



**INSTALACJA DOŚWIADCZALNA OCHRONY KATODOWEJ
POWIERZCHNI WEWNĘTRZNEJ RUROCIĄGU WODY
CHŁODZĄCEJ DN1000 W HUCIE ARCELOR MITTAL OSTRAVA**

**TEST INSTALLATION FOR INTERNAL CATHODIC
PROTECTION OF DN 1000 COOLING WATER PIPELINE
IN ARCELORMITTAL OSTRAVA**

Jezmar Jankowski¹⁾, Wojciech Sokółski¹⁾, Tomáš Kolek²⁾, Svatopluk Dorda²⁾

¹⁾ SPZP CORRPOL Sp. z o.o., Gdańsk, ²⁾ KPTECH s.r.o., Ostrava

Słowa kluczowe: rurociąg wody chłodzącej, ochrona katodowa powierzchni wewnętrznej
Keywords: cooling water pipeline, internal cathodic protection

Streszczenie

Opisano doświadczalną instalację ochrony katodowej powierzchni wewnętrznej rurociągu DN1000 przesyłającego wodę chłodzącą z walcowni do osadników Dorra w hucie ArcelorMittal Ostrava A.S. Zastosowano ochronę katodową za pomocą anod dyskretnych zasilanych z zewnętrznego źródła prądu. W celu zbadania skuteczności i zasięgu ochrony katodowej wytypowano odcinek rurociągu długości 20 m, na którym zamontowano usytuowane promieniowo w różnych odstępach anody cylindryczne Ti/MMO i elektrody pomiarowe. Na podstawie pomiarów polaryzacji katodowej wyznaczono docelowe parametry instalacji ochronnej dla warunków eksploatacyjnych obiektu. Stwierdzono, że optymalny rozstaw anod Ti/MMO wynosi ok. 5 średnic rurociągu.

Summary

The experimental installation of internal cathodic protection of the DN1000 pipeline transporting the cooling water from the rolling mill to the Dorra settlers in ArcelorMittal Ostrava A.S. ironworks has been described. The impressed current cathodic protection with discrete anodes has been applied. In order to test the effectiveness and range of cathodic protection the section of pipeline of length 20 m has been selected, where the cylindrical Ti/MMO anodes and measuring electrodes were installed radially at various intervals. Basing on measurements of the trial cathodic polarization the target parameters of the protection system for the operating conditions of the object have been determined. It has been found that the optimum distance between the Ti/MMO anodes is approx. 5 times the diameter of the pipeline.

1. Wprowadzenie

W zakładzie hutniczym ArcelorMittal Ostrava a.s. (w skrócie AMO) w Republice Czeskiej eksploatowany jest od około 50 lat rurociąg stalowy przesyłający wodę chłodzącą z walcowni do osadników Dorra. Jest to newralgiczny obiekt, którego integralność warunkuje utrzymanie ciągłości pracy walcowni. Dostępny z zewnątrz jest odcinek napowietrzny rurociągu DN1000 długości ok. 200 m usytuowany w podziemnym kanale instalacyjnym. W ostatnich latach pojawiły się problemy eksploatacyjne związane z postępującą korozją tego obiektu. Główne zagrożenie korozyjne rurociągu występuje od strony przesyłanej wody. Rurociąg wykonany został ze stali węglowej o bliżej nieokreślonym gatunku. Wyjściowa grubość ścianek odcinka DN1000 wynosiła 10 mm. Obecnie, na skutek wieloletniej korozji, uległa ona znacznemu obniżeniu doprowadzając lokalnie do perforacji i wycieków wody, zwłaszcza w górnej strefie rurociągu. Uszkodzenia naprawiane są doraźnie za pomocą nakładek z blachy stalowej spawanych od zewnątrz do płaszcza rurociągu. Kierownictwo zakładu nie przewiduje możliwości nawet krótkoterminowego wyłączenia obiektu celem dokonania jego gruntownego remontu lub wymiany. W tej sytuacji firma KPTECH z Ostrawy we współpracy z firmą CORRPOL posiadającą wieloletnie udokumentowane doświadczenia związane z ochroną czynną rur wielkośrednicowych [1], zaproponowały objęcie rurociągu od wewnątrz ochroną katodową. Przewidziano nowatorskie rozwiązania techniczne niewymagające wyłączania rurociągu z eksploatacji podczas montażu instalacji ochronnej. W pierwszym etapie wdrożenia do wykonania pilotażowej instalacji ochrony katodowej wytypowany został odcinek rurociągu DN1000 o długości 20 m usytuowany w jego środkowej części, gdzie zaobserwowano najwięcej przecieków. W niniejszej pracy przedstawiono pokrótce sposób realizacji tego przedsięwzięcia oraz uzyskane wyniki. Skuteczne działanie ochrony katodowej wewnątrz rurociągów wodnych potwierdzają również w ostatnich latach inne doniesienia [2, 3].

2. Opis instalacji ochrony katodowej

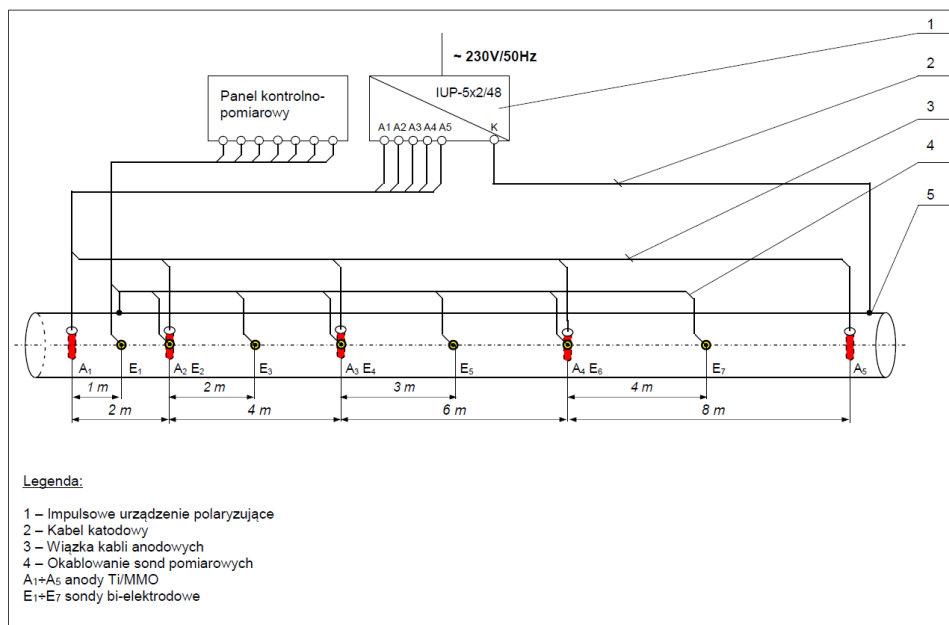
2.1. Przeznaczenie instalacji

Zaprojektowana instalacja doświadczalna miała na celu wyznaczenie optymalnych parametrów polaryzacji katodowej dla warunków eksploatacyjnych rurociągu wody chłodzącej w AMO. Obiekt nie jest w pełni zdefiniowany fizycznie od strony wewnętrznej (brak danych o powłoce ochronnej i stanie powierzchni stalowej) i dlatego wymagał wykonania cyklu pomiarów elektrycznych i elektrochemicznych, które pozwoliły wyznaczyć parametry niezbędne do obliczeń ochrony katodowej, a zwłaszcza stałą rozprężu i polaryzowalność konstrukcji. Na tej podstawie zostały ustalone odpowiednie odstępstwa między anodami oraz wyznaczone zapotrzebowanie na prąd ochrony. Instalację doświadczalną zaprojektowano biorąc pod uwagę aktualne normy i wytyczne [4-6] w taki sposób, że stanowi ona pełnowartościową instalację, która po wykonaniu cyklu badań umożliwi docelowo długoterminową ochronę katodową wytypowanego odcinka rurociągu.

2.2. Wykonanie instalacji ochronnej

Instalację doświadczalną ochrony katodowej zamontowano w ArcelorMittal Ostrava A.S. we wrześniu 2012 r. W skład instalacji wchodził układ prądowy złożony z 5-cio kanałowego urządzenia polaryzującego zasilającego 5 anod Ti/MMO oraz układ kontrolno-pomiarowy składający się z 7 stalowych elektrod odniesienia oraz 7 elektrod symulujących wykonanych

w postaci sond bi-elektrodowych. Anody rozmieszczono w zróżnicowanych odległościach od siebie w zakresie od 2 do 8 m, zaś bi-elektrody pomiarowe w punktach maksymalnej (3 szt.) i minimalnej (4 szt.) polaryzacji katodowej (zob. rys. 1).



Rys. 1. Schemat doświadczalnej instalacji ochrony katodowej rurociągu

Wszystkie podzespoły do montażu instalacji ochronnej wykonała firma SPZP CORR-POL. Poniżej opisano ważniejsze elementy instalacji.

Króćce mocujące anody i elektrody pomiarowe

W pierwszej fazie wykonawstwa wspawano w wyznaczonych miejscach rurociągu odpowiednio przygotowane króćce oraz nawiercono w nich otwory przelotowe o średnicy 30 mm przez ściankę rurociągu z wykorzystaniem technologii umożliwiającej prowadzenie prac na czynnym obiekcie i pod ciśnieniem tłocznej wody. Uzyskane w wyniku wiercenia kołowe wycinki ze ścian rurociągu dokumentują jednocześnie jego stan techniczny przed zastosowaniem ochrony katodowej. Przykładowy wycinek prezentują poniższe fotografie, które ukazują widok powierzchni wewnętrznej rurociągu przed oczyszczeniem (rys. 2a) oraz po wytrawieniu osadów i produktów korozji (rys. 2b).

Analiza wycinków wykazała, że korozja rurociągu od strony wody ma charakter nierównomierny. Widoczne są lokalne ubytki korozyjne w postaci rozległych wżerów. Grubość wycinków kształtowała się w zakresie od 3,2 do 8,7 mm przy nominalnej grubości ścianek rurociągu 10 mm, co oznacza, że przeciętny ubytek korozyjny wyniósł 2,7 mm.



Rys. 2. Widok powierzchni wewnętrznej rurociągu DN1000 w miejscach montażu anod:
a) przed oczyszczeniem; b) po usunięciu produktów korozji

Jak na 50-letni okres eksploatacji rurociągu jest on stosunkowo niewielki (szybkość korozji na poziomie ok. 0,05 mm/rok), natomiast istotne zagrożenie stanowi nierównomierny charakter korozji, czego skutkiem są pojawiające się już perforacje ścian.

Anody Ti/MMO

W instalacji ochrony katodowej zastosowano ogółem 5 wysokosprawnych anod trudno-roztwarzalnych. Są to anody tytanowe pokryte warstwą aktywnych tlenków irydu i tantalu o obciążalności prądowej 2A każda. Zostały one wykonane w postaci rurek $\phi 25 \times 500$ mm umocowanych na izolowanych wysięgnikach prętowych (rys. 3) i zamontowane szczelnie w króćcach wspawanych do rurociągu z wyprowadzonym na zewnątrz poprzez dławicę kablem anodowym (rys. 4). Zaprojektowano specjalny system mocowania anod, który umożliwia ich montaż i demontaż pod ciśnieniem bez przerywania pracy rurociągu. Ze względu na brak możliwości montażu pionowego anod (obecność wiązki rur nad rurociągiem) zostały one zamontowane pod kątem 45° w stosunku do średnicy poziomej rurociągu (rys. 5).

Elektrody odniesienia – sondy bi-elektrodowe

Do oceny skuteczności ochrony katodowej zastosowano sondy bi-elektrodowe z elektrodami stalowymi umożliwiające dokonywanie pomiarów polaryzacji powierzchni wewnętrznej rurociągu w wytypowanych strefach (najbardziej zbliżonych oraz najbardziej oddalonych od anod). Jest to rozwiązanie techniczne, w którym zastosowano obok siebie we wspólnej obudowie sondy dwie identyczne elektrody ze stali węglowej o powierzchni czynnej 5 cm^2 każda (rys. 6). Jedna z nich pozostaje swobodnie korodująca i pełni funkcję elektrody odniesienia, zaś druga stanowi elektrodę symulującą i podlega polaryzacji katodowej wraz z konstrukcją umożliwiając pomiar potencjałów ON/OFF i prądu polaryzacji. Wszystkie sondy ustawiono w płaszczyźnie średnicy poziomej rurociągu.

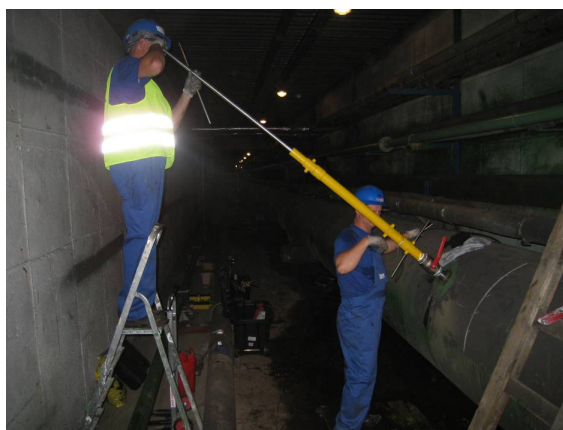
Rys. 3. Widok anod Ti/MMO
przygotowanych do montażu
w rurociągu



Rys. 4. Króciec z zamontowaną anodą



Rys. 5. Montaż anody w rurociągu





Rys. 6. Sondy bi-elektrodowe z elektrodami stalowymi

Przewody od wszystkich 7 sond bi-elektrodowych doprowadzono do panelu kontrolno-pomiarowego w stacji ochrony katodowej. Podobnie jak w przypadku anod, przewidziano analogiczny sposób montażu sond pomiarowych w ścianie rurociągu bez konieczności przerywania jego pracy. Widok ogólny odcinka rurociągu z zamontowanymi anodami, elektrodami pomiarowymi i okablowaniem przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Widok ogólny odcinka rurociągu z zamontowanymi anodami, elektrodami pomiarowymi i okablowaniem

Stacja ochrony katodowej

Do polaryzacji katodowej powierzchni wewnętrznej rurociągu za pomocą anod Ti/MMO zastosowane impulsowe urządzenie polaryzujące typu IUP-5x2A/48V (rys. 8). Urządzenie pozwala na niezależne zasilanie 5 anod w trybie galwanostatycznym (napięcie max. 48 V, prąd max. 2 A na każdym wyjściu). Urządzenie jest zasilane jednofazowo z sieci energetycznej 230V/50Hz.



Rys. 8. Urządzenie polaryzujące IUP-5x2/48 zamontowane w kanale instalacyjnym

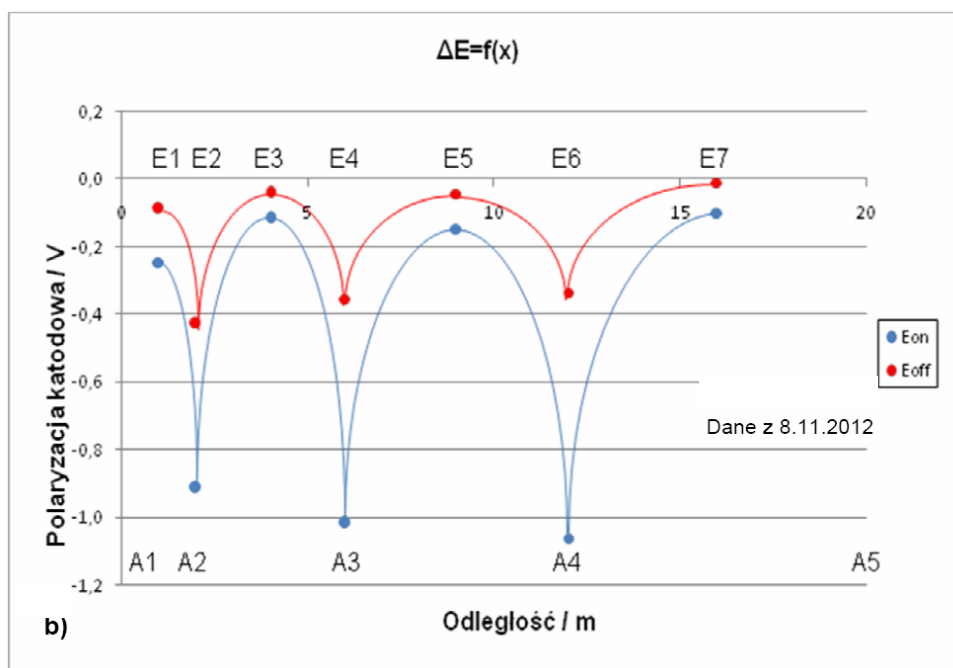
3. Rozruch instalacji ochronnej i wybrane wyniki badań eksploatacyjnych

Po sprawdzeniu prawidłowości wszystkich połączeń elektrycznych oraz szczelności zamontowanych anod i elektrod pomiarowych dokonano rozruchu instalacji ochrony katodowej doświadczalnego odcinka rurociągu. Nastawiono początkowe wartości prądu polaryzującego 1.0 A na każdej anodzie. Napięcia anoda-katoda ukształtowały się w zakresie od 30,7 do 31,4 V, co świadczyło o zbliżonych warunkach pracy wszystkich pięciu anod. Ich rezystancja przejścia w fazie rozruchu wynosiła około 31 Ω .

Pomiary eksploatacyjne polaryzacji katodowej doświadczalnego odcinka rurociągu DN1000 prowadzone były przez personel KPTECH. Na uwagę zasługuje interpretacja wyników pomiarów potencjału. Zastosowane bi-elektrody stalowe do oceny skuteczności ochrony katodowej odcinka rurociągu DN1000 pozwalają mierzyć różnice potencjałów między różnymi punktami rurociągu, ale nie umożliwiają pomiaru wartości bezwzględnej potencjału, którą można by oceniać według przyjętych kryteriów potencjałowych dla ochrony katodowej stali w środowisku wodnym, co stanowi pewną niedogodność. Z uzyskanych danych wynika, że potencjały elektrod stalowych zmieniają się w czasie i różnicują się znacząco w strefach anodowych oraz oddalonych od anod. Mierzone potencjały wszystkich siedmiu elektrod są obciążone trudnym do wyeliminowania omowym spadkiem napięcia. Dotyczy to zarówno potencjałów załączeniowych (płynie wówczas prąd polaryzacji rurociągu), jak i wyłączeniowych (płyną wówczas prądy wyrównawcze między różnie spolaryzowanymi strefami rurociągu). Z tego powodu interpretacja uzyskanych wyników jest utrudniona, ale pozwala oszacować wielkość polaryzacji katodowej rurociągu w analizowanych miejscach.

3.1. Ocena skuteczności ochrony katodowej

Ocenę oparto na pomiarach wielkości polaryzacji katodowej rurociągu względem zainstalowanych stalowych elektrod odniesienia. W pierwszym miesiącu funkcjonowania ochrony katodowej pomiary dokonywano systematycznie w odstępach kilkudniowych. Na przykładowym wykresie (rys. 9) przedstawiono wyznaczone wielkości polaryzacji rurociągu na podstawie pomiarów potencjałów E_{ON} i E_{OFF} wzdłuż chronionego katodowo odcinka rurociągu po 20 dobach polaryzacji.



Rys. 9. Rozkład potencjału wzdłuż polaryzowanego katodowo odcinka rurociągu

Na wykresie widać wyraźnie działanie zainstalowanego systemu ochrony katodowej. Widoczne są zgodne z przewidywaniami regularności: najsilniej polaryzuje się powierzchnia rurociągu naprzeciw anod, zaś najslabiej między anodami. Różnice wynoszą ponad 300 mV biorąc pod uwagę wartości potencjału wyłączeniowego. Głębokość polaryzacji zależy wyraźnie od odległości między anodami. Tam gdzie anody są najbliżej siebie (A1 i A2 oddalone o 2 m) polaryzacja katodowa jest największa i wynosi ok. 100 mV pośrodku między anodami i ponad 400 mV naprzeciw anody A2. Przy większych odstępach między anodami (4 i 6 m), środkowa strefa między anodami polaryzuje się słabiej (o ok. 50 mV). Najniższa polaryzacja katodowa obserwowana jest między anodami A4 i A5 oddalonymi o 8 m. Jako kryterium ochrony katodowej stali w wodzie chłodzącej przyjęto minimalną wielkość polaryzacji -100 mV z wyłączeniem omowego spadku napięcia, co zgodnie z teorią kinetyki elektrochemicznej powinno zapewnić co najmniej 10-cio krotne obniżenie szybkości korozji. Kryterium takie uwzględnia m.in. opracowanie NACE [7].

Korzystając z programu komputerowego OKPLIN [8] wykorzystującego zależności podane przez Morgana [9], obliczano na podstawie wyznaczonego rozkładu potencjału wyłączeniowego parametry elektryczne wnętrza rurociągu niezbędne do projektowania ochrony katodowej, takie jak konduktancję skrośną i stałą rozplywu. Obliczenia wykonano po różnych czasach polaryzacji katodowej, a ich wyniki zamieszczono w tab. 1. Parametry te są trudne do oszacowania bez dokonania próbnej polaryzacji i braku dostępu do wnętrza rurociągu, bowiem zależą od wielu czynników, a przede wszystkim stanu jego powierzchni wewnętrznej (obecność i jakość powłoki ochronnej, stopień skorodowania, obecność i rodzaj osadów i produktów korozji). Obliczenia wykonano dla średniej rezystywności wody $\rho=24,4 \Omega\text{m}$.

Tabela 1. Obliczone parametry elektryczne powierzchni wewnętrznej stalowego rurociągu w kontakcie z wodą chłodzącą

Czas polaryzacji katodowej [doba]	Wyznaczony parametr	
	konduktancja skrośna g [S/m^2]	stała rozplywu α [m^{-1}]
12	0,0161	1,192
16	0,0159	1,202
20	0,0171	1,229
Średnia	0,0164	1,208

Na podstawie wyznaczonych średnich wartości parametrów (g i α) dokonano obliczeń maksymalnej odległości między anodami zapewniającej skuteczną ochronę katodową powierzchni wewnętrznej rurociągu. Do obliczeń przyjęto następujące dane:

- minimalna zmiana potencjału: $\Delta E_{\min} = E_{\min} - E_{\text{kor}} = -100 \text{ mV}$,
- maksymalna zmiana potencjału: $\Delta E_{\max} = E_{\max} - E_{\text{kor}}$ od -300 do -600 mV.

Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 2.

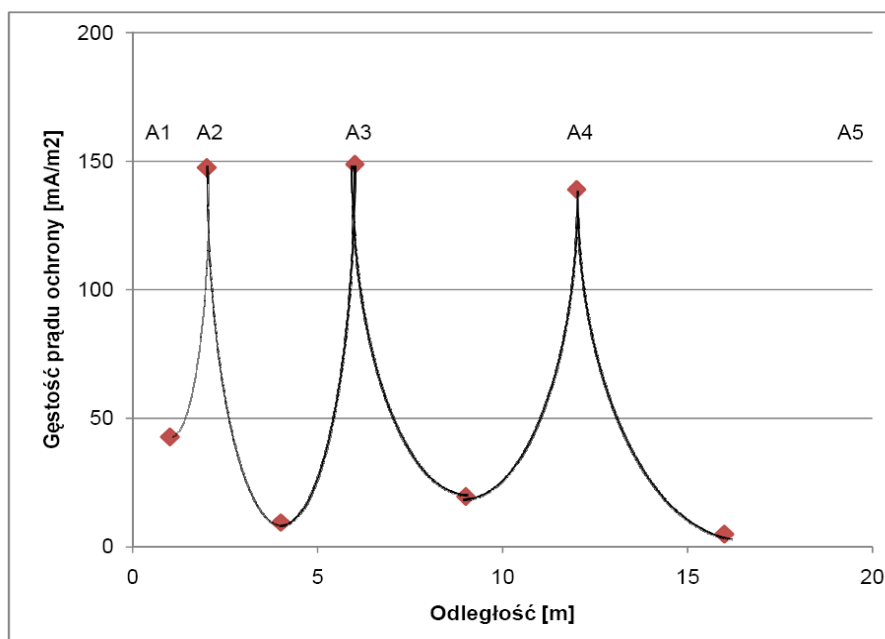
Tabela 2. Obliczona maksymalna odległość (L) między anodami dla różnych zakresów polaryzacji katodowej

$\Delta E_{\min}$, mV	$\Delta E_{\max}$, mV	L , m
-100	-300	3,79
-100	-400	4,26
-100	-500	4,62
-100	-600	4,92

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przyjmując jako dopuszczalne zróżnicowanie potencjału powierzchni rurociągu na poziomie 500 mV można instalować anody w odstępach około 5 m.

Powyższe zależności wyznaczono przy zasilaniu anod prądem o natężeniu 1,2 A/anodę. Średnia gęstość prądu ochrony katodowej przypadająca na powierzchnię wewnętrzną chronionego odcinka rurociągu wynosiła 73 mA/m^2 , co wydaje się wartością odpowiednią dla tego typu instalacji.

Rozkład prądu na powierzchni wewnętrznej rurociągu wyznaczono mierząc prądy polaryzacji elektrod symulujących. W tym celu odłączano chwilowo poszczególne elektrody od konstrukcji rurociągu i włączano ponownie poprzez obwód amperomierza. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie (rys. 10).



Rys. 10. Rozkład prądu ochrony wzdłuż polaryzowanego katodowo odcinka rurociągu

Widać, że rozkład prądu na badanym odcinku rurociągu jest adekwatny do rozkładu potencjału. Najsilniej polaryzuje się katodowo powierzchnia stali w strefach naprzeciw anod, znacznie słabiej pomiędzy anodami. Zarówno na elektrodach zlokalizowanych w pobliżu anod, jak i oddalonych od nich, zauważa się trend zmniejszania prądu polaryzacji w miarę wzrostu odległości między anodami.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych prób polaryzacji katodowej doświadczalnego odcinka rurociągu wody chłodzącej DN1000 w ArcelorMittal Ostrava oraz uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- Ochrona katodowa wewnętrznej powierzchni rurociągu za pomocą anod dyskretnych montowanych od zewnątrz jest w warunkach AMO możliwa do realizacji i co ważne, może być instalowana podczas normalnej pracy rurociągu, tj. bez wyłączania go z eksploatacji,

- Opracowane podzespoły i rozwiązania techniczne instalacji ochrony katodowej odcinka rurociągu (anody, urządzenie polaryzujące, elektrody, sposób montażu) zdały egzamin praktyczny i mogą być wykorzystane do wykonania instalacji docelowej,
- Wyliczone teoretycznie na podstawie wyznaczonych średnich wartości stałej rozprywu odległości między anodami kształtują się w zakresie od ok. 4 do 5 m i mogą być przyjęte do projektowania ochrony katodowej pozostałych odcinków rurociągu,
- W docelowej instalacji ochrony katodowej rurociągu korzystne wydaje się dokonanie modyfikacji systemu kontroli jej skuteczności. Proponuje się zastosowanie zamiast bi-elektrod stalowych klasycznych elektrod odniesienia (cynkowych lub chlorosrebrnych) oraz czujników korozymetrycznych do bezpośrednich pomiarów szybkości korozji stali w wytypowanych lokalizacjach.

Literatura

- [1] Juchniewicz R., Szukalski J., Jankowski J., *Doświadczenia eksploatacyjne ochrony katodowej powierzchni wewnętrznej rurociągów wielkośrednicowych wody chłodzącej*, Przegląd Mechaniczny 56, nr 6, 26 (1997).
- [2] Al Jaber M.S., Al-Busaeedi A.M., Ur-Rahman Hanif A., *Impressed Current Cathodic Protection System for Internal Corrosion Protection of Seawater Plant Piping*, EUROCORR 2012, Istanbul, Turkey.
- [3] Sun W., Zou S., Yang J., *Internal Cathodic Protection Retrofit for Auxiliary Cooling Water Pipes*, Materials Performance 54, No. 12, 38 (2015).
- [4] PN-EN 12499 Ochrona katodowa powierzchni wewnętrznych konstrukcji metalowych.
- [5] DIN 50927 Planung und Anwendung des elektrochemischen Korrosionsschutzes fuer die Innenflaechen von Apparaten, Behaeltern und Rohren.
- [6] AFNOR A05 601 Protection cathodique interne des reservoirs et appareils metalliques, Fevrier 1991.
- [7] One Hundred Milivolt (mV) Cathodic Protection Criterion, NACE, 35018, 2008.
- [8] Program komputerowy OKPLIN do obliczeń parametrów ochrony katodowej powierzchni wewnętrznej rurociągów, CORRPOL 1996 r.
- [9] Morgan J., *Cathodic Protection*, NACE Houston 1987.

