



**ZASTOSOWANIE KOROZYMETRII REZYSTANCYJNEJ DO POMIARÓW
SKUTECZNOŚCI OCHRONY KATODOWEJ KONSTRUKCJI PODZIEMNYCH**

**APPLICATION OF ELECTRICAL RESISTANCE TECHNIQUE
FOR MEASUREMENTS OF CATHODIC PROTECTION EFFECTIVENESS
OF UNDERGROUND STRUCTURES**

Jezmar Jankowski, Jan Szukalski

Katedra Technologii Zabezpieczeń Przeciwkorozyjnych
Politechnika Gdańska

Słowa kluczowe: stalowe konstrukcje podziemne, ochrona katodowa, monitorowanie korozji, korozymetria rezystancyjna, pomiary szybkości korozji
Keywords: underground steel structures, cathodic protection, corrosion monitoring, electrical resistance technique, measurements of corrosion rate

Streszczenie

Przedstawiono podstawy teoretyczne korozymetrii rezystancyjnej. Scharakteryzowano możliwości wykorzystania tej techniki pomiarowej do monitorowania skuteczności ochrony katodowej konstrukcji podziemnych. Jako przykład przedstawiono wyniki rocznych pomiarów szybkości korozji chronionych katodowo stalowych rurociągów i zbiorników uzyskane na terenie jednej z krajowych elektrowni.

Summary

The theoretical bases of the electrical resistance technique have been presented. The possibilities of using this measurement technique for monitoring the effectiveness of cathodic protection of underground structures have been characterized. As an example, the results of 1 year measurements of the corrosion rate of cathodically protected steel pipelines and tanks have been presented, which were obtained in one of the Polish power plants.

Wprowadzenie

Kontrola skuteczności ochrony elektrochemicznej (katodowej lub protektorowej) konstrukcji podziemnych realizowana jest najczęściej na podstawie pomiarów potencjału, dokonywanych względem stacjonarnych lub przenośnych elektrod odniesienia. Wyniki pomiarów oceniane są następnie w odniesieniu do przyjętych kryteriów potencjałowych, zawartych w różnego rodzaju normach, wytycznych i zaleceniach ustanowionych w kraju i za granicą [1–2]. Przykładowo dla konstrukcji stalowych zakopanych w gruncie wymagany zakres potencjału wynosi przeważnie od -0.85 do -1.1 V względem elektrody Cu/nas. CuSO_4 . Interpretacja wyników pomiarów potencjału dokonywana jest na ogół wyłącznie w dwóch kategoriach: spełnione lub nie spełnione warunki ochrony, bez próby oceny poziomu jej skuteczności. Podejście takie wynika w pewnej mierze z uwarunkowań historycznych i termodynamicznego charakteru przyjętych kryteriów, które nie przewidują przeliczania wartości potencjału na szybkość korozji.

Z drugiej strony, z teorii kinetyki procesów elektrodowych wynika, że każda, nawet niewielka polaryzacja katodowa powoduje zmniejszenie szybkości korozji stali i pożądane byłoby dysponowanie metodą pozwalającą na jej wymierne określenie. Pozwoliłoby to na utrzymywanie szybkości korozji chronionej katodowo konstrukcji na odpowiednio niskim, dopuszczalnym poziomie, zapewniając zarazem maksymalnie wysoką opłacalność ochrony. Taka koncepcja lansowana jest przez zwolenników tzw. kinetycznych kryteriów ochrony katodowej [3]. Prowadzone w tym kierunku badania zmierzają do opracowania nowych metod pomiaru chwilowej szybkości korozji konstrukcji polaryzowanych. Duże nadzieje w tym zakresie roszą zwłaszcza techniki zmiennoprądowe: elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna [4] oraz harmoniczna spektroskopia impedancyjna [5].

Dopóki jednak nowsze techniki pomiarowe znajdują się w fazie badawczej, użytkownikom instalacji ochrony katodowej pozostaje korzystanie z dotychczas opracowanych metod ilościowej kontroli skuteczności ochrony elektrochemicznej. Możliwości takie zapewniają dwie klasyczne już dzisiaj techniki monitorowania korozji: korozymetria kuponowa oraz korozymetria rezystancyjna. Stosowanie kuponów korozyjnych jest bardzo uciążliwe w przypadku konstrukcji podziemnych, bowiem wiąże się z koniecznością umieszczenia obok chronionej konstrukcji większej ich ilości i okresowego odkopywania w celu określania ubytków masy. Dlatego też technika ta jest stosunkowo rzadko stosowana w praktyce. Znacznie dogodniejsza natomiast jest metoda korozymetrii rezystancyjnej, która nie wymaga usuwania próbek ze środowiska korozyjnego. Wydaje się, że pomimo znacznego postępu w zakresie stosowanej aparatury i sond pomiarowych, który uzyskano w ostatnich latach, metoda ta jest nadal niedoceniana i mało rozpowszechniona.

Niniejsza praca ma na celu przybliżenie metody korozymetrii rezystancyjnej szerszemu gronu użytkowników, którzy pragną dokładniej kontrolować skuteczność działania ochrony elektrochemicznej na swoich konstrukcjach podziemnych.

W pracy przedstawiono przykładowe wyniki badań uzyskane techniką korozymetrii rezystancyjnej na konstrukcjach stalowych usytuowanych na terenie Elektrowni Opole. Pomiary prowadzone są we współpracy ze Specjalistycznym Przedsiębiorstwem Zabezpieczeń Przeciwkorozyjnych CORRPOL w Gdańsku, które wdraża ochronę elektrochemiczną infrastruktury podziemnej elektrowni. Do pomiarów wykorzystano najnowszy, wysokiej jakości sprzęt produkcji zagranicznej (monitor korozyjny i czujniki rezystancyjne) promowany na rynku krajowym przez SPZP CORRPOL.

Podstawy korozymetrii rezystancyjnej

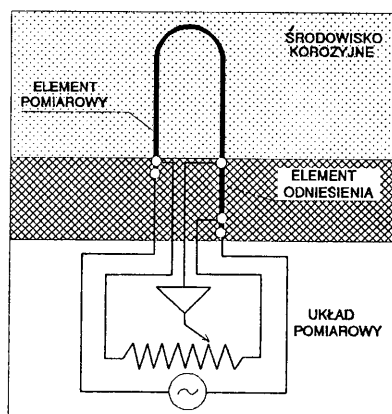
Technika monitorowania "on-line" szybkości procesów korozji z wykorzystaniem pomiarów rezystancji elektrycznej stanowi obecnie obok technik elektrochemicznych jedną z najszerzej stosowanych metod określania szybkości korozji metali w różnego rodzaju instalacjach przemysłowych. Metoda ta jest dobrze udokumentowana literaturowo [6–8] i jest w niektórych krajach przedmiotem normalizacji [9]. Technika pomiarów stanowi rozwinięcie metody grawimetrycznej z tym, że zamiast określania ubytków korozyjnych metodą wagową, oblicza się je na podstawie mierzonych przyrostów rezystancji elektrycznej korodujących próbek. W tym celu umieszcza się w środowisku korozyjnym odpowiednią sondę, której element pomiarowy wykonany jest z metalu będącego przedmiotem badań. Przy założeniu, że element pomiarowy o wydłużonym kształcie (pręt, rurka, taśma) jest wykonany z jednorodnego materiału oraz posiada jednakowy przekrój na całej długości, jego rezystancję w stałej temperaturze określa równanie:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

gdzie

- R – Rezystancja elektryczna, Ω
- ρ – rezystywność metalu, Ωm
- L – długość elementu pomiarowego, m
- S – pole przekroju poprzecznego, m^2 .

Zmiana rezystancji związana jest z roztworzeniem się metalu i jego przejściem w produkty korozji (tlenki lub wodorotlenki) o niskim przewodnictwie elektrycznym. W wyniku procesu korozji następuje stopniowe zmniejszanie przekroju próbki, natomiast jej długość pozostaje niezmienną. Zgodnie z podaną wyżej zależnością, powoduje to wzrost rezystancji próbki w miarę upływu czasu ekspozycji. Śledzenie wielkości zmian rezystancji w czasie umożliwia wnioskowanie o szybkości korozji. W przeciwieństwie do metody wagowej, pomiary rezystancji można prowadzić dowolnie często, co przy odpowiedniej czułości aparatury, zapewnia możliwość monitorowania szybkości korozji praktycznie w sposób ciągły. W celu kompensacji wpływu temperatury na rezystancję korodującej próbki metalowej, mierzy się stosunek rezystancji próbki ekspozowanej na wpływy środowiska do rezystancji umieszczonej w obudowie czujnika tzw. próbki odniesienia, która pozostaje w tej samej temperaturze, ale nie ulega korozji (jest dokładnie odizolowana od środowiska korozyjnego). Mierzone zmiany rezystancji są na ogół bardzo małe, rzędu $10^{-3} + 10^{-4} \Omega$ i wymagają stosowania czułych metod pomiarowych. Najczęściej stosuje się metody mostkowe z wykorzystaniem prądu zmiennego. Zasadę pomiaru zilustrowano na rys.1.

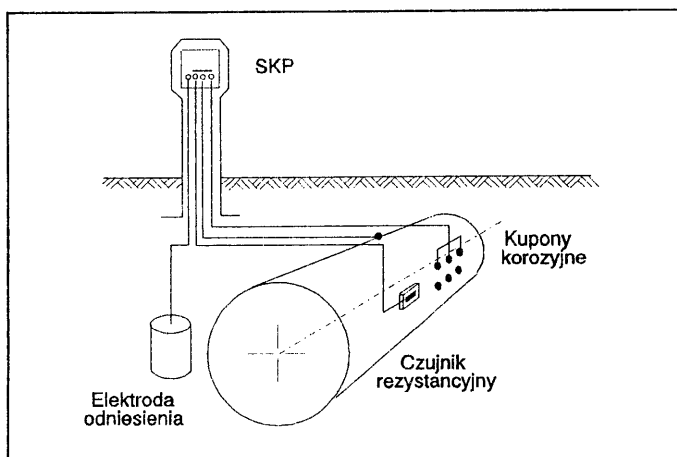


Rys.1. Zasada pomiaru szybkości korozji metodą rezystancyjną.

Metoda korozymetrii rezystancyjnej jako jedna z nielicznych pozwala oceniać ilościowo skuteczność ochrony elektrochemicznej. W celu kontroli skuteczności ochrony katodowej konstrukcji podziemnych umieszcza się w ich pobliżu specjalnie przystosowane do środowiska gruntu czujniki rezystancyjne, które zwiera się elektrycznie z konstrukcją chronioną i wyprowadza końcówki kabli z gniazdami pomiarowymi do słupków kontrolno-pomiarowych. Systematycznie dokonywane pomiary rezystancji umożliwiają ocenę stopnia zabezpieczenia konstrukcji przed korozją.

Metodyka pomiarów i stosowana aparatura

Pomiary skuteczności ochrony katodowej techniką korozymetrii rezystancyjnej dokonywano na stalowych konstrukcjach podziemnych (rurociągach i zbiornikach) jednej z krajowych elektrowni. W tym celu w wytypowanych miejscach chronionych katodowo konstrukcji umieszczono sześć czujników rezystancyjnych typu PR-1100-S20 firmy CORTEST (USA). Czujniki te posiadają płaski element pomiarowy w kształcie taśmy wykonanej ze stali węglowej AISI 1018 o powierzchni ok. 9 cm² i przeznaczone są do zasadniczo do ekspozycji w gruncie. Czujniki PR-1000 produkowane są w trzech wersjach o różnej grubości elementu pomiarowego: 0,125 0,25 i 0,5 mm, które dobiera się w zależności od przewidywanej szybkości korozji oraz czasu eksploatacji czujnika. Do celów niniejszej pracy zastosowano czujniki o najgrubszych elementach pomiarowych, nie pokrytych żadną powłoką ochronną. Czujniki zakopano na głębokości od ok. 1 do 1,5 m na poziomie osi rurociągów, przysuwając je możliwie blisko (tylną stroną) do ich powierzchni zewnętrznej. Czujniki posiadają oprócz przewodów pomiarowych oddzielne przewody elektryczne, które wykorzystano do ich połączenia z konstrukcjami podziemnymi w słupkach kontrolno-pomiarowych. Dodatkowo zamontowano na konstrukcjach kupony korozyjne umożliwiające po dłuższym czasie porównanie wyników pomiarów rezystancyjnych i grawimetrycznych. Sposób montażu czujników oraz kuponów korozyjnych przedstawiono schematycznie na rys.2.

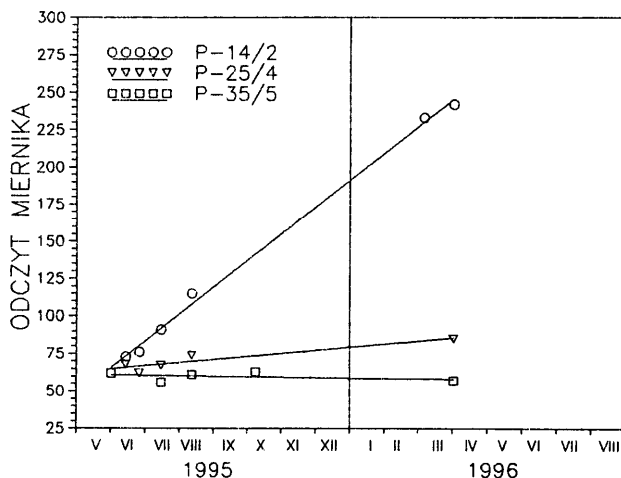


Rys.2. Sposób montażu czujników korozymetrycznych na rurociągach podziemnych

Pomiary rezystancji dokonywano przenośnym korozymetrem rezystancyjnym typu IN-8500 E/R Data Logger firmy CORTEST [10]. Ten sterowany mikroprocesorowo miernik stanowi kompletny system akwizycji i przetwarzania danych, umożliwiając równoczesną obsługę do 150 czujników i zapamiętanie do 3100 danych pomiarowych. Korozymetr wyposażony jest we wskaźnik mozaikowy LCD (4 linie x 20 znaków) do komunikacji z użytkownikiem. Po wykonaniu pomiarów rezystancyjnych na danym czujniku, miernik pozwala na porównanie ich z poprzednimi wynikami oraz automatyczne obliczenie ubytku korozyjnego i szybkości korozji.

Wyniki pomiarów i ich dyskusja

Przykładowe wyniki pomiarów rezystancyjnych uzyskane dla wybranych trzech konstrukcji podziemnych o zróżnicowanej szybkości korozji przedstawiono w postaci graficznej na rys.3. Obrazuje on jak kształtowały się odczyty miernika (wielkość bezwymiarowa proporcjonalna do przyrostu rezystancji czujnika) w okresie ok. 1 roku.



Rys.3. Wyniki pomiarów rezystancyjnych na stalowych konstrukcjach podziemnych:

P-14/2 – rurociąg nie chroniony katodowo

P-25/4 – rurociąg chroniony częściowo

P-35/5 – zbiornik ze 100% ochroną katodową

Wykres ten umożliwia zarazem bezpośrednie porównanie skuteczności zastosowanej ochrony przeciwkorozyjnej, bowiem szybkość korozji czujnika jest wprost proporcjonalna do kąta nachylenia wyznaczonej charakterystyki $R=f(t)$. Z wykresu widać, że najwyższą szybkością korozji charakteryzował się rurociąg stalowy nie objęty zasięgiem ochrony katodowej w punkcie P-14/2. Obiekt ten korodował w przybliżeniu ze stałą szybkością w okresie badań, o czym świadczy stałość przyrostów rezystancji w czasie. Praktycznie 100% skuteczność ochrony katodowej wykazał natomiast zbiornik stalowy kontrolowany w punkcie P-35/5.

Przyrosty rezystancji były w tym miejscu równe zero na poziomie błędów pomiarowych. Pośrednie wyniki uzyskano dla rurociągu stalowego w punkcie P-25/4, który jak wykazały pomiary objęty był niepełną ochroną katodową i korodował z niewielką, ale stałą w czasie szybkością.

Dokładne wartości szybkości korozji V_{KOR} poszczególnych czujników w $\mu\text{m}/\text{rok}$ obliczano wg wzoru:

$$V_{KOR} = \frac{365(X_2 - X_1)K}{1000t}$$

gdzie

X_1, X_2 – odczyty miernika odpowiednio po czasie t_1 i t_2

K – stała czujnika pomiarowego

t – czas pomiędzy odczytami X_1 i X_2

Wyznaczone średnie wartości szybkości korozji łącznie z wynikami pomiarów potencjałów monitorowanych konstrukcji podziemnych we wszystkich 6 punktach pomiarowych za cały okres ekspozycji zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów rezystancyjnych i potencjalowych

Punkt pomiarowy	Potencjał konstrukcji mV wzgl. Cu/CuSO ₄	Średnia szybkość korozji $\mu\text{m}/\text{rok}$	Skuteczność ochrony %	Uwagi
P-14/2	-486 ÷ -410	55,4	0	brak OK
P-15/1	-620 ÷ -570	10,8	80,5	częściowa OK
P-25/4	-665 ÷ -660	6,3	88,6	częściowa OK
P-15/9	-770 ÷ -700	4,4	92,1	częściowa OK
P-25/1	-1012 ÷ -860	3,8	93,1	częściowa OK
P-35/5	-870 ÷ -718	0	100	kompletna OK

Podane wartości potencjałów wyznaczano techniką wyłączeniową i są one pozbawione składowej IR. Skuteczność ochrony katodowej określano w stosunku do szybkości korozji konstrukcji stalowej nie chronionej przed korozją wyznaczonej dla punktu P-14/2. Jest to pewne uproszczenie, ponieważ nie uwzględnia lokalnych różnic korozyjności gruntu w poszczególnych punktach pomiarowych, ale na obecnym etapie badań był to jedyny sposób ilościowego oszacowania skuteczności ochrony. Dokładniejsze dane można będzie uzyskać po przeprowadzeniu pomiarów grawimetrycznych.

Pomimo przyjętych uproszczeń, uzyskane wyniki układają się w logiczną całość. Zgodnie z przewidywaniami stwierdzono regularny wzrost skuteczności ochrony katodowej konstrukcji podziemnych w miarę pogłębiania polaryzacji katodowej. Jedyne dla punktu

P-35/5 uzyskano pewne odstępstwo, ponieważ przy słabszej polaryzacji (potencjał w zakresie $-0,870 \pm -0,718$ V) uzyskano kompletne zahamowanie korozji zbiornika, podczas gdy np. w punkcie P-25/1 głębsza polaryzacja katodowa nie zapewniła całkowitej ochrony rurociągu. Być może wynika to z odmiennego charakteru zabezpieczanych konstrukcji i ich lokalnych warunkowań.

Pewnym zaskoczeniem może być fakt, że w zasadzie wystarczającą skuteczność ochrony katodowej, zapewniającą zmniejszenie szybkości korozji stali do ok. 0,01 mm/rok (skuteczność ochrony ponad 80%) uzyskano przy polaryzacji ok. $-0,6$ V wzgl. elektrody Cu/CuSO₄. Głębsza polaryzacja katodowa powodowała już tylko nieznaczne obniżenie szybkości korozji. Jest to bardzo wartościowa informacja, ponieważ umożliwia przeprowadzenie optymalizacji parametrów ochrony katodowej i znaczne obniżenie jej kosztów.

Zastosowana stosunkowo prosta i wygodna technika korozymetrii rezystancyjnej pozwoliła na uzyskanie precyzyjnych danych odnośnie szybkości korozji monitorowanych konstrukcji podziemnych z dokładnością rzędu 1 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Informacje takie byłyby trudne do uzyskania inną techniką pomiarową, co przemawia na korzyść stosowania pomiarów rezystancyjnych, jako uzupełniających do prowadzonych rutynowo pomiarów potencjałowych.

Wnioski

Przeprowadzone badania w pełni potwierdziły przydatność techniki korozymetrii rezystancyjnej do monitorowania skuteczności ochrony katodowej stalowych konstrukcji podziemnych. Technika ta pozwala na uzyskanie znacznie dokładniejszych informacji odnośnie stopnia zabezpieczenia przeciwkorozyjnego konstrukcji chronionych elektrochemicznie aniżeli klasyczne pomiary potencjału, dostarczając precyzyjnych danych ilościowych odnośnie ich szybkości korozji. Dostępność, szeroki wybór oraz wysoka jakość produkowanych obecnie korozymetrów i czujników rezystancyjnych powinny sprzyjać ich coraz szerszemu wykorzystaniu również w technologii ochrony katodowej konstrukcji podziemnych.

*Badania wykonano w ramach grantu nr 7 TO8B 040 10 finansowanego przez
Komitet Badań Naukowych*

Literatura

- [1] PN-90/E-05030/00 i PN-90/E-05030/01
- [2] NACE Standard RP 0169-92
- [3] R. Juchniewicz, J. Jankowski, W. Sokólski, J. Walaszkowski: *Ochrona przed korozją*, **36**, 121 (1993).
- [4] R. Juchniewicz, J. Jankowski: "Application of Impedance Spectroscopy to the Assessment of Cathodic Protection Effectiveness". W: *Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion*, (J.M. Costa, A.D. Mercer Eds.), EFC, London 1993, vol.2, s. 1401
- [5] M. C. H. McKubre, B. C. Syret: "Harmonic Impedance Spectroscopy for the Determination of Corrosion Rate in Cathodically Protected Systems". W: *Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods*, (G.C. Moran, P.Labin Eds.), ASTM STP 908, Philadelphia 1986, s. 433-458.

- [6] G. L. Cooper: "Sensing Probes and Instruments for Electrochemical and Electrical Resistance Corrosion Monitoring". W: *Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods*, (G. C. Moran, P. Labin Eds.), ASTM STP 908, Philadelphia 1986, s. 237-250.
- [7] NACE Publication 3D170: "Electrical and Electrochemical Methods for Corrosion Rates" (1984 revision).
- [8] Corrosion Monitoring Primer, Rohrback Cosasco Systems, Santa Fe Springs, CA, 1990, Edition 4.
- [9] ASTM Designation: G 96-90 Standard Guide for On-Line Monitoring of Corrosion in Plant Equipment (Electrical and Electrochemical Methods)
- [10] IN-8500 E/R Data Logger Reference Guide, 20250-001, Cortest Instruments Systems, Inc. 1994.