

POMIAR PRĄDU w ocenie powłoki rurociągu

Słowa kluczowe:

ochrona przed korozją, powłoki rurociągów, elektryczne cechy powłoki, gęstość prądu, rezystancja powłoki, konduktancja powłoki

Streszczenie

Synchroniczny pomiar potencjałów i prądów w stacjach pomiarowych rurociągu umożliwia ocenę jakości powłoki izolacyjnej. Podano zasady wyznaczania rezystancji boczników rurociągowych i teoretyczne podstawy obliczeń gęstości prądu powłoki, rezystancji i konduktancji powłoki.

Artykuł pod tym tytułem został zamieszczony w czasopiśmie Ochrona przed Korozją (nr 8/2009). Niniejszy tekst zawiera ten materiał z niewielkimi zmianami.

Spis treści

Kryteria oceny	2
Metody pomiaru	2
Bocznik rurociągowy	4
Pomiar prądu	8
Izolacja rurociągu	10
Rezystancja rozplywu	12
Pomiar potencjałów	13
Gęstość prądu	14
Rezystancja powłoki	15
Konduktancja powłoki	16
Załączniki:	
Tabl. 1. Jednostkowa rezystancja wzdłużna rur wykonanych z różnych stali	19
Tabl. 2. Parametry rur: średnica, grubość ścianki, masa jednostkowa, rezystancja jednostkowa, konduktancja jednostkowa, powierzchnia boczna jednostkowa	20

Kryteria oceny

O jakości powłoki rurociągu świadczą jej własności dielektryczne. Materiał powłoki zawsze zawiera pory, przez które przenika prąd elektryczny. Im pory są większe, im jest ich więcej, jednym słowem – im większa *porowatość*, tym gorsza izolacja, większy wydatek prądu ochrony katodowej i więcej stacji ochrony musi antykorozyjnie zabezpieczać rurociąg. Ocena jakości powłoki jest sprawą ważną i powinna być oparta na obiektywnych kryteriach pomiarowych.

Zaizolowany rurociąg poddaje się przed zasypaniem próbie napięciowej za pomocą *poroskopu*. Jest to przyrząd wyposażony w elektrodę w postaci miedzianej obejmującej szczelnie otaczającej zewnętrzny obwód izolowanej rury. Generator napięcia wytwarzający impulsy o nastawnej wartości, dobieranej do izolacji badanego rurociągu zasila elektrodę, która podczas próby napięciowej jest przeciągana wzdłuż rurociągu. W punktach niedostatecznie izolowanych następuje wyładowanie elektryczne pomiędzy elektrodą a uziemionym rurociągiem. Kryterium oceny izolacji przed zasypaniem rurociągu stanowi wartość napięcia przebiccia i liczba przebić. Miejsca ewentualnych przebić świadczące o uszkodzeniu powłoki powinny być naprawione.

Po ułożeniu w gruncie izolacja rurociągu ulega pogorszeniu wskutek naturalnego starzenia i z powodu przypadkowych uszkodzeń mechanicznych, powinna więc być nadal kontrolowana. Rurociąg jest już wówczas niedostępny i napięciowe badanie poroskopem nie jest możliwe. Dlatego wtedy kontroluje się izolację inaczej, mierząc prąd na początku i końcu sąsiednich odcinków rurociągu. Różnica zmierzonych wartości wskazuje, ile prądu płynie skroś izolacji powłoki. Pozwala to określić gęstość prądu, a także – mierząc jednocześnie potencjał – jednostkową rezystancję lub jednostkową *konduktancję* (przewodność, upływność) powłoki, i porównać z wartościami wymaganymi. Ta procedura do niedawna natrafiała na poważną trudność, gdyż pomiar bardzo małych wartości prądu wymaga zastosowania przyrządu pomiarowego o niezwykle wysokiej rozdzielczości. Warunek ten spełnia dwukanałowy rejestrator *mRA* produkcji firmy L.INSTRUMENTS, który umożliwia wykonywanie synchronicznych pomiarów prądu i potencjału.

Metody pomiaru

Każdy pomiar prądu polega na odczycie amperomierza włączonego w obwód elektryczny, jednak *bezpośrednio* włączenie amperomierza w rurociąg jest możliwe tylko wyjątkowo, gdy jego nitka jest rozłączona lub gdy wbudowane w rurociąg złącze izolujące jest zwierane przez przewód obejściowy.

Przeważnie więc prąd w rurociągu mierzy się metodą *pośrednią*. Polega ona na pomiarze spadku napięcia ΔU wywołanego przepływem mierzonego prądu I przez zainstalowany w obwodzie boczny o stałej rezystancji R :

$$(1) \quad I = \frac{\Delta U}{R}$$

gdzie:

ΔU – spadek napięcia na boczniku [V],

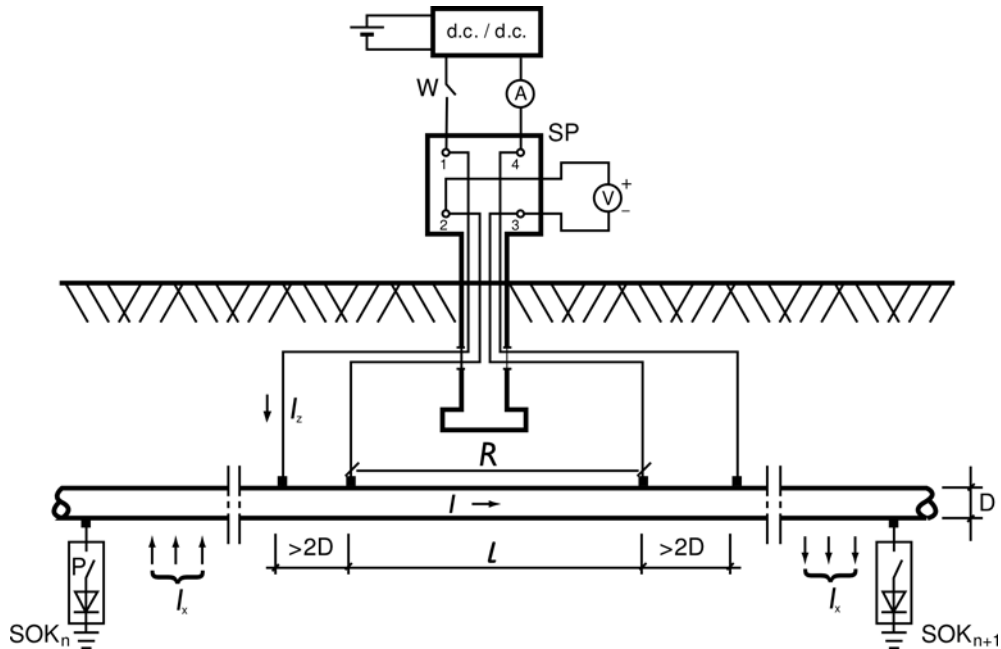
R – rezystancja bocznika [Ω],

I – prąd płynący przez boczny [A].

Wartość prądu oblicza się wg (1) dzieląc wartość zmierzonego spadku napięcia ΔU przez znaną wartość rezystancji bocznika. Rejestrator *mRA* umożliwia odczyt prądu od razu w amperach. Wystarczy w tym celu wprowadzić stałą bocznika.

Aby mierzyć prąd w rurociągu należy jego część w postaci odpowiednio skalibrowanego odcinka wyodrębnić jako *boczny rurociągowy* (rys. 1). Taki boczny umożliwia obserwację wartości i zwrotu prądu ochrony w miejscach przyłączenia stacji ochrony katodowej (SOK).

Boczniki instalowane w rurociągach przy stacjach pomiarowych (SP) umożliwiają również ocenę jakości powłok. Ze względu na nakład pracy i kosztów odsłonięcia rury i zainstalowania elektrycznych końcówek przyłączeniowych usytuowanie bocznika rurociągowego powinno być dobrze przemyślane.



Rys. 1 Wyznaczenie rezystancji bocznika rurociągowego

SP – stacja pomiarowa; oznaczenia zacisków przykładowe

A – amperomierz precyzyjnie mierzący prąd z dodatkowego źródła zasilania

V – kanał A rejestratora *mRA* użyty do pomiaru spadku napięcia na nieznannej rezystancji *R* bocznika rurociągowego

W – wyłącznik, zamknięty $I = I_{on}$

otwarty $I = I_{off}$

OK_{n, n+1} – stacje ochrony katodowej nr *n*, *n+1*

D – średnica rurociągu

l – długość bocznika

I – prąd płynący w rurociągu

I_{on} – prąd załączeniowy, $I_{on} = I_x + I_z$

I_{off} – prąd wyłączeniowy, $I_{off} = I_x$

I_z – prąd z dodatkowego źródła zasilania

I_x – suma nieznanych prądów generowanych przez obce źródła

R – rezystancja bocznika rurociągowego

Bocznik rurowy

Aby zmierzyć prąd zgodnie z wzorem (1) należy znać rezystancję R bocznika:

$$(2) \quad R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

Ze wzoru (1) wynika, że pośredni pomiar prądu jest tym dokładniejszy, im spadek napięcia ΔU równy iloczynowi $I \cdot R$ jest większy. Spośród dwóch czynników tego iloczynu wartość prądu I nie zależy od mierzonego, a więc należy starać się by odpowiednio duży był drugi czynnik – rezystancja R . Z praktyki wiadomo¹, że powinno być:

$$R > 500 \mu\Omega$$

Można to osiągnąć tylko przez odpowiedni dobór długości przewidzianej na ten cel części rurowej, ponieważ wykonawca pomiaru nie ma wpływu ani na wartość rezystywności ρ stali z której jest wykonana rura, ani na jej przekrój S wynikający ze średnicy i grubości ścianki:

$$(3) \quad S = \pi \cdot g_s (D - g_s)$$

$$(4) \quad R = \frac{\rho}{\pi \cdot g_s (D - g_s)} \cdot l$$

$$(5) \quad R' = \frac{\rho}{\pi \cdot g_s (D - g_s)}$$

gdzie:

R – rezystancja bocznika [Ω],

ρ – rezystywność stali [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$],

l – długość [m],

S – przekrój [mm^2].

g_s – grubość ścianki rury [mm],

D – średnica zewnętrzna rury [mm].

R' – rezystancja jednostkowa 1 m rury [Ω/m],

Długość bocznika rurowego można więc wyznaczyć jako:

$$(6) \quad l = \frac{R}{R'}$$

Obliczając rezystancję jednostkową R' należy zwrócić uwagę, że występująca we wzorze (5) rezystywność ρ stali znacznie różni się od rezystywności żelaza. Można ją znaleźć w literaturze², ale zamiast posługiwać się wzorem (5) wygodniej korzystać z tablic (p. Załącznik) zawierających dane rur o różnych średnicach i różnych gatunków stali, gdzie zwykle podaje się wartości jednostkowej rezystancji R' .

W praktyce, w zależności od średnicy rury, długość bocznika rurowego może wynosić nawet do 100 metrów.

¹ CEOCOR *Pomiary w ochronie katodowej przed korozją. Poradnik*, rozdz. 3.1, s.71.

² *Ibidem*, s.70.

Przykład:

Rurę DN700 ze stali St34 o ściance grubości 7.1 mm charakteryzuje rezystancja jednostkowa $R' = 10.83 \mu\Omega/\text{m}$ (p. Załącznik, tabl. 1). Aby spełniony był warunek $R > 500 \mu\Omega$, długość bocznika powinna być co najmniej równa

$$l = \frac{R}{R'} = 46\text{m}.$$

Przy odległości między końcówkami większej od minimalnej, np. $l = 60 \text{ m}$, rezystancja bocznika wyniesie:

$$R = R' \cdot l = 10.83 \mu\Omega/\text{m} \cdot 60\text{m} = 650 \mu\Omega > 500 \mu\Omega$$

Prąd I w rurociągu rzędu 500 mA spowoduje spadek napięcia na boczniku:

$$\Delta U = I \cdot R = 500\text{mA} \cdot 650 \mu\Omega = 325 \mu\text{V}$$

Należy zwrócić uwagę, że podawane w tablicach *średnie* wartości rezystancji jednostkowej R' często odbiegają od *rzeczywistej* wartości rezystancji wybranego odcinka rury, który ma pełnić rolę bocznika rurociągowego. Ponadto rzeczywista długość bocznika l może się znacznie różnić od wstępnie ustalonej, ponieważ trudno ją ściśle odmierzyć. Dlatego bocznik należy *skalibrować*, to znaczy drogą pomiaru wyznaczyć dokładną wartość jego rezystancji. Polega to na przepuszczeniu przez bocznik prądu I_z o znanej, określonej z dużą precyzją wartości i jednocześnie dokładnym pomiarze spadku napięcia ΔU . Zgodnie z prawem Ohma rezystancja bocznika:

$$(7) \quad R = \frac{\Delta U}{I_z}$$

gdzie:

ΔU – spadek napięcia na końcówkach pomiarowych bocznika [V],

I_z – prąd z dodatkowego źródła zasilania [A],

R – rezystancja bocznika [Ω].

Uwaga. Jako końcówkę rozumie się tu wgrzany, wstrzelony lub wspanawany w metal rury element, izolowany od środowiska nie gorzej niż rura, który umożliwia dołączenie przewodu elektrycznego.

Przepływ prądu I_z przez bocznik (rys. 1) można wymusić dołączając obwód zasilający przez dodatkowe końcówki zainstalowane „na zewnątrz” końcówek pomiarowych. Aby rozptył prądu zasilającego I_z w boczniku był równomierny odległość między końcówką zasilającą i pomiarową powinna być co najmniej równa dwukrotnej średnicy rurociągu. Przewody pomiarowe i przewody obwodu zasilającego przyłączone do tabliczki zaciskowej powinny stanowić część trwałej instalacji stacji pomiarowej SP. Zgodnie z normą³ przekrój przewodów powinien wynosić nie mniej niż $2.5 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$.

W czasie pomiaru należy wyłączyć wszystkie stacje ochrony katodowej. Mimo to w rurociągu może nadal płynąć nieznaną prąd I_x wskutek oddziaływania obcych źródeł napięcia, które generują prądy wyrównawcze, prądy makroogniw i prądy błędzące⁴. Z tego powodu w pierwszej kolejności należy wyznaczyć spadek napięcia między zaciskami bocznika (2) – (3).

³ PN-EN 12954:2006. *Ochrona katodowa konstrukcji metalowych w gruntach lub w wodach. Zasady ogólne i zastosowania dotyczące rurociągów*, rozdz. 7.11.3.

⁴ PN-EN 13509 *Metody pomiarowe w ochronie katodowej*, tabl.1.

Po załączeniu obwodu pomocniczego wyłącznikiem **W** przez bocznic rurociągowy popłynie prąd załączeniowy

$$(8) \quad I_{\text{on}} = I_x + I_z,$$

a spadek napięcia na boczniku wyniesie ΔU_{on} . Rezystancja bocznika jest:

$$(9) \quad R = \frac{\Delta U_{\text{on}}}{I_{\text{on}}} = \frac{\Delta U_{\text{on}}}{I_x + I_z}$$

Po wyłączeniu wyłącznikiem **W** prądu I_z przez bocznic popłynie prąd wyłączeniowy $I_{\text{off}} = I_x$, który spowoduje spadek napięcia na boczniku równy ΔU_{off} :

$$(10) \quad R = \frac{\Delta U_{\text{off}}}{I_{\text{off}}} = \frac{\Delta U_{\text{off}}}{I_x}$$

gdzie:

I_{on} – prąd załączeniowy,

I_{off} – prąd wyłączeniowy,

I_x – suma nieznanych prądów generowanych przez obce źródła,

I_z – prąd z dodatkowego źródła zasilania,

ΔU_{on} – spadek napięcia pod wpływem prądu załączeniowego I_{on} ,

ΔU_{off} – spadek napięcia pod wpływem prądu wyłączeniowego I_{off} ,

R – rezystancja bocznika.

Jeżeli przewody zostały włączone w obwód zgodnie z kierunkiem przepływu prądu (jak na rys. 1), to rejestrator wskaże dodatnią wartość prądu; jeśli przeciwnie – ujemną.

W obszarze, w którym nie występują prądy błądzące⁵, prąd I_x nie zmienia się, a spadki napięcia ΔU_{on} i ΔU_{off} są mierzone przy tej samej wartości prądu I_x . Rezystancja bocznika jest stała, zatem

$$(11) \quad \frac{\Delta U_{\text{on}}}{I_x + I_z} = \frac{\Delta U_{\text{off}}}{I_x}$$

$$(12) \quad I_x = \frac{\Delta U_{\text{off}} \cdot I_z}{\Delta U_{\text{on}} - \Delta U_{\text{off}}}$$

Po podstawieniu I_x do (10) rezystancja bocznika

$$(13) \quad R = \frac{\Delta U_{\text{off}} (\Delta U_{\text{on}} - \Delta U_{\text{off}})}{\Delta U_{\text{off}} \cdot I_z}$$

$$(14) \quad R = \frac{\Delta U_{\text{on}} - \Delta U_{\text{off}}}{I_z}$$

Jeśli rurociąg leży w strefie oddziaływania prądów błądzących o zmiennej wartości, to spadki napięcia ΔU_{on} i ΔU_{off} mogą zostać zmierzone przy różnych wartościach prądu I_x

⁵ Rozpoznanie prądów błądzących patrz PN-EN 50162:2006. *Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błądzące z układów prądu stałego*, rozdz. 5.1.

i równanie (11) nie będzie spełnione. W takim przypadku pomiary należy wykonać, gdy prądy błądzące nie występują, np. w przypadku prądów pochodzenia trakcyjnego w czasie przerwy w ruchu pociągów w nocy.

Różnica spadków napięcia ON/OFF jest zazwyczaj bardzo mała. Z tego powodu należy określić błąd kalibracji bocznika. Norma⁶ wymaga aby błąd względny pomiaru prądu nie przekraczał 2.5%.

Na podstawie (14) błąd względny δR :

$$(15) \quad \delta R = \delta(\Delta U_{\text{on}} - \Delta U_{\text{off}}) + \delta I_z = \frac{\Delta(\Delta U_{\text{on}}) + \Delta(\Delta U_{\text{off}})}{\Delta U_{\text{on}} - \Delta U_{\text{off}}} \cdot 100\% + \delta I_z$$

Błąd bezwzględny ΔR :

$$(16) \quad \Delta R = \frac{\delta R \cdot R}{100\%}$$

Na podstawie (12) błąd względny δI_x :

$$(17) \quad \delta I_x = \delta(\Delta U_{\text{off}}) + \delta I_z + \delta(\Delta U_{\text{on}} - \Delta U_{\text{off}}) = \delta(\Delta U_{\text{off}}) + \delta I_z + \frac{\Delta(\Delta U_{\text{on}}) + \Delta(\Delta U_{\text{off}})}{\Delta U_{\text{on}} - \Delta U_{\text{off}}} \cdot 100\%$$

Błąd względny powinien być mniejszy od wymaganego przez normę:

$$(18) \quad \delta I_x < 2.5 \%$$

Błąd bezwzględny:

$$(19) \quad \Delta I_x = \frac{\delta I_x \cdot I_x}{100\%}$$

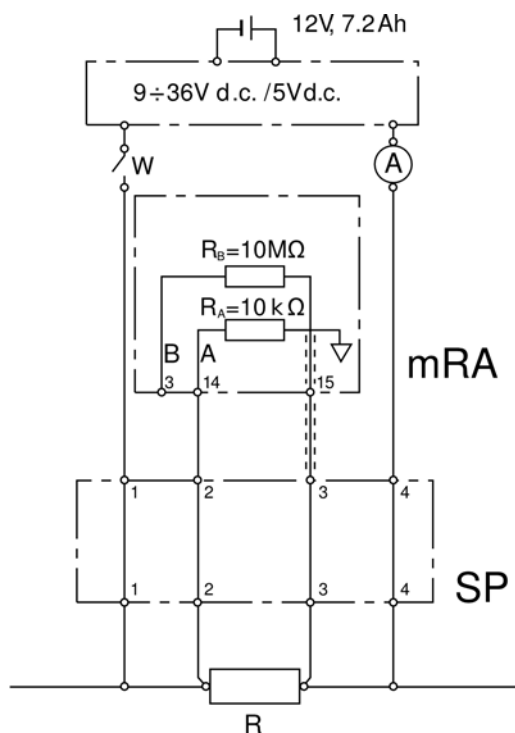
gdzie:

- Δ – błąd bezwzględny,
- $\Delta(\Delta U)$ – błąd bezwzględny pomiaru spadku napięcia ΔU [V],
- ΔI – błąd bezwzględny pomiaru prądu I [A],
- ΔR – błąd bezwzględny obliczeniowy rezystancji bocznika [Ω],
- δ – błąd względny,
- $\delta(\Delta U)$ – względny błąd pomiaru spadku napięcia ΔU [V],
- δI – względny błąd pomiaru prądu I [%],
- δR – względny błąd obliczeniowy rezystancji bocznika [%].

Przez bocznik należy kilkakrotnie przepuścić prąd zasilacza I_z o różnych wartościach, jednocześnie mierząc spadek napięcia ΔU_{on} . Po każdym pomiarze spadku napięcia ΔU_{on} należy wyłączyć obwód zasilający i zmierzyć spadek napięcia ΔU_{off} . Rezystancję bocznika można obliczyć na podstawie (14).

Schemat układu do pomiaru rezystancji R bocznika za pomocą rejestratora **mRA** przedstawia rys. 2. W obwodzie zasilającym wygodnie jest zastosować źródło prądowe o prądzie wyjściowym nastawnym z odpowiednio dużą precyzją.

⁶ PN-EN 13509, zał. I.



Rys. 2 Schemat połączeń układu do pomiaru rezystancji bocznika rurociągowego (dane źródła napięcia przykładowe)

SP – stacja pomiarowa; oznaczenia zacisków przykładowe

A – kanał A rejestratora *mRA* użyty do pomiaru prądu płynącego przez bocznik rurociągowy o znanej rezystancji *R*

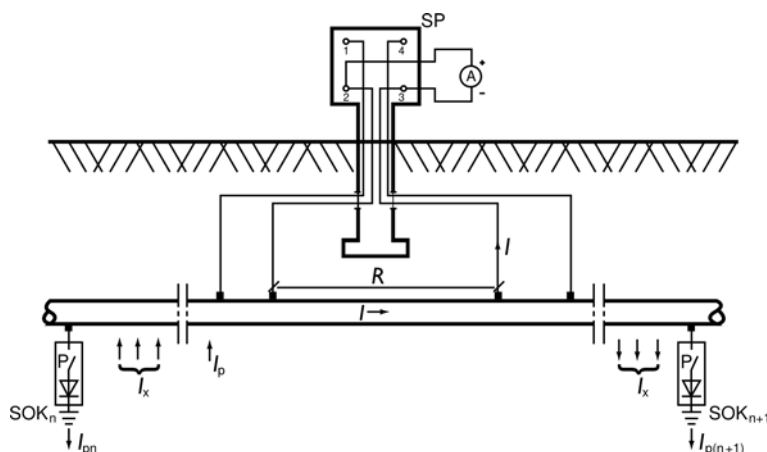
mRA – rejestrator firmy L.INSTRUMENTS (czynny kanał pomiarowy A)

W – wyłącznik

R – bocznik rurociągowy

Pomiar prądu

Po wykonaniu bocznika rurociągowego można już mierzyć płynący w nim prąd. W tym celu na czas pomiaru należy we wszystkich zasilających badany rurociąg stacjach ochrony katodowej SOK uruchomić synchronicznie taktujące przerywacze **P** prądu ochrony I_p .



Rys. 3 Pomiar prądu w boczniku rurociągowym

SP – stacja pomiarowa; oznaczenia zacisków przykładowe

SOK_{n, n+1} – stacja ochrony katodowej nr **n, n+1**

A – amperomierz

P – przerywacz taktujący

Uwaga. Dla uniknięcia nadmiernej depolaryzacji rurociągu przerywacze powinny być tak nastawione, aby prąd załączeniowy płynął przynajmniej przez 75 % czasu cyklu przerywania.

Działanie przerywaczy umożliwia określenie wartości i zwrotu pochodzącego od obcych źródeł prądu I_x i prądu ochrony I_p . Jednoczesne załączenie wszystkich współpracujących przerywaczy powoduje przepływ przez rurociąg i bocznik prądu załączeniowego I_{on} :

$$(20) \quad I_{on} = I_p + I_x$$

Jednoczesne wyłączenie przerywaczy powoduje przerwę w przepływie prądu ochrony:

$$I_p = 0$$

Przez rurociąg i bocznik płynie tylko prąd wyłączeniowy I_{off} :

$$(21) \quad I_{off} = I_x$$

gdzie:

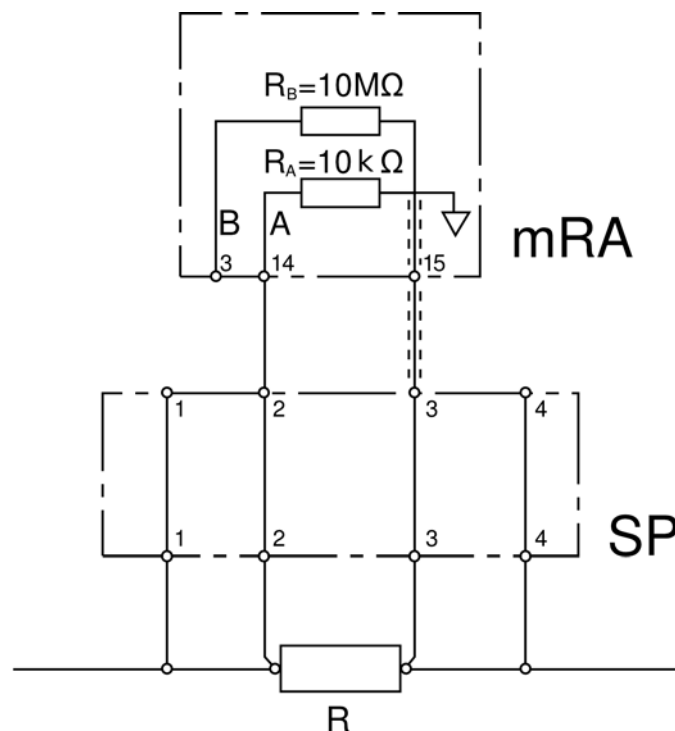
I_p – prąd ochrony [A],

I_x – suma nieznanymi prądów generowanych przez obce źródła [A],

I_{on} – prąd załączeniowy [A],

I_{off} – prąd wyłączeniowy [A].

Rejestrator **mRA** w obwodzie bocznika rurociągowego na stacji pomiarowej SP mierzy spadek napięcia ΔU na boczniku. Po wpisaniu w nim wyznaczonej podczas kalibracji rezystancji R bocznika można na wyświetlaczu od razu odczytać wartość prądu I . Schemat połączeń podano na rys. 4.



Rys. 4 Schemat połączeń układu pomiaru prądu w boczniku rurociągowym. Po wpisaniu wartości rezystancji R bocznika można odczytać prąd w amperach

SP – stacja pomiarowa; oznaczenia zacisków przykładowe
mRA – rejestrator firmy L.INSTRUMENTs (czynny kanał pomiarowy A)
R – boczniak rurociągowy

Z (21) widać, że sumę nieznaną prądów I_x generowanych przez obce źródła można odczytać jako prąd wyłączeniowy I_{off} .

Gdy celem pomiaru jest określenie prądu ochrony I_p płynącego przez rurociąg, to można go wyznaczyć przy załączonej lub wyłączonej ochronie katodowej w następujący sposób:

$$(22) \quad I_{\text{on}} = \frac{\Delta U_{\text{on}}}{R}$$

$$(23) \quad I_{\text{off}} = \frac{\Delta U_{\text{off}}}{R}$$

$$(24) \quad I_p = I_{\text{on}} - I_{\text{off}}$$

gdzie:

ΔU_{on} – spadek napięcia pod wpływem prądu załączeniowego [V],

ΔU_{off} – spadek napięcia pod wpływem prądu wyłączeniowego [V],

R – rezystancja bocznika [Ω],

I_{on} – prąd załączeniowy [A],

I_{off} – prąd wyłączeniowy [A],

I_p – prąd ochrony [A].

Rejestrator **mRA** umożliwia posłużenie się wzorem (24) bez potrzeby obliczania wg (22) i (23).

Zmierzona wartość jest sumą płynących przez boczniak prądów ochrony od wszystkich współpracujących stacji SOK.

Izolacja rurociągu

Izolację rurociągu powinna zapewnić powłoka. Jednak porowatość powłoki i jej defekty powodują wejście ścian rurociągu w styczność z gruntem. To sprawia, że izolacja rurociągu zależy nie tylko od własności izolacyjnych powłoki, lecz także od rezystywności gruntu, który można uważać za „drugą powłokę izolacyjną”. Prąd płynący skroś izolacji jest wprost proporcjonalny do potencjału polaryzacji rurociągu E , a odwrotnie do sumy rezystancji powłoki R_{co} i rezystancji rozplywu w gruncie R_{rozpl} . Ta suma jest nazywana *rezystancją izolacji* lub *rezystancją przejścia*:

$$(25) \quad \Sigma R = R_{\text{co}} + R_{\text{rozpl}}$$

gdzie:

R_{co} – rezystancja powłoki,

R_{rozpl} – rezystancja rozplywu,

ΣR – rezystancja izolacji (rezystancja przejścia).

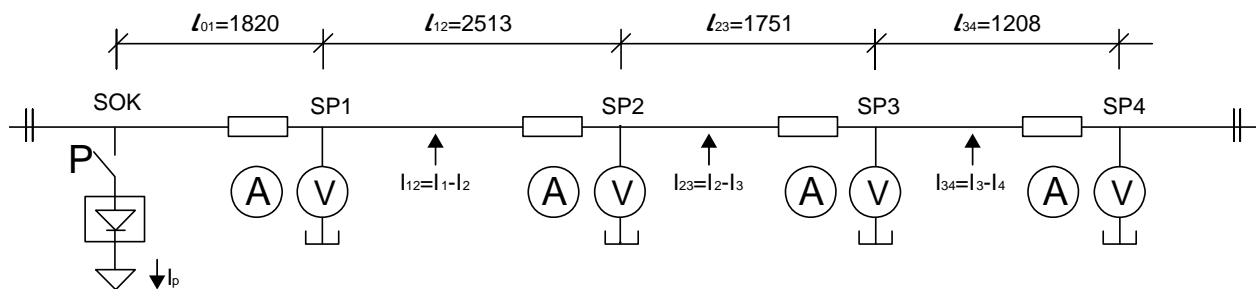
Rezystancja powłoki jest wynikiem jej stanu, a więc rodzaju materiału, wieku, grubości warstwy i stopnia zniszczenia. Jest to w pewnej mierze związane z jakością nałożenia powłoki i starannością posadowienia rurociągu w wykopie, co z kolei jest pochodną nadzoru (inspekcji)

robót. O materiale powłoki świadczy ilość i wielkość porów, które są penetrowane przez prąd skrośny między rurociągiem a elektrolitem (gruntem).

Rezystancja rozptywu w gruncie jako „drugiej powłoki” zależy od rezystywności ρ gruntu, jego składu chemicznego, napowietrzenia i wilgotności i nabiera znaczenia przy niskiej rezystancji powłoki. Rezystancja rozptywu sięga ziemi „dalekiej”, wspólnej – jak się przyjmuje – dla wszystkich stacji, i w stosunku do tej „dalekiej ziemi” mierzy się potencjał rurociągu. W związku z tym elektrodę pomiarową należy sytuować daleko od rurociągu, wskutek czego w pomiarze potencjału polaryzacji udział składowej IR jest znaczny. Na tym polega różnica w porównaniu z pomiarem potencjału na granicy faz – w stosunku do ziemi „bliskiej”, gdzie składową IR należy maksymalnie ograniczyć. Punkt usytuowania elektrody pomiarowej należy tak wybrać, aby w gruncie nie płynęły prądy między nią a rurociągiem.

Ocenę jakości izolacji nowych rurociągów wykonuje się po okresie osiadania i zagęszczenia zasypki, co zwykle trwa około roku. W późniejszej eksploatacji badania należy przeprowadzić⁷ w razie zauważenia znaczącej zmiany potencjału i wydatku prądu ochrony I_p .

W tym celu w rozmieszczonych wzdłuż rurociągu stacjach pomiarowych SP, wyposażonych w boczniki rurociągowy, synchronicznie mierzy się prądy i potencjały w układzie przedstawionym na rys. 5 i oblicza prąd skrośny izolacji między sąsiednimi stacjami SP jako różnicę prądów zmierzonych w tych stacjach. Następnie oblicza się któryś z wybranych jako kryterium parametrów izolacji: gęstość prądu, rezystancję lub konduktancję.



Rys. 5 Układ pomiaru izolacji rurociągu (dane przykładowe)

SP1...4 – stacje pomiarowe

SOK – stacja ochrony katodowej

01, 12, 23, 34 – odcinki pomiarowe między stacjami SP1...4

V – woltomierz

A – amperomierz

P – przerywacz taktujący

l – długości odcinków pomiarowych

I_p – prąd ochrony

I_1, I_2, I_3, I_4 – prąd zmierzony w stacjach SP1...4

I_{12}, I_{23}, I_{34} – prąd wpływający do rurociągu odpowiednio na odcinkach pomiarowych 12, 23, 34

Źródłem zasilania może być stacja ochrony katodowej SOK. Uziom anodowy stacji SOK powinien być na tyle oddalony od odcinka badanego aby gradient potencjału uziomu nie wpływał na wyniki pomiaru potencjału.

Rys. 5 przedstawia rozptyw prądu w przykładowym układzie na odcinkach pomiędzy czterema stacjami pomiarowymi: SP1, SP2, SP3, SP4. Generowany w stacji SOK prąd ochrony I_p poprzez uziom anodowy rozptywa się w gruncie i penetruje powłoki poszczególnych odcinków rurociągu. Jego część oznaczona I_{12} wpływa do odcinka „12”, I_{23} wpływa do „23”, I_{34} do „34”. Te wartości na ogół bardzo mało się różnią i dlatego niezbędne jest zastosowanie przyrządów o wysokiej rozdzielczości. Warunek ten spełniają rejestratory **mRA**.

⁷ NACE TM0102, rozdz. 1.1.

Aby odróżnić prąd I_p od innych prądów, które mogą płynąć w rurociągu, należy w stacji SOK zainstalować przerywacz **P** przerywający prąd I_p . Wartość prądu I_p należy tak dobrać aby potencjał wyłączeniowy na stacji SP najbliższej SOK był mniej ujemny niż -1100 mV.

Rezystancja rozplywu

Sesję pomiarową należy rozpocząć od wykonania na każdej stacji SP pomiaru średniej rezystancji rozplywu, np. czteroelektrodową metodą Wennera⁸. Na tej podstawie należy obliczyć rezystywność gruntu.

Uwaga. Dla uniknięcia polaryzacji elektrod w przyrządach do pomiaru rezystancji uziemienia stosuje się źródło prądu przemiennego (np. induktor).

Aby błąd pomiaru nie był nadmierny:

- odległości a między elektrodami powinny być równe głębokości posadowienia s rurociągu w gruncie
 $a = s$,
- elektrody należy rozmieścić prostopadle do rurociągu w taki sposób aby środek układu elektrod znajdował się nad osią rurociągu,
- elektrody należy wbić na głębokość $t \leq \frac{1}{5} a$,
- średnica elektrod powinna być $\emptyset \leq \frac{1}{25} a$.
- pomiar należy wykonać w temperaturze i wilgotności gruntu zbliżonej do przeciętnej.

Rezystywność gruntu oblicza się według wzoru:

$$(26) \quad \rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_{\text{rozpl}}$$

gdzie:

- a – odstęp między elektrodami równy głębokości posadowienia s rurociągu [cm] $a = s$,
- R_{rozpl} – zmierzona rezystancja rozplywu [Ω],
- ρ – rezystywność gruntu w SP1 [Ωcm].

Średnia rezystywność na odcinku 12 między sąsiednimi stacjami SP1 i SP2:

$$(27) \quad \rho_{12} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

gdzie:

- ρ_1 – rezystywność gruntu w SP1 [Ωcm],
- ρ_2 – rezystywność gruntu w SP2 [Ωcm],
- ρ_{12} – średnia rezystywność gruntu na odcinku 12 [Ωcm].

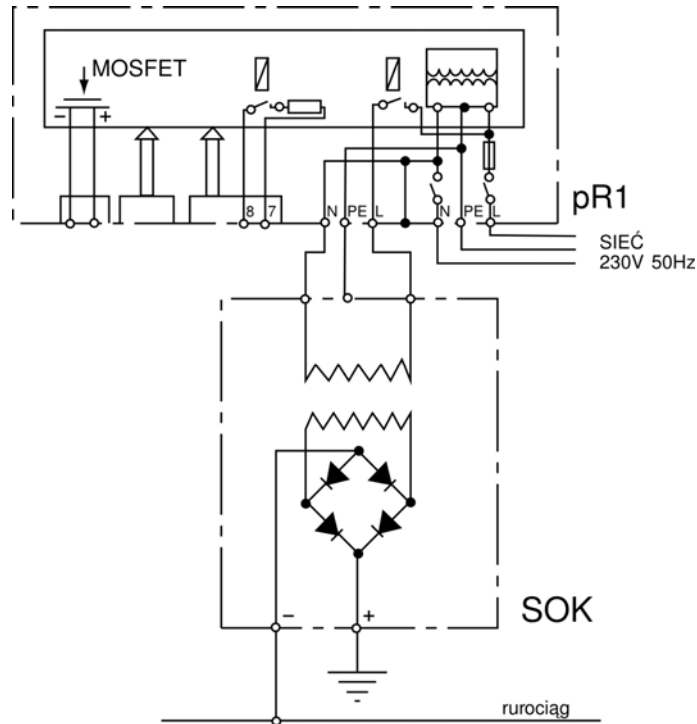
Podobnie należy wyznaczyć średnią rezystywność na pozostałych odcinkach.

⁸ CEOCOR, rozdz. 4.1.2.

Pomiar potencjałów

We wszystkich stacjach pomiarowych należy mierzyć jednocześnie potencjały załączeniowe E_{on} i wyłączeniowe E_{off} wraz z prądami załączeniowymi I_{on} i wyłączeniowymi I_{off} .

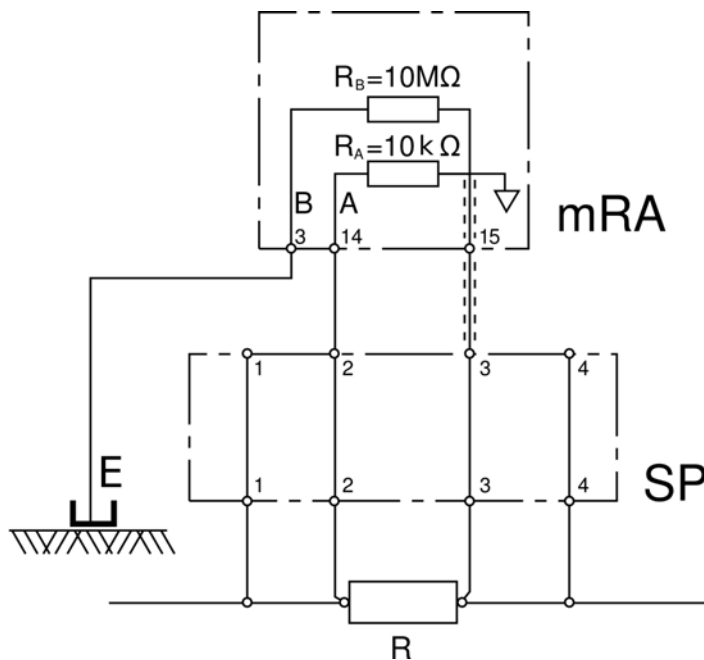
Schemat włączenia przerywacza taktującego typu **pR1** produkcji L.INSTRUMENTS w układ stacji SOK po stronie zasilania przedstawia rys.6, a schemat połączeń rejestratora **mRA** przy wykorzystaniu możliwości synchronicznego pomiaru potencjału polaryzacji i prądu w stacjach SP – rys. 7.



Rys. 6 Schemat włączenia przerywacza w układ stacji ochrony katodowej (po stronie zasilania)

pR1 – przerywacz taktujący firmy L.INSTRUMENTS

SOK – stacja ochrony katodowej



Rys. 7 Schemat połączeń rejestratora do jednoczesnego pomiaru potencjału polaryzacji i prądu w stacji pomiarowej

SP – stacja pomiarowa; oznaczenia zacisków przykładowe
mRA – rejestrator pomiarowy firmy L.INSTRUMENTs (czynne kanały pomiarowe A i B)
R – bocznik rurociągowy
E – elektroda pomiarowa

Elektrody odniesienia powinny być oddalone od rurociągu co najmniej na odległość równą jego średnicy, a o ile możliwości dalej, tak by pomiar obejmował spadek napięcia IR na całej rezystancji izolacji, to znaczy na sumie rezystancji powłoki i rezystancji rozptywu w gruncie. Potencjał rurociągu w stosunku do ziemi „dalekiej” można uważać za mierzony prawidłowo, jeśli pomiaru nie zakłóca obcy prąd płynący do innych konstrukcji.

Różnica potencjałów w poszczególnych stacjach SP (tu dla SP1):

$$(28) \quad \Delta E_1 = E_{on1} - E_{off1}$$

gdzie:

E_{on1} – potencjał załączeniowy w SP1 [V],
 E_{off1} – potencjał wyłączeniowy w SP1 [V],
 ΔE_1 – różnica potencjałów (28) w SP1 [V].

Na podstawie (28) dla każdych dwóch sąsiednich stacji SP trzeba sprawdzić, czy spełniony jest warunek⁹:

$$(29) \quad 0.625 < \frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} < 1.6$$

Jeśli wynik mieści się w podanych granicach, to średnią arytmetyczną potencjałów tych stacji można uważać za średnią różnicę potencjałów między nimi. Gdyby ten warunek nie był spełniony, to należałoby wybrać inne punkty pomiaru potencjału.

Średnia różnica potencjałów między krańcami odcinka (tu dla odcinka 12) jest:

$$(30) \quad \Delta E_{SR12} = \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2}{2}$$

gdzie:

ΔE_1 – różnica potencjałów (28) w SP1 [V],
 ΔE_2 – różnica potencjałów (28) w SP2 [V],
 ΔE_{SR12} – średnia różnica potencjałów (30) na odcinku „12” [V].

Gęstość prądu

Analogicznie do (28) w poszczególnych stacjach SP różnica między wartościami prądów – zmierzonych synchronicznie z potencjałami – jest (tu w SP1):

$$(31) \quad \Delta I_1 = I_{on1} - I_{off1}$$

gdzie:

I_{on1} – prąd załączeniowy w SP1 [A],
 I_{off1} – prąd wyłączeniowy w SP1 [A],
 ΔI_1 – różnica prądów w SP1 [A].

⁹ NACE TM0102, rozdz. 3.4.4.

Wartości prądów zmierzonych w sąsiednich stacjach powinny wyraźnie się różnić. Powinna też być widoczna różnica między I_{on} i I_{off} . W przeciwnym razie mogłoby to stać się przyczyną poważnych błędów.

Pod wpływem różnicy potencjałów ΔE_{SR12} (30) na odcinku „12” płynie prąd skrośny izolacji:

$$(32) \quad I_{12} = \Delta I_1 - \Delta I_2$$

gdzie:

ΔI_1 – różnica prądów (30) w SP1 [A],

ΔI_2 – różnica prądów j.w. w SP2 [A],

I_{12} – zmiana wartości prądu na odcinku „12” (prąd skrośny) [A].

Średnia gęstość prądu j na odcinku „12” (i analogicznie na pozostałych odcinkach):

$$(33) \quad j_{12} = \frac{I_{12}}{S_{12}}$$

$$(34) \quad S_{12} = \pi \cdot d_{12} \cdot l_{12}$$

gdzie:

j_{12} – średnia gęstość prądu na odcinku „12” [A/m²],

I_{12} – prąd skrośny na odcinku „12” [A],

S_{12} – powierzchnia zewnętrzna rury na odcinku „12” [m²],

d_{12} – średnica zewnętrzna rury na odcinku „12” [m],

l_{12} – długość odcinka „12” [m].

Polska norma gazownicza¹⁰ podaje kryterium dopuszczalnego poboru prądu czyli prądu skrośnego na odcinku rurociągu:

$$(35) \quad I \leq \frac{16[(E_p - E_{on}) - j_p \cdot g \cdot \rho]^2}{j_p \cdot \pi \cdot \rho^2}$$

gdzie:

I – prąd polaryzacji katodowej (32) pobierany przez odcinek rurociągu [A],

E_p – wymagany potencjał ochrony katodowej [V],

E_{on} – zastosowany eksploatacyjny potencjał załączeniowy [V],

j_p – wymagana gęstość prądu ochrony katodowej w defekcie powłoki izolacyjnej, zapewniająca osiągnięcie potencjału E_p w defekcie [A/m²],

g – grubość powłoki izolacyjnej [cm],

ρ – rezystywność gruntu [Ω cm].

Rezystancja powłoki

Średnia rezystancja R_{co} na odcinku „12”:

$$(36) \quad R_{co12} = \frac{\Delta E_{SR12}}{I_{12}}$$

Rezystancja jednostkowa r_{co} odniesiona do 1m² powierzchni rurociągu na odcinku „12”:

¹⁰ Izba Gospodarcza Gazownictwa ST-IGG-0601:2008 *Ochrona przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych. Wymagania funkcjonalne i zalecenia*. A.2.1.

$$(37) \quad r_{co12} = R_{co12} \cdot S_{12}$$

gdzie:

- ΔE_{SR12} – średnia różnica potencjałów na odcinku „12” [V],
 I_{12} – prąd skrośny na odcinku „12” [A],
 R_{co12} – średnia rezystancja izolacji na odcinku „12” [Ω],
 S_{12} – powierzchnia zewnętrzna rury na odcinku „12” [m²],
 r_{co12} – rezystancja jednostkowa izolacji na odcinku „12” [Ωm^2].

Norma¹¹ zaleca następujące kryteria oceny powłoki:

Rezystancja odcinka

$$(38) \quad R_{co} \geq \frac{(E_p - E_{on}) \cdot j_p \cdot \pi \cdot \rho^2}{16[(E_p - E_{on}) - j_p \cdot g \cdot \rho]^2}$$

lub jednostkowa rezystancja odcinka

$$(39) \quad r_{co} \geq \frac{(E_p - E_{on}) \cdot j_p \cdot \pi \cdot \rho^2}{16[(E_p - E_{on}) - j_p \cdot g \cdot \rho]^2} \cdot S$$

gdzie:

- R_{co} – wymagana rezystancja (36) powłoki [Ω],
 r_{co} – wymagana jednostkowa rezystancja (37) 1 m² powłoki [Ωm^2],
 E_p – wymagany potencjał ochrony katodowej [V],
 E_{on} – zastosowany eksploatacyjny potencjał załączeniowy [V],
 j_p – wymagana gęstość prądu ochrony katodowej w defekcie powłoki izolacyjnej zapewniająca osiągnięcie potencjału E_p w defekcie [A/m²],
 g – grubość powłoki izolacyjnej [cm],
 ρ – rezystywność gruntu [Ωcm],
 S – powierzchnia zewnętrzna odcinka rurociągu [m²].

Konduktancja powłoki

A amerykańska norma NACE¹² jako kryterium oceny jakości powłoki wskazuje konduktancję izolacji mierzoną w *simensach* [S]. Konduktancja G jest odwrotnością rezystancji izolacji R (a *simens* odwrotnością *oma* [Ω]):

$$(40) \quad G = \frac{1}{R}$$

Na podstawie (29) i (31) średnia konduktancja izolacji rurociągu na odcinku „12”:

$$(41) \quad G_{12} = \frac{I_{12}}{\Delta E_{SR12}}$$

Odpowiednio konduktancja jednostkowa g_{12} 1m² izolacji na odcinku „12”:

¹¹ST-IGG-0601:2008, A.2.1.

¹²NACE TM0102, rozdz. 5.

$$(42) \quad g_{12} = \frac{G_{12}}{S_{12}}$$

gdzie:

I_{12} – prąd skrośny na odcinku „12” [A],

ΔE_{SR12} – średnia różnica potencjałów na odcinku „12” [V],

G_{12} – konduktancja izolacji na odcinku „12” [S].

g_{12} – konduktancja jednostkowa 1m^2 izolacji na odcinku „12” [S/m^2],

S_{12} – powierzchnia zewnętrzna rury na odcinku „12” [m^2],

Te parametry dotyczą całej izolacji odcinka rurociągu, która obejmuje powłokę i własności izolacyjne gruntu. W celu oceny jakości samej powłoki należy określić konduktancję w warunkach znormalizowanych, za które norma przyjmuje rezystywność gruntu $\rho = 1000 \Omega\text{cm}$.

Jednostkowa znormalizowana konduktancja powłoki $g_{\text{con}12}$ przy rezystywności gruntu $\rho = 1000 \Omega\text{cm}$ na odcinku „12”:

$$(43) \quad g_{\text{con}12} = \frac{g_{\text{co}12} \cdot \rho_{12}}{1000\Omega \cdot \text{cm}}$$

gdzie:

$g_{\text{co}12}$ – konduktancja jednostkowa 1m^2 izolacji na odcinku „12” [S/m^2],

ρ_{12} – średnia rezystywność gruntu na odcinku „12” [Ωcm],

$g_{\text{con}12}$ – średnia jednostkowa znormalizowana konduktancja 1m^2 powłoki na odcinku „12” [S/m^2].

Jakość powłoki można ocenić wg poniższej tablicy¹³:

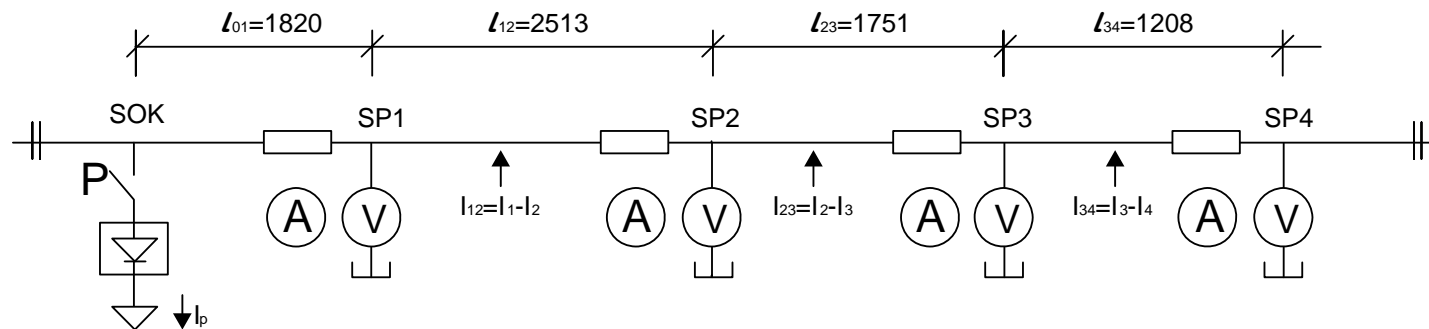
**Skala ocen jakości powłok
według średniej jednostkowej konduktancji znormalizowanej powłoki**

Jakość powłoki	Konduktancja g_{con} $\mu\text{S}/\text{m}^2$
Bardzo dobra	< 100
Dobra	101 ÷ 500
Dostateczna	501 ÷ 2000
Zła	> 2000

Wyniki pomiarów i obliczeń dla przykładu przedstawionego na rys. 5 podano na rys. 8.

Widać stąd, że wg normy NACE jakość powłoki odcinka „12” jest bliska bardzo dobrej, odcinka „23” jest zła, a „34” – dostateczna.

¹³ *Ibidem*, tabl. 5.



Kilometr SP	km.	1.820	4.333	6.084	7.292
Głębokość posadowienia	a [cm]	150	200	150	175
Rezystancja rozplywu w SP	R [Ω]	$R_1 = 5.0$	$R_2 = 2.5$	$R_3 = 6.6$	$R_4 = 3.9$
Rezystywność gruntu w SP (26)	ρ [Ωcm]	$\rho_1 = 4710$	$\rho_2 = 3140$	$\rho_3 = 6217$	$\rho_4 = 4286$
Rezystywność odcinka (27)	ρ [Ωcm]		$\rho_{12} = 3925$	$\rho_{23} = 4678$	$\rho_{34} = 5251$
Potencjał załączeniowy w SP	E_{on} [V]	$E_{\text{on}1} = -1.45$	$E_{\text{on}2} = -1.30$	$E_{\text{on}3} = -1.35$	$E_{\text{on}4} = -1.25$
Potencjał wyłączeniowy w SP	E_{off} [V]	$E_{\text{off}1} = -1.05$	$E_{\text{off}2} = -1.00$	$E_{\text{off}3} = -0.95$	$E_{\text{off}4} = -0.90$
Różnica SP (28)	$\Delta E = E_{\text{on}} - E_{\text{off}}$ [V]	$\Delta E_1 = -0.40$	$\Delta E_2 = -0.30$	$\Delta E_3 = -0.40$	$\Delta E_4 = -0.35$
Stosunek ΔE sąsiednich SP (29)			$\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} = 1.33$	$\frac{\Delta E_2}{\Delta E_3} = 0.75$	$\frac{\Delta E_3}{\Delta E_4} = 1.14$
Średnia ΔE sąsiednich SP (30)	ΔE_{SR} [V]		$\Delta E_{\text{SR}12} = -0.350$	$\Delta E_{\text{SR}23} = -0.350$	$\Delta E_{\text{SR}34} = -0.375$
Prąd załączeniowy w SP	I_{on} [A]	$I_{\text{on}1} = 3.0$	$I_{\text{on}2} = 2.9$	$I_{\text{on}3} = 2.2$	$I_{\text{on}4} = 1.8$
Prąd wyłączeniowy w SP	I_{off} [A]	$I_{\text{off}1} = 1.45$	$I_{\text{off}2} = 1.4$	$I_{\text{off}3} = 1.3$	$I_{\text{off}4} = 1.2$
Różnica prądów w SP (31)	$I = I_{\text{on}} - I_{\text{off}}$ [A]	$I_1 = 1.55$	$I_2 = 1.5$	$I_3 = 0.9$	$I_4 = 0.6$
Prąd skrośny na odcinku (32)	I [A]		$I_{12} = 0.05$	$I_{23} = 0.6$	$I_{34} = 0.3$
Gęstość prądu odcinka (33)	j [$\mu\text{A}/\text{m}^2$]		$j_{12} = 8.9$	$j_{23} = 154$	$j_{34} = 111$
Powierzchnia odcinka (34)	S [m^2]		$S_{12} = 5610$	$S_{23} = 3905$	$S_{34} = 2694$
Rezystancja odcinka (36)	R [Ω]		$R_{12} = 7$	$R_{23} = 0.58$	$R_{34} = 1.25$
Rezystancja jednostkowa (37)	r [Ωm^2]		$r_{12} = 39228$	$r_{23} = 2265$	$r_{34} = 3367$
Konduktancja odcinka (40)	G [S]		$G_{12} = 0.143$	$G_{23} = 1.71$	$G_{34} = 0.8$
Konduktancja jedn. odcinka (42)	g [$\mu\text{S}/\text{m}^2$]		$g_{12} = 25.5$	$g_{23} = 438$	$g_{34} = 297$
Konduktancja jedn. norm. odcinka (43)	g_n [$\mu\text{S}/\text{m}^2$]		$g_{n12} = 100.09$	$g_{n23} = 2049$	$g_{n34} = 1559$
Jakość powłoki odcinka (tablica)			dobra	zła	dostateczna

Rys. 8 Wyniki pomiarów i obliczeń do oceny jakości powłoki rurociągu

ZAŁĄCZNIK

Tabl. 1. Jednostkowa rezystancja wzdluzna rur wykonanych z róznych stali
Wg CEOCOR. *Pomiary w ochronie katodowej przed korozjq. Poradnik (tabl. 3-1)*

Øznam	Øzewn	Grubość	St34	St60	X52	X60	X70	X80
[mm]	[mm]	[mm]	µΩ/m	µΩ/m	µΩ/m	µΩ/m	µΩ/m	µΩ/m
1200	1220	16.8	-	-	3.56	3.80	4.02	4.46
1100	1118	15.5	-	-	4.21	4.49	4.75	5.27
1000	1016	10	5.38	5.70	-	-	-	-
		14.1	-	-	5.09	5.43	5.75	6.38
900	914	10	5.99	6.34	-	-	-	-
		12.7	-	-	6.28	6.70	7.09	7.87
800	813	8	8.40	8.90	-	-	-	-
		11.4	-	-	7.87	8.39	8.88	9.86
700	711	7.1	10.83	11.46	-	-	-	-
		9.9	-	-	10.36	11.05	11.69	12.98
600	610	6.3	14.23	15.06	-	-	-	-
		7.9	-	-	18.21	19.42	20.55	22.80
500	508	6.3	17.12	18.13	-	-	-	-
		8.5	-	-	14.07	15.00	15.88	17.62
400	406	6.3	21.49	22.75	-	-	-	-
		7.1	-	-	25.40	27.09	28.66	31.81
300	324	5.6	30.35	32.13	-	-	-	-
		6.5	-	-	34.86	37.17	39.33	43.65
200	219	4.5	56.06	59.36	-	-	-	-
		6.3	-	-	53.68	57.25	60.57	67.22
100	114	4	122.98	130.22	-	-	-	-
		5.6	-	-	118.51	126.37	133.71	148.39

Øznam – średnica znamionowa

Øzewn – średnica zewnętrzna

Tabl. 2. Parametry rur: średnica, grubość ścianki, masa jednostkowa, rezystancja jednostkowa, konduktancja jednostkowa, powierzchnia boczna jednostkowa

Wg: NACE Standard TM0102-2002. *Standard Test Method. Measurement of Protective Coating Electrical Conductance on Underground Pipelines* (Standardowa metoda pomiarowa. Pomiar upływności elektrycznej powłok izolacyjnych na rurociągach podziemnych), tabl. B1, s. 9 i nast.

TM0102-2002

Appendix B: Standard Pipe Data Tables

TABLE B1: Standard Pipe Formula

Øzewn		Grubość ścianki		Masa jednostkowa		Rezystancja jednostkowa		Konduktancja jednostkowa		Powierzchnia zewnętrzna jednostkowa			
cm	cale	mm	cale	kg/m	funty/stopa	μΩ/m	μΩ/stopa	S/m	S/stopa	m ² /m	stopa ² /stopa	m ² /m	stopa ² /mila
				bież.	bież.	bież.	bież.	bież.	bież.	bież.	bież.	bież.	bież.
6.350	2.500	5.232	0.206	8.616	5.790	122.281	37.271	8.178	26.830	0.199	0.65	199.5	3.456
7.303	2.875	7.010	0.276	11.399	7.560	92.429	28.172	10.819	35.496	0.229	0.75	229.4	3.974
8.890	3.500	5.486	0.216	11.280	7.580	93.404	28.470	10.706	35.125	0.279	0.92	279.3	4.838
11.430	4.500	6.020	0.237	16.057	10.790	65.617	20.000	15.240	50.000	0.359	1.18	359.1	6.220
		8.560	0.337	22.293	14.980	47.263	14.406	21.158	69.416				
16.828	6.625	5.563	0.219	22.278	14.970	47.295	14.415	21.144	69.370	0.529	1.73	529.7	9.158
		7.112	0.280	28.230	18.970	37.322	11.376	26.794	87.905				
		7.925	0.312	31.355	21.070	33.603	10.242	29.760	97.637				
		9.525	0.375	37.249	25.030	28.286	8.622	35.353	115.987				
		10.973	0.432	42.532	28.580	24.773	7.551	40.367	132.437				
21.908	8.625	6.350	0.250	33.275	22.360	31.664	9.651	31.582	103.614	0.688	2.26	688.2	11.920
		7.938	0.313	33.841	22.740	31.135	9.490	32.118	105.375				
		8.179	0.322	42.487	28.550	24.799	7.559	40.325	132.298				
		9.525	0.375	49.169	33.040	21.429	6.531	46.666	153.105				
27.305	10.750	6.350	0.250	41.728	28.040	25.250	7.696	39.604	129.935	0.858	2.81	857.8	14.860
		9.271	0.365	60.241	40.480	17.490	5.331	57.175	187.581				
		9.525	0.375	61.833	41.550	17.040	5.194	58.686	192.539				
		11.125	0.438	71.714	48.190	14.692	4.478	68.064	223.309				
		12.700	0.500	81.462	54.740	12.934	3.942	77.316	253.661				
32.385	12.750	6.350	0.250	49.675	33.380	21.210	6.465	47.147	154.680	1.017	3.34	1,017	17.620
		7.137	0.281	55.731	37.450	18.905	5.762	52.895	173.540				
		7.938	0.313	61.773	41.510	17.056	5.199	58.630	192.354				
		9.525	0.375	73.753	49.560	14.286	4.354	69.999	229.657				
		12.700	0.500	97.355	65.420	10.822	3.299	92.400	303.151				
35.560	14.000	6.350	0.250	54.630	36.710	25.605	7.804	39.055	128.133	1.117	3.67	1,117	19.350
		7.925	0.312	67.979	45.680	20.577	6.272	48.598	159.442				
		9.525	0.375	81.209	54.570	17.225	5.250	58.056	190.471				
40.640	16.000	6.350	0.250	62.577	42.050	22.353	6.813	44.736	146.771	1.277	4.19	1,277	22.120
		7.925	0.312	77.920	52.360	17.952	5.472	55.704	182.757				
		9.525	0.375	93.129	62.580	15.020	4.578	66.577	218.429				

TM0102-2002

Øzewn		Grubość ścianki		Masa jednostkowa		Rezystancja jednostkowa		Konduktancja jednostkowa		Powierzchnia zewnętrzna jednostkowa			
cm	cale	mm	cale	kg/m bież.	funty/stopa bież.	µΩ/m bież.	µΩ/stopa bież.	S/m bież.	S/stopa bież.	m ² /m bież.	stopa ² /stopa bież.	m ² /m bież.	stopa ² /mila bież.
		16.662	0.656	159.977	107.500	8.744	2.665	14.366	375.218				
45.720	18.000	6.350	0.250	70.524	47.390	19.835	6.046	50.417	165.410	1.436	4.71	1.436	24,880
50.800	20.000	6.350	0.250	78.470	52.730	17.826	5.433	56.098	184.049	1.596	5.24	1.596	27.650
		7.137	0.281	88.143	59.230	15.870	4.837	63.013	206.736				
		7.925	0.312	84.393	56.710	16.575	5.052	60.332	197.941				
		9.525	0.375	116.969	78.600	11.959	3.645	83.621	274.346				
55.880	22.000	6.350	0.250	86.417	58.070	16.187	4.934	61.779	202.688	1.756	5.76	1.756	30,410
59.373	23.375	9.525	0.375	137.193	92.190	10.196	3.108	98.079	321.780	1.865	6.12	1.865	32,310
		11.913	0.469	170.751	114.740	8.192	2.497	122.069	400.489				
60.960	24.000	7.137	0.281	106.031	71.250	13.192	4.021	75.801	248.691	1.915	6.28	1.915	33,180
		7.925	0.312	117.654	79.060	11.889	3.624	84.110	275.951				
		8.738	0.344	129.246	86.850	10.823	3.299	92.397	303.141				
		10.312	0.406	152.343	102.370	9.182	2.799	108.909	357.312				
		11.913	0.469	175.320	117.810	7.979	2.432	125.335	411.204				
		12.700	0.500	186.749	125.490	7.490	2.283	133.506	438.010				
		15.875	0.625	232.227	156.050	6.023	1.836	166.018	544.677				
66.040	26.000	7.239	0.285	116.523	78.300	12.005	3.659	83.301	273.298	2.075	6.81	2.075	35,940
		7.925	0.312	142.461	95.730	9.819	2.993	101.845	334.136				
		8.255	0.325	132.624	89.120	10.547	3.215	94.812	311.065				
		9.525	0.375	152.729	102.630	9.159	2.792	109.185	358.220				
		12.700	0.500	202.642	136.170	6.903	2.104	144.868	475.288				
76.2	30.000	7.925	0.312	147.447	99.080	9.487	2.892	105.409	345.829	2.394	7.85	2.394	41,470
		8.255	0.325	153.116	102.890	9.136	2.785	109.462	359.127				
		8.738	0.344	162.030	108.880	8.633	2.631	115.835	380.035				
		9.144	0.360	169.590	113.960	8.248	2.514	121.239	397.766				
		9.525	0.375	176.570	118.650	7.922	2.415	126.229	414.136				
		10.312	0.406	191.079	128.400	7.321	2.231	136.601	448.168				
		11.125	0.438	205.559	138.130	6.805	2.074	146.953	482.129				
		12.700	0.500	234.429	157.530	5.967	1.819	167.592	549.843				
91.44	36.000	8.738	0.344	194.800	130.900	7.181	2.189	139.261	456.894	2.873	9.42	2,873	49,760
		9.525	0.375	212.330	142.680	6.588	2.008	151.794	498.010				
		10.312	0.406	229.816	154.430	6.087	1.855	164.294	539.023				
		11.913	0.469	264.713	177.880	5.284	1.611	189.242	620.873				
		12.700	0.500	282.110	189.570	4.958	1.511	201.679	661.675				
91.44	36.000	14.275	0.562	316.814	212.890	4.415	1.346	226.488	743.072	2.873	9.42	2,873	49,760

Øzewn		Grubość ścianki		Masa jednostkowa		Rezystancja jednostkowa		Konduktancja jednostkowa		Powierzchnia zewnętrzna jednostkowa			
cm	cale	mm	cale	kg/m bież.	funty/stopa bież.	μΩ/m bież.	μΩ/stopa bież.	S/m bież.	S/stopa bież.	m ² /m bież.	stopa ² /stopa bież.	m ² /m bież.	stopa ² /mila bież.
		15.875	0.625	351.398	236.130	3.981	1.213	251.213	824.188				
		17.450	0.687	385.849	259.280	3.625	1.105	275.841	904.991				
106.68	42.000	9.525	0.375	248.120	166.730	5.638	1.718	177.380	581.955	3.351	11.00	3.352	58,060
		9.906	0.390	257.912	173.310	5.424	1.653	184.380	604.921				
		11.125	0.438	289.298	194.400	4.835	1.474	206.817	678.534				
		12.700	0.500	329.835	221.640	4.241	1.293	235.797	773.613				
		14.275	0.562	370.104	248.700	3.779	1.152	264.586	868.063				
		15.875	0.625	411.058	276.220	3.403	1.037	293.863	964.119				
121.92	48.000	12.700	0.500	377.515	253.680	3.705	1.129	269.884	885.445	3.830	12.57	3.830	66,350
		15.875	0.625	470.659	316.270	2.972	0.906	336.472	1,103.909				
		19.050	0.750	563.297	378.520	2.483	0.757	402.698	1,321.187				

The Standard Pipe Formula (Metric) is illustrated in Equation (B1):

$$\text{Resistance } (\mu\Omega/\text{m}) = \frac{58.55 (\text{constant, } k) \times 18 \mu\Omega\text{cm}}{\text{Weight (kg/m)}} \quad \text{for pipe diameter 32.38 cm (12.75 in.) and below} \quad (\text{B1})$$

The Standard Pipe Formula (U.S. Customary) is illustrated in Equation (B2):

$$\text{Resistance } (\mu\Omega/\text{ft}) = \frac{11.98 (\text{constant, } k) \times 18 \mu\Omega\text{cm}}{\text{Weight (lb/ft)}} \quad \text{for pipe diameter 32.38 cm (12.75 in.) and below} \quad (\text{B2})$$

Where $k = 77.76$ (Metric Units), for pipe diameter 35.56 cm (14.00 in.) OD and above
 and $k = 15.91$ (U.S. Customary), for pipe diameter 35.56 cm (14.00 in.) OD and above