miliwoltomierza pomiar spadku napięcia  $U$  w rurociągu wywołany przepływem zadanego prądu skalowania  $I_s$ . W celu wyeliminowania ewentualnych spadków napięcia, które mogą zakłócać pomiar, np. pochodzących od innych prądów płynących rurociągiem, źródło prądu skalowania należy cyklicznie wyłączać i załączać. Przewodność wzdłużną odcinka pomiaru spadku napięcia w rurociągu wyznacza się ze wzoru:

$$c = \frac{I_s}{U_{\text{on}} - U_{\text{off}}} \quad (7)$$

gdzie:

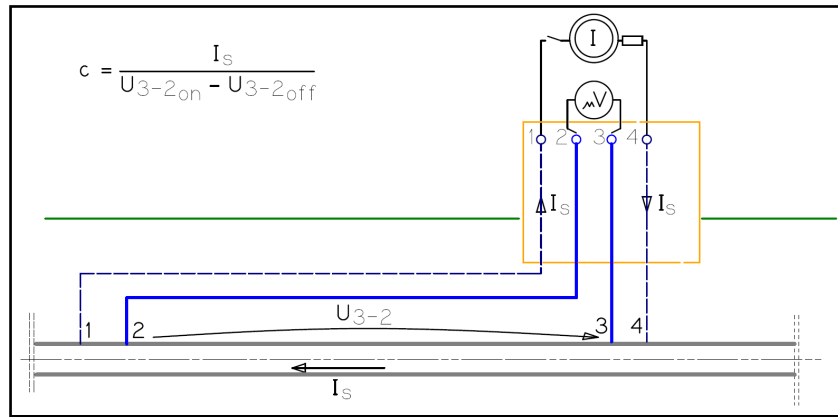
$c$  – przewodność odcinka pomiarowego rurociągu,

$I_s$  – natężenie prądu probierczego skalowania,

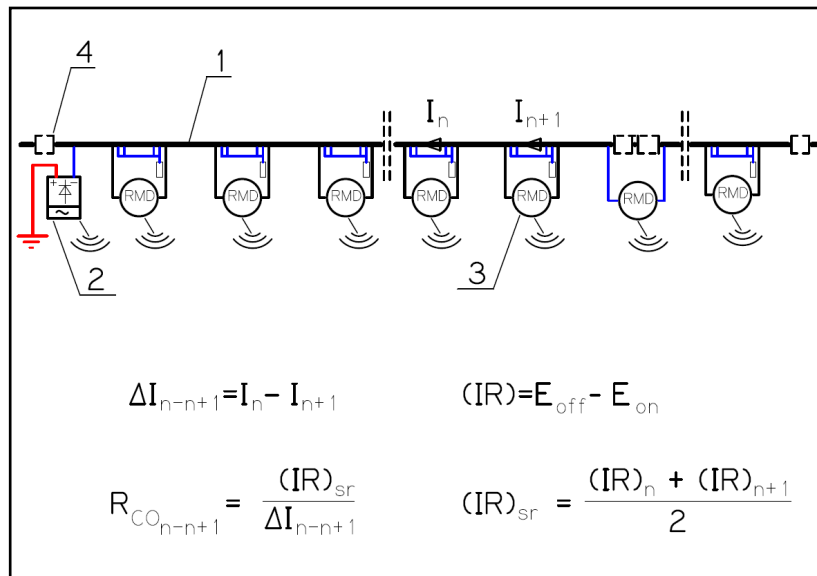
$U_{\text{on}}$  – spadek napięcia w rurociągu mierzony pomiędzy punktami 3 i 2 przy załączonym prądzie skalowania,

$U_{\text{off}}$  – spadek napięcia w rurociągu mierzony pomiędzy punktami 3 i 2 po wyłączeniu prądu skalowania.

Rezystancje przejścia pododcinków można wyznaczać na podstawie pomiarów terenowych lub, jeśli źródła prądu i punkty pomiarowe są odpowiednio wyposażone – na podstawie pomiarów zdalnych. Ideę wyznaczania rezystancji przejścia pododcinka rurociągu pomiędzy punktami  $n$  i  $n+1$  przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Skalowanie punktu prądowego PIs. Objasnienia – w tekście



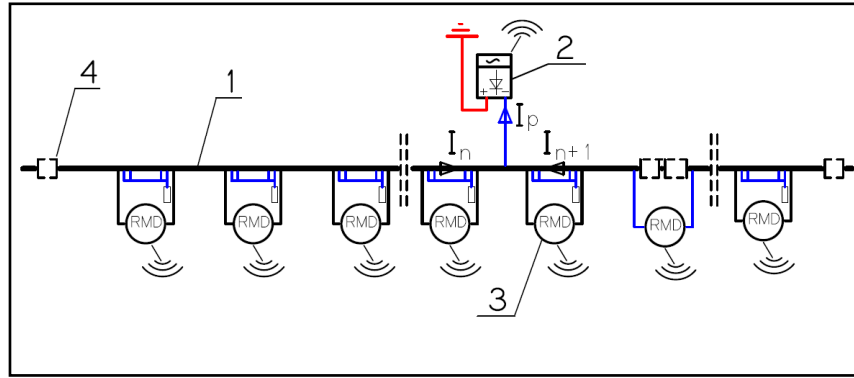
Rys. 3. Idea zdalnych pomiarów rezystancji przejścia odcinków rurociągu wyznaczonych przez punkty PIsE; 1 – rurociąg, 2 – źródło prądu polaryzacji zdalnie sterowane, 3 – punkty PIsE z urządzeniami zdalnych pomiarów spadków napięcia w rurociągu, 4 – złącza izolujące

Pobór prądu  $\Delta I_{n-n+1}$  przez pododcinek  $n \div n+1$  (rys. 2) określa się z zależności:

$$\Delta I_{n-n+1} = I_n - I_{n+1} \quad (8)$$

Jeśli źródło prądu polaryzacji  $I_p$  rurociągu przyłączone byłoby pomiędzy punktami  $n$  i  $n+1$  (rys. 4), to pobór prądu  $\Delta I_{n-n+1}$  przez pododcinek  $n \div n+1$  określałaby zależność:

$$\Delta I_{n-n+1} = I_p - (I_n + I_{n+1}) \quad (9)$$



Rys. 4. Źródło prądu polaryzacji katodowej rurociągu przyłączone pomiędzy punktami PIsE  $n$  i  $n+1$ ; 1 – rurociąg, 2 – źródło prądu polaryzacji zdalnie sterowane, 3 – punkty PIsE z urządzeniami zdalnych pomiarów spadków napięcia w rurociągu, 4 – złącza izolujące

Rezystancję powłoki (przejścia)  $R_{CO_{n+n+1}}$  pododcinka rurociągu pomiędzy punktami  $n$  i  $n+1$  wyznacza się z zależności:

$$R_{CO_{n+n+1}} = \frac{\left| (E_{on_n} - E_{off_n}) + (E_{onn+1} - E_{off_{n+1}}) \right|}{2 \times \Delta I_{n+n+1}} \quad (10)$$

gdzie:

$E_{on_i}$  – potencjał załączeniowy w punkcie pomiarowym ( $n$  lub  $n+1$ ),

$E_{off_i}$  – potencjał wyłączeniowy w punkcie pomiarowym ( $n$  lub  $n+1$ ),

$I_{n+n+1}$  – natężenie prądu polaryzacji katodowej pobieranego przez pododcinek  $n+n+1$ .

W przypadku rurociągów pokrytych powłokami izolującymi o wysokim poziomie szczelności, dla których rozkład ich potencjału załączeniowego wzdłuż długości jest ekwipotencjalny, wystarczający jest pomiar potencjałów (załączeniowego i wyłączeniowego) w jednym punkcie  $i$ . Rezystancję przejścia pododcinka rurociągu pomiędzy punktami  $n$  i  $n+1$  można wówczas wyznaczyć z zależności:

$$R_{CO_{n+n+1}} = \frac{\left| (E_{on_i} - E_{off_i}) \right|}{\Delta I_{n+n+1}} \quad (11)$$

lub:

$$R_{CO_{n+n+1}} = \frac{(IR)_{Sr}}{\Delta I_{n+n+1}} \quad (12)$$

gdzie  $(IR)_{Sr}$  jest średnią składową omową potencjału załączeniowego.

Natężenie prądu „normalnej” (roboczej) polaryzacji katodowej, płynącego w rurociągu pokrytym powłoką izolacyjną o wysokim poziomie szczelności, jest znikome. Wówczas

wykonanie pomiarów różnicowych spadków napięć, spowodowanych przez taki prąd, jest praktycznie niewykonalne. Dlatego w przypadku takich rurociągów w celu wyznaczenia rezystancji przejścia należy zastosować impulsową polaryzację probierczą znacząco zwiększonym prądem (w impulsie) o odpowiednio dobranym cyklu on/off; czas załączenia impulsu prądu powinien być minimalny, a czas wyłączenia off wielokrotnie, np. dwudziestokrotnie, dłuższy. Niezbędne jest stosowanie zwiększonego prądu w impulsie, aby spadki napięć były mierzalne i aby możliwe było określenie upływności prądu na pododcinkach rurociągu, z drugiej strony – impulsy zwiększonego prądu muszą być krótkotrwałe, aby nie spowodować szkód – degradacji stali i powłoki rurociągu.

**Przykład 1.** Odcinek rurociągu o średnicy zew.  $D_z = 0,711$  m i długości  $L = 2000$  m, wydzielony przez kolejne punkty PIs, pokryty jest powłoką 3LPE o jednostkowej, powierzchniowej rezystancji przejścia  $r_{CO} \approx 3 \times 10^{-7} \Omega m^2$ . Rezystancja przejścia takiego odcinka wynosi  $R_{CO} \approx 6715 \Omega$ . Aby „wymusić” na tym odcinku upływność prądu o natężeniu większym niż 1 mA, należy „przyłożyć” do rurociągu potencjał załączeniowy o składowej omowej (w impulsie) większej niż 6,7 V.

O dokładności i wiarygodności wyznaczenia rezystancji przejścia decyduje wiele czynników, przede wszystkim dobór odpowiednich parametrów cyklu impulsowego prądu probierczego, wykonanie prawidłowych pomiarów różnicowych spadków napięć  $U$  w rurociągu oraz składowej ( $IR$ ) podczas impulsowej polaryzacji probierczej, a także prawidłowe wyznaczenia w poszczególnych punktach przewodności (stałych skalowania)  $c$  stanowisk pomiarowych spadków napięć. Z powodu występowania różnych zakłóceń, np. nawet niewielkich prądów błądzących z odległych źródeł, płynących w rurociągu, zakłócających spadki napięć w tym rurociągu, często niezbędne jest wykonywanie w odpowiednich przedziałach czasu w poszczególnych punktach pomiarowych rejestracji mierzonych wielkości i zastosowanie obróbki statystycznej w celu wiarygodnego wyznaczenia tych parametrów.

Przewodności (stałe skalowania)  $c$  stanowisk prądowych ulegają zauważalnym, istotnym zmianom wskutek zmian temperatury rurociągów z różnych powodów. Przewodności te powinny być aktualizowane.

**Przykład 2.** Temperaturowy współczynnik rezystancji dla stali wynosi  $3,3 \times 10^{-3}/K$ . Przewodność stanowiska pomiarowego w pewnym punkcie PIs wynosi 2 mA/ $\mu V$ . Wzrost temperatur rurociągu o 5K spowoduje zmniejszenie przewodności do 1,9675 mA/ $\mu V$ .

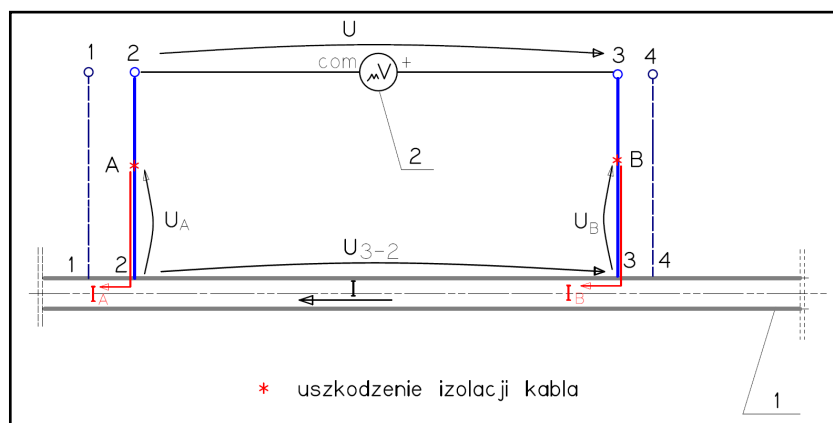
Każdy z powyższych aspektów jest złożony i mógłby być przedmiotem odrębnego opracowania.

Jednakże jeśli nawet zastosuje się właściwą technikę pomiarową, uzyskane wyniki będą niewiarygodne, jeśli punkty prądowe PIs będą niewłaściwie wykonane.

W punkcie prądowym PIs izolacja rurociągu na odcinku „objętym” tym punktem musi być szczelna. Kolejność przyłączenia poszczególnych kabli do rurociągu musi być określona i zgodna ze stanem faktycznym, a izolacja kabli, szczególnie tych „wewnętrznych”, służących do pomiarów spadków napięć, musi być bezwzględnie szczelna. Jeśli te warunki nie będą spełnione, to zmierzone różnicowe spadki napięć, a tym samym wyznaczone natężenia prądu wg zal. (5), będą błędne co do wartości bezwzględnej i/lub co do znaku (kierunku). W konsekwencji wyznaczone rezystancje przejścia pododcinków wg zal. (10) lub (12) również będą błędne.

W rezultacie może dochodzić do sytuacji, gdy np. wykonawcy rurociągu zostanie postawiony zarzut, że kryterium odbiorowe izolacji „po zasypaniu” nie jest spełnione, podczas gdy

będzie ono w rzeczywistości osiągnięte – lub odwrotnie. Albo na podstawie takich błędnych wyników zostanie dokonana ocena, że ochrona katodowa pododcinka lub całego rurociągu jest skuteczna, podczas gdy w rzeczywistości nie będzie ona spełniona, lub odwrotnie. Wpływ uszkodzeń izolacji kabli na mierzony w punkcie pomiarowym spadek napięcia przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wpływ uszkodzeń izolacji kabli na mierzony w punkcie pomiarowym spadek napięcia; 1 – rurociąg, 2 – mikrowoltomierz, I – prąd płynący w rurociągu,  $I_A$  – prąd wpływający do kabla i rurociągu uszkodzeniem izolacji A,  $I_B$  – prąd wpływający do kabla i rurociągu uszkodzeniem izolacji B

W przykładzie przedstawionym na rys. 5 napięcie elektryczne  $U$  mierzone mikrowoltomierzem pomiędzy zaciskami 3 i 2 różni się od rzeczywistego napięcia  $U_{3-2}$  w rurociągu pomiędzy punktami przyłączeń kabli 3 i 2:

$$U = U_{3-2} + U_B - U_A \quad (13)$$

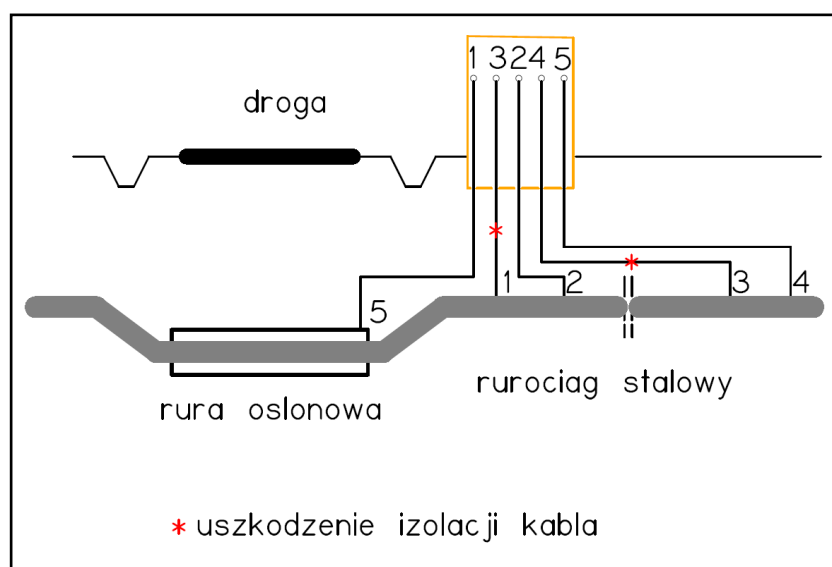
Jeśli w kablach punktu PIs występują uszkodzenia izolacji, to do kabli poprzez te uszkodzenia wpływają składowe probierczego (impulsowego) prądu polaryzacji katodowej zastosowanego w badaniach. Na rysunku 5 są to składowe  $I_A$  i  $I_B$ . Składowe te płyną kablami do rurociągu i wywołują w kablach spadki napięć  $U_A$  i  $U_B$ . Wartości spadków napięć w kablach zależą od natężenia wpływającego prądu i rezystancji kabla, czyli od rodzaju i wielkości uszkodzenia izolacji, rezystywności gruntu, zastosowanego w badaniach potencjału załączeniowego rurociągu, przekroju kabla i długości odcinka kabla pomiędzy miejscem uszkodzenia izolacji a punktem przyłączenia do rurociągu. Spadki napięć w kablach z uszkodzoną izolacją mogą być porównywalne ze spadkami napięć w rurociągu. Co prawda prądy wpływające do uszkodzonych kabli i płynące w tych kablach są mniejsze, niż prąd  $I$  płynący w rurociągu, jednakże rezystancja wzdłużna kabli jest znacząco większa, niż rezystancja odcinka pomiarowego rurociągu 3–2.

**Przykład 3.** Rezystancja kabla z żyłą miedzianą o przekroju  $4 \text{ mm}^2$  i o długości 50 m, wynosi  $178 \text{ m}\Omega$ , a rezystancja odcinka pomiarowego rurociągu może wynosić np.  $0,5 \text{ m}\Omega$ . Prąd  $I$  o natężeniu  $50 \text{ mA}$  wywoła spadek napięcia w rurociągu  $U_{3-2}$  o wartości  $25 \text{ }\mu\text{V}$ , a prąd



$I_B$  o natężeniu zaledwie  $50 \mu A$  wpływający przez uszkodzenie B wywoła spadek napięcia  $U_B$  w kablu o wartości ok.  $9 \mu V$ .

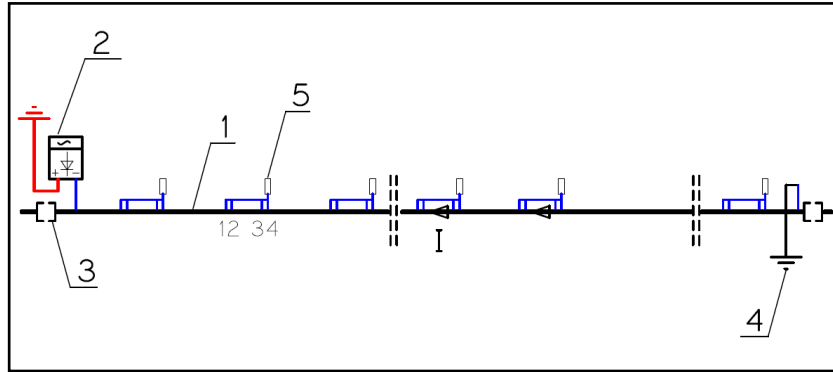
Wśród krajowych wykonawców ochrony katodowej występuje jakiś systematyczny problem z prawidłowym wykonawstwem punktów prądowych. Popełniają oni wszelkie możliwe błędy: uszkodzenia izolacji kabli, błędne oznaczenia – niegodne z rzeczywistą kolejnością kabli lub niezgodne z elementem, do którego są w rzeczywistości przyłączone (np. kabel stanowiska prądowego oznaczony jako przyłączony do rurociągu w rzeczywistości przyłączony jest do rury osłonowej lub do elektrody odniesienia), przypisywanie kabli do niewłaściwego rurociągu w sytuacji, gdy do wspólnej szafki wprowadzone są kable od kilku rurociągów i in. Autorzy w swojej praktyce nągminnie spotykają się z tego typu błędami, w tym z takimi, o których pisanie wydawałoby się jakąś aberracją – w tym popełnianymi przez personel dysponujący certyfikatami kompetencji trzeciego stopnia, zazwyczaj uzyskanymi w kraju graniczącym z Polską.



Rys. 6. Przykładowe wady wykonawcze punktu PIsR, uszkodzenia izolacji kabli i błędne oznaczenia – przykład z autopsji

Podczas budowy, po przyłączeniu kabli do rurociągu, przed zasypaniem, powinna zostać zbadana szczelność ich izolacji poroskopem wysokonapięciowym zaopatrzoną w odpowiednią oczkową elektrodę. Po montażu punktów, przed rozpoczęciem użytkowania, wszystkie zamontowane na rurociągu punkty pomiarów elektrycznych, w tym szczególnie punkty PIs, powinny zostać sprawdzone pod względem prawidłowości wykonania.

Sprawdzanie prawidłowości wykonania powinno przebiegać dwuetapowo. Najpierw powinny zostać sprawdzone oznaczenia kabli. W tym celu należy wywołać przepływ prądu w rurociągu o natężeniu co najmniej kilkuset miliamperów, natomiast potencjał załączeniowy powinien być „łagodny”, np. na poziomie około  $-1,3 V$  względem CSE. W tym celu należy na czas badań celowo uziemić rurociąg (rys. 7).



Rys. 7. Układ do sprawdzania oznaczeń kabli w punktach PIs; 1 – rurociąg, 2 - źródło prądu polaryzacji katodowej, 3 – monoblok izolujący, 4 – celowe uziemienie rurociągu, I – prąd probierczy polaryzacji katodowej płynący w rurociągu

W poszczególnych punktach PIs dokonuje się pomiarów różnicowych spadków napięć pomiędzy zaciskami w słupku/szafce pomiarowej. Sposób przyłączenia mirowoltomierza powinien być odpowiedni – biegun (+) miernika powinien być przyłączany do zacisku o spodziewanym wyższym potencjale elektrycznym, z uwzględnieniem kierunku prądu w rurociągu i hipotetycznego prawidłowego wykonania punktu. W sytuacji przedstawionej na rysunku 7 mierzy się spadki  $U_{2,1}$ ,  $U_{3,2}$ ,  $U_{4,3}$ . Jeśli oznaczenia są prawidłowe, to wszystkie zmierzone różnicowe spadki napięć będą dodatnie. Ponadto – jeśli grubość ścianki rurociągu w obrębie badanego punktu PIs jest jednakowa, to zmierzone spadki  $U_{2,1}$  i  $U_{4,3}$  będą w przybliżeniu tyle razy mniejsze od spadku  $U_{3,2}$ , ile razy długość odcinka rurociągu 3–2 jest większa od długości 2–1 (4–3).

Następnym etapem jest sprawdzanie szczelności izolacji kabli. W tym celu należy usunąć uziemienie rurociągu i uruchomić probierczą, impulsową polaryzację katodową zwiększonym (w impulsie) prądem. W sytuacji przedstawionej na rysunku 7 mierzy się spadki  $U_{2,1}$ ,  $U_{3,2}$ ,  $U_{4,3}$   $U_{4,1}$ . W przypadku prawidłowego wykonania punktu, wszystkie te zmierzone spadki napięć powinny być dodatnie oraz:

$$U_{4-1} = U_{2-1} + U_{3-2} + U_{4-3} \quad (14)$$

Jeśli te warunki nie będą spełnione, należy dodatkowo zmierzyć napięcia  $U_{3,1}$  i  $U_{4,2}$ . Analiza kierunków i wartości zmierzonych sześciu różnicowych spadków napięcia umożliwia ustalenie kabli o uszkodzonej izolacji.

**Przykład 4.** Stwierdzono prawidłowe oznaczenia kabli i zacisków w punktach PIs. Następnie przeprowadzono pomiary w celu sprawdzenia izolacji kabli. Oznaczenia zacisków i kierunek impulsowego prądu probierczego w rurociągu – jak na rys. 1 i 5. W pierwszym punkcie zmierzono następujące różnicowe spadki napięć:  $U_{2,1} = 26 \mu\text{V}$ ,  $U_{4,3} = 1 \mu\text{V}$ ,  $U_{3,2} = 0 \mu\text{V}$ ,  $U_{4,1} = 27 \mu\text{V}$ ,  $U_{3,1} = 26 \mu\text{V}$ ,  $U_{4,2} = 1 \mu\text{V}$ . Wyniki wskazują na duże uszkodzenie izolacji kabla nr 2 w pierwszym punkcie. W drugim punkcie uzyskano:  $U_{2,1} = 1 \mu\text{V}$ ,  $U_{4,3} = -1 \mu\text{V}$ ,  $U_{3,2} = 27 \mu\text{V}$ ,  $U_{4,1} = 27 \mu\text{V}$ ,  $U_{3,1} = 28 \mu\text{V}$ ,  $U_{4,2} = 26 \mu\text{V}$ . Uzyskane wyniki wskazują, że w drugim punkcie uszkodzona jest izolacja kabla nr 3.

### 3. Wyznaczanie rezystancji przejścia krótkiego odcinka rurociągu wydzielonego elektrycznie

Takie pomiary dotyczą np. krótkich odcinków rurociągów ułożonych bezwykopowo pod przeszkodami terenowymi (np. techniką przecisku), przed przyłączeniem takiego odcinka do sąsiednich. W czasie pomiarów końce badanego odcinka nie mogą stykać się z ziemią, muszą znajdować się „w powietrzu” i muszą być wysuszone, zarówno na zewnętrznej, jak i na wewnętrznej powierzchni. Możliwość połączenia elektrolitycznego odsłoniętego końca ze środowiskiem elektrolitycznym powinna być wyeliminowana.

Innym przykładem krótkiego odcinka rurociągu wydzielonego elektrycznie może być odcinek, na którego końcach zamontowano monobloki izolujące. Sekcjonowanie rurociągu złączami izolującymi i zapewnienie szczelnej (bezdefektowej) powłoki izolacyjnej jest jednym ze sposobów zabezpieczenia rurociągu przed zagrożeniem korozją a.c., wywoływanym przez oddziaływanie napowietrznych linii WN.

W praktyce długości wydzielonych elektrycznie odcinków rurociągów, poddawanych pomiarom rezystancji przejścia, wynoszą od kilkunastu do kilku tysięcy metrów.

Rezystancję przejścia  $R_{CO}$  krótkiego, wydzielonego elektrycznie odcinka rurociągu wyznaczaną metodą polaryzacji katodowej określa się z zał. (15):

$$R_{CO} = \frac{(E_{on} - E_{off})}{I} \quad (15)$$

gdzie:

$E_{on}$  – potencjał załączeniowy w dowolnym punkcie odcinka,

$E_{off}$  – potencjał wyłączeniowy w dowolnym punkcie odcinka,

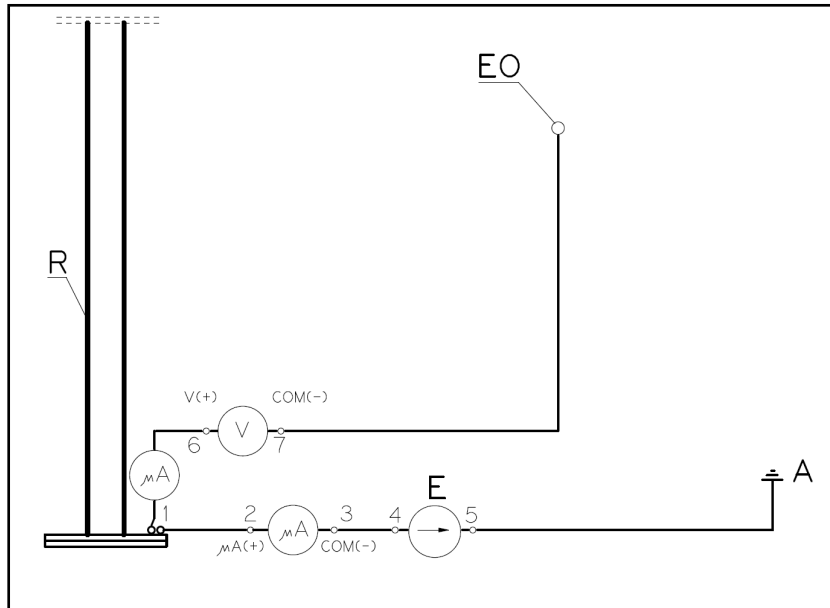
$I$  – natężenie prądu polaryzacji katodowej pobieranego przez badany odcinek.

Standardowa metoda polaryzacji katodowej w ogólności dotyczy odcinków, których powłoki zawierają defekty. Jednakże nie jest ona odpowiednia w każdym przypadku.

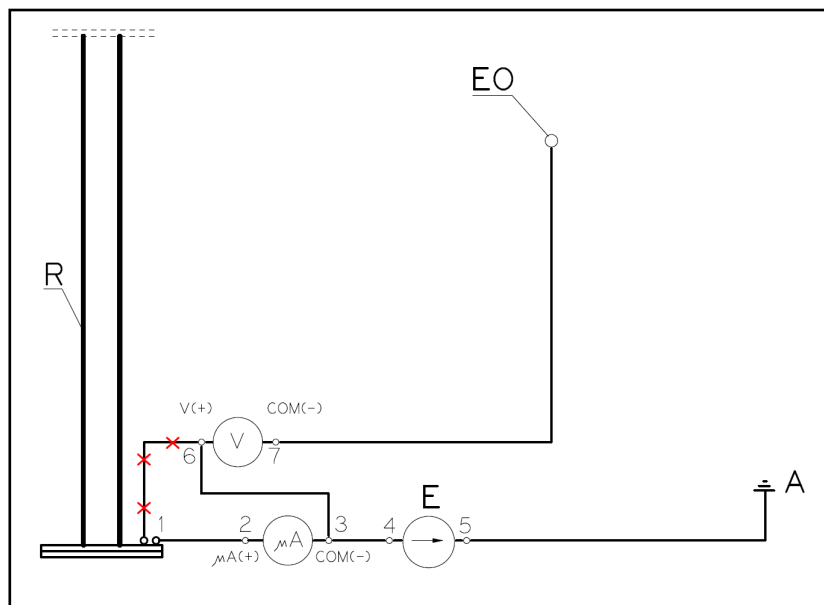
Rezystancje przejścia krótkich odcinków rurociągów, nawet tych pokrytych powłokami izolacyjnymi z defektami, są duże, rzędu  $k\Omega$ , a nawet  $M\Omega$ , z powodu niewielkich powierzchni bocznych.

**Przykład 5.** Odcinek rurociągu o średnicyzew.  $Dz = 0,2191$  m i długości  $L = 50$  m pokryty jest powłoką 3LPE o jednostkowej, powierzchniowej rezystancji przejścia  $r_{CO} = 5 \times 10^7 \Omega m^2$ . Rezystancja przejścia takiego odcinka wynosi  $R_{CO} \approx 1,45 M\Omega$ .

Z tego powodu w pomiarach metodą polaryzacji katodowej należy stosować mierniki potencjału o ponad standardowych rezystancjach wejściowych, około  $100 M\Omega$ . W przypadku stosowania standardowych mierników o rezystancjach wejściowych na poziomie  $10 M\Omega$ , należy zmierzyć natężenie prądu pobieranego przez gałąź elektrody odniesienia i dokonać korekty natężenia prądu polaryzacji (rys. 8), lub zastosować odpowiedni układ pomiarowy z prawidłowo mierzonym natężeniem prądu (rys. 9). Bywają sytuacje (badane rurociągi), gdzie natężenia prądów pobieranych przez gałęzie elektrod odniesienia, ze standardowymi woltomierzami, są większe, niż natężenia prądów polaryzacji.



Rys. 8. Pomiar natężenia prądu pobieranego przez gałąź elektrody odniesienia w celu skorygowania natężenia prądu polaryzacji wydzielonego odcinka rurociągu



Rys. 9. układ z poprawnym pomiarem natężenia prądu polaryzacji wydzielonego odcinka rurociągu; R – badany odcinek rurociągu, EO – elektroda odniesienia ustawiona na ziemi odniesienia, A – próbny uziom anodowy

Kolejnym aspektem jest sprawa pojemności elektrycznej badanego odcinka rurociągu. Podziemne rurociągi pokryte powłokami o wysokim poziomie szczelności, zarówno krótkie, jak i długie, są swego rodzaju rzeczywistymi kondensatorami cylindrycznymi – w uproszczeniu stanowią równoległe połączenie pojemności  $C$  i rezystancji  $R_{CO}$ , która to rezystancja jest wypadkową rezystancją równoległego połączenia rezystancji powłoki bez defektów i rezystancji uziemienia defektów (patrz zał. 1). Występowanie pojemności elektrycznej utrudnia lub wręcz uniemożliwia wykonanie standardowych pomiarów potencjału wyłączeniowego.

**Przykład 6.** Odcinek rurociągu o średnicy zew.  $D_z = 0,711$  m i długości  $L = 100$  m pokryty jest nieszczelną powłoką 3LPE o grubości  $d = 0,003$  m i o jednostkowej, powierzchniowej rezystancji przejścia  $r_{CO} = 5 \times 10^7 \Omega m^2$ . Rezystancja przejścia takiego odcinka wynosi  $R_{CO} = 224$  k $\Omega$ , a pojemność elektryczna  $C \approx 14,8 \times 10^{-7}$  F. Stała czasowa układu  $T = R_{CO} \times C$  wynosi ok. 0,33 sek. Kondensator, po wyłączeniu prądu polaryzacji, będzie rozładowywał się w czasie dłuższym, niż  $4,605T$ , a więc przez okres czasu co najmniej 1,5 sek.

Jeśli w przypadku rurociągu opisanego w przykładzie 6 jego jednostkowa rezystancja przejścia byłaby na poziomie  $10^8 \Omega m^2$ , np.  $5 \times 10^8 \Omega m^2$ , to kondensator, jakim jest rurociąg pokryty taką powłoką, rozładowywałby się przez okres czasu co najmniej 15 sek. Standardowe pomiary potencjału wyłączeniowego w takim przypadku są niemożliwe do wykonania.

**Przykład 7.** Wykonawca wyznaczał rezystancję przejścia odcinka rurociągu o średnicy zew.  $D_z = 0,711$  m i długości  $L = 35$  m metodą polaryzacji katodowej. W protokole z pomiarów wyspecyfikował następujące wyniki:  $I_p = 10 \mu A$ ,  $E_{on} = -12,84$  V,  $E_{off} = -9,71$  V i obliczył rezystancję przejścia  $R_{CO} = 0,313$  M $\Omega$ . Wykazany potencjał wyłączeniowy o wartości  $-9,71$  V jest błędny, a rzeczywista rezystancja przejścia jest zdecydowanie większa – wynosi ok. 1,16 M $\Omega$ , a jednostkowa rezystancja przejścia  $r_{CO} \approx 9,1 \times 10^7 \Omega m^2$ .

W przypadku wydzielonych, krótkich odcinków rurociągów, pokrytych powłokami o najwyższych stopniach szczelności (bezdefektowymi), celowe jest stosowanie w celu zmierzenia rezystancji przejścia - mierników izolacji o małych napięciach pomiarowych i odpowiednich zakresach rezystancji.

W badaniach rezystancji przejścia krótkich, wydzielonych elektrycznie odcinków rurociągów, zaleca się najpierw dokonać pomiaru swobodnego potencjału korozyjnego. Jeśli powłoka izolacyjna będzie szczelna, to zmierzony potencjał będzie w przybliżeniu zerowy. Następnie powinna zostać wstępnie oszacowana rezystancja przejścia w wyniku „łagodnej” polaryzacji, do potencjału załączeniowego np. ok.  $-1,3$  V wzgl. CSE. Stosownie do wyników – w dalszym kroku należy zastosować odpowiednią metodę pomiaru rezystancji przejścia.

#### 4. Wnioski

1. Wyniki pomiarów rezystancji przejścia dostarczają cennych informacji dotyczących stanu ochrony przeciwkorozyjnej podziemnych metalowych rurociągów i ich odcinków.
2. W pomiarach rezystancji przejścia należy dobrać odpowiednią metodę pomiarową. Przy wyborze metody wyznaczania rezystancji przejścia rurociągu lub jego odcinków należy uwzględnić m.in. rodzaj i jakość powłoki izolacyjnej oraz powierzchnię boczną badanego odcinka/rurociągu. Należy brać pod uwagę ewentualny wpływ pojemności elektrycznej kondensatora, jakim jest izolowany rurociąg podziemny.
3. Wady wykonawcze oraz inne usterki punktów pomiarowych wyposażonych w stanowiska pomiaru natężenia prądu mogą znacząco fałszować wyniki pomiarów rezystancji przejścia odcinków rurociągu. W celu uniknięcia błędów należy bezwzględnie sprawdzać

za pomocą odpowiednich metod pomiarowych poprawność wykonania punktów nowo wybudowanych oraz sprawdzać stan punktów istniejących.

4. Przewodności stanowisk prądowych w punktach PIs powinny być weryfikowane.

### **Literatura**

- [1] Fiedorowicz M., Jagiełło M., Ochrona przed Korozją, **44**, 12 (2001) 329 cz. I, **45**, 2 (2002) 35 cz. II.
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie.