



WPLYW KOROZJI WZEROWEJ NA OCENĘ SKUTECZNOŚCI OCHRONY KATODOWEJ METODĄ KOROZYMETRII REZYSTANCYJNEJ

EFFECT OF PITTING CORROSION ON EVALUATION OF CATHODIC PROTECTION EFFICIENCY BY ELECTRIC RESISTANCE METHOD

Jezmar Jankowski
SPZP CORRPOL Sp. z o.o.

Słowa kluczowe: ochrona katodowa, korozja wżerowa, korozymetria rezystancyjna
Keywords: cathodic protection, pitting corrosion, electric resistance method

Streszczenie

Do oceny skuteczności ochrony katodowej stalowych konstrukcji podziemnych, coraz szersze zastosowanie znajduje korozymetria rezystancyjna. Ta czuła technika pomiarowa umożliwia precyzyjne określanie szybkości korozji metalu przy założeniu, że korozja ma charakter równomierny i powoduje jednakowe zmniejszenie przekroju elementu pomiarowego czujnika na całej jego długości. W przypadku korozji nierównomiernej można spodziewać się znaczących błędów w ocenie wyników pomiarów szybkości korozji. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki symulacji komputerowych ukazujące, w jaki sposób na wyniki pomiarów rezystancyjnych może wpływać korozja wżerowa. Określono wpływ modelowych wżerów o przekroju kołowym z uwzględnieniem ich ilości, średnicy oraz głębokości na wyniki pomiarów rezystancyjnych i wyznaczane na tej podstawie liniowe ubytki korozyjne metalu.

Abstract

The electric resistance method is becoming increasingly widespread for evaluation of the cathodic protection effectiveness of steel underground structures. This sensitive measuring technique allows precise determination of the corrosion rate of metal, assuming the corrosion is uniform, and results in a uniform reduction in cross-section of the ER probe sensing element over its entire length. In the case of non-uniform corrosion, significant errors in corrosion velocity measurements may be expected. This paper presents the results of computer simulations showing how pitting corrosion can affect the results of resistance measurements. The influence of model pits of circular cross-section on resistance measurements was determined, and thus, the linear corrosion losses, accounting for the number of pits, their diameter and depth.

1. Wprowadzenie

Zgodnie z kryteriami sformułowanymi w normach europejskich [1,2], międzynarodowych [3], jak również niektórych standardach krajowych [4], prawidłowo chronione katodowo konstrukcje stalowe w gruntach lub w wodach nie powinny ulegać procesom korozyjnym z szybkością większą niż 0,01 mm/rok. Do kontroli szybkości korozji konstrukcji podziemnych lub żelbetowych polaryzowanych katodowo coraz częściej stosowana jest technika korozymetrii rezystancyjnej opisana szerzej w pracach [5-9]. Ogólnie biorąc metoda ta polega na instalowaniu w wybranych lokalizacjach zabezpieczanych konstrukcji specjalnych czujników korozymetrycznych, zwanych także czujnikami ER (z ang. Electric Resistance Probe), które podobnie jak elektrody symulujące łączy się elektrycznie z chronioną konstrukcją w punktach kontrolno-pomiarowych. Okresowo dokonywane na czujnikach pomiary przyrostów rezystancji pozwalają kontrolować wielkość ubytków korozyjnych stali w warunkach polaryzacji katodowej i oceniać na tej podstawie skuteczność ochrony katodowej bez konieczności dokonywania uciążliwych odkrywek. W kraju w ostatnich 20-tu latach zainstalowano na różnego typu obiektach ponad 1000 czujników korozymetrycznych [10]. Od wiarygodności dokonywanych na nich pomiarów zależy w dużej mierze ocena skuteczności ochrony katodowej, a więc i bezpieczeństwo eksploatowanych obiektów.

Czujniki korozymetryczne zapewniają uzyskanie dokładnych informacji o postępie korozji przy spełnieniu pewnych fundamentalnych założeń, z których istotną rolę odgrywa forma zaatakowania korozyjnego. Obliczenia ubytków korozyjnych na podstawie przyrostu rezystancji dokonuje się przy założeniu, że element pomiarowy czujnika koroduje równomiernie, a więc zmniejsza w przybliżeniu równomiernie swoją grubość na całej powierzchni. W praktyce, w zależności od uwarunkowań środowiskowych, obserwuje się różne formy korozji, które mogą zniekształcać wyniki dokonywanych pomiarów rezystometrycznych. Zagadnienie jest o tyle istotne, że obraz powierzchni czujników korodujących w gruncie czy żelbecie jest z reguły niedostępny dla serwisantów wykonujących pomiary skuteczności ochrony katodowej. W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ korozji wżerowej na wyniki uzyskiwane techniką korozymetryczną na przykładzie trzech wybranych typów czujników rezystancyjnych. Wzięto pod uwagę najczęściej stosowane w Polsce czujniki produkcji krajowej o symbolach: ER-1/1,0-FC, ER-5/1,0-FC (płaskie dwupętlowe) oraz czujnik ER-5/0,5-FS (płaski taśmowy).

2. Metodyka obliczeń

Podstawę teoretyczną techniki korozymetrii rezystancyjnej stanowi II prawo Ohma, które wiąże rezystancję R metalowego przewodnika o stałym przekroju poprzecznym z jego wymiarami:

$$R = \rho \frac{L}{P_p} \quad (1)$$

gdzie: ρ – rezystywność metalu,
L – długość,
 P_p – pole przekroju poprzecznego.

Metalowe elementy pomiarowe czujników korozymetrycznych projektuje się najczęściej w taki sposób, aby na skutek procesu korozji zmniejszyły wyłącznie swoją grubość przy niezmienniej długości. W przypadku wydłużonego elementu ukształtowanego w postaci taśmy o długości L i szerokości W , jego grubość G jest odwrotnie proporcjonalna do rezystancji i może być wyliczona z zależności:

$$G = \rho \frac{L}{WR} \quad (2)$$

W celu ograniczenia czułości na zmiany temperatury, która silnie wpływa na rezystywność metalu, czujniki korozymetryczne wyposaża się w co najmniej dwa elementy pomiarowe i wyznacza przyrosty rezystancji metodą porównawczą. Mierzy się wzrost rezystancji R_k elementu eksponowanego w środowisku korozyjnym w stosunku do rezystancji R_o elementu odniesienia osłoniętego przed dostępem środowiska, ale pozostającego w tej samej temperaturze. Większość produkowanych na świecie typów czujników korozymetrycznych posiada w stanie wyjściowym stosunek rezystancji elementu odniesienia R_o do rezystancji elementu korodującego R_k bliski jedności. Ubytek korozyjny takich czujników, określany jako zmniejszenie grubości ΔG elementu pomiarowego, wyznacza się najczęściej za pomocą uproszczonej zależności opisanej wzorem:

$$\Delta G = G_0(1 - S) \quad (3)$$

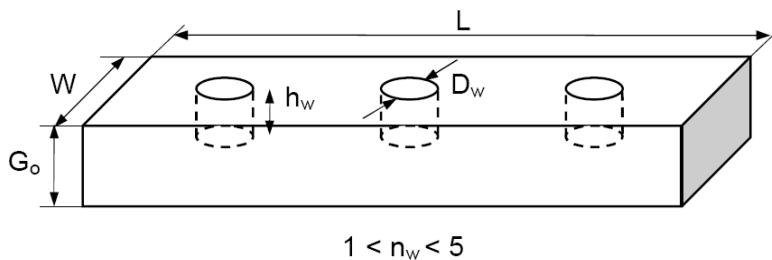
gdzie: G_0 – grubość początkowa elementu korodującego,
 S – stosunek rezystancji R_o/R_k .

W przypadku czujników krajowej produkcji SPZP CORRPOL wykorzystuje się bardziej dokładną zależność, w której wprowadzono poprawki związane z rezystancją przyłączy pomiarowych:

$$\Delta G = G_0 \left(1 - \frac{AS}{B - S} \right) \quad (4)$$

gdzie: A, B – stałe dla poszczególnych typów czujników.

W celu oszacowania, jak wpływa korozja nierównomierna na wyniki pomiarów rezystometrycznych, założono obecność na powierzchni elementu pomiarowego czujników rezystancyjnych kilku regularnych wżerów o przekroju kołowym i głębokości sięgającej do 100% grubości. Przyjęty do obliczeń model geometryczny elementu pomiarowego czujnika ER z wżerami korozyjnymi przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Model geometryczny elementu pomiarowego czujnika ER z wżerami korozyjnymi
 Fig.1. The geometric model of the ER probe sensing element with corrosion pits

Biorąc pod uwagę powyższy model oraz stosując operacje całkowania do obliczeń rezystancji lokalnych wzdłuż przewodnika elektrycznego o zmiennym przekroju i stałej rezystywności, wyprowadzono następującą zależność ogólną na rezystancję wzdłużną elementu korodującego wżerowo:

$$R = \frac{\rho}{G_o} \left(\frac{L - n_w D_w}{W} + \frac{4 n_w G_o D_w}{4 W G_o - \pi D_w h_w} \right) \quad (5)$$

gdzie: D_w – średnica wżeru,
 h_w – głębokość wżeru,
 n_w – ilość wżerów,
 pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Dane techniczne czujników wykorzystane do obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie parametrów technicznych analizowanych czujników ER
 Table 1. Summary of technical parameters for the analyzed ER probes

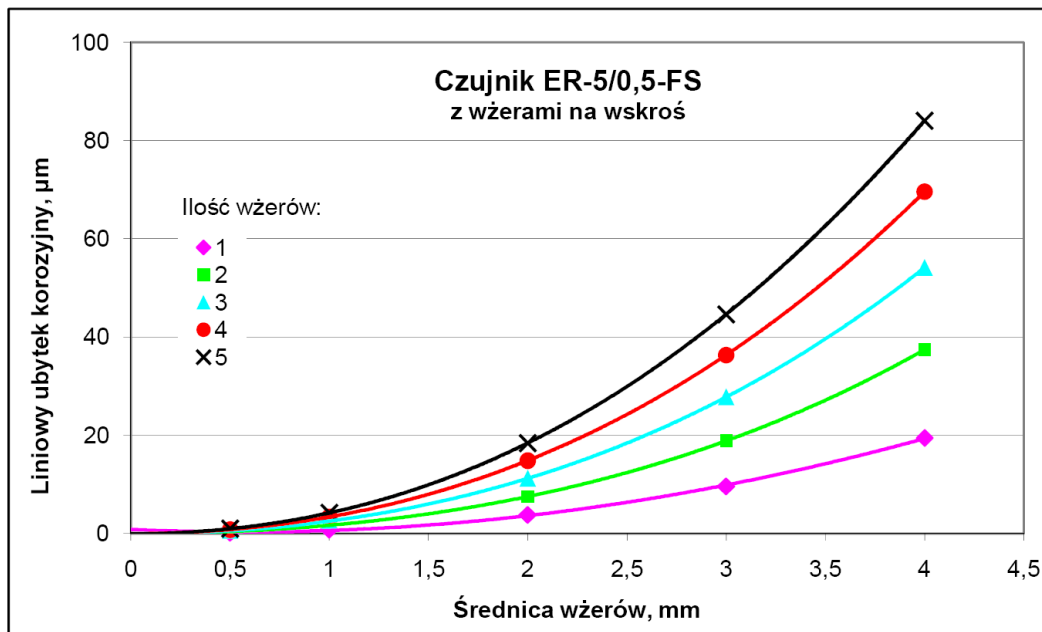
Typ	Budowa	L, mm	W, mm	G _o , mm	Stała A	Stała B
ER-5/0,5-FS	Płaski taśmowy	72,5	8,0	0,5	6,25	7,00
ER-5/1,0-FC	Płaski dwupętlowy	126	4,0	1,0	6,004	6,726
ER-1/1,0-FC	Płaski dwupętlowy	57,0	1,8	1,0	5,741	6,432

3. Wyniki obliczeń i ich omówienie

Korzystając z zależności (5) obliczono dla wytypowanych czujników ER przyrosty rezystancji spowodowane obecnością od 1 do 5 wżerów korozyjnych oraz przeliczono je według wzoru (4) na liniowe ubytki korozyjne stali, jakie miałyby miejsce w przypadku korozji ogólnej. Na wstępie wzięto pod uwagę wżery o głębokościach równych grubościom elementów pomiarowych (wżery przechodzące na wskroś) i średnicach sięgających do połowy szerokości tych elementów. Wyniki obliczeń zamieszczono w postaci wykresów na rys. 2-4.

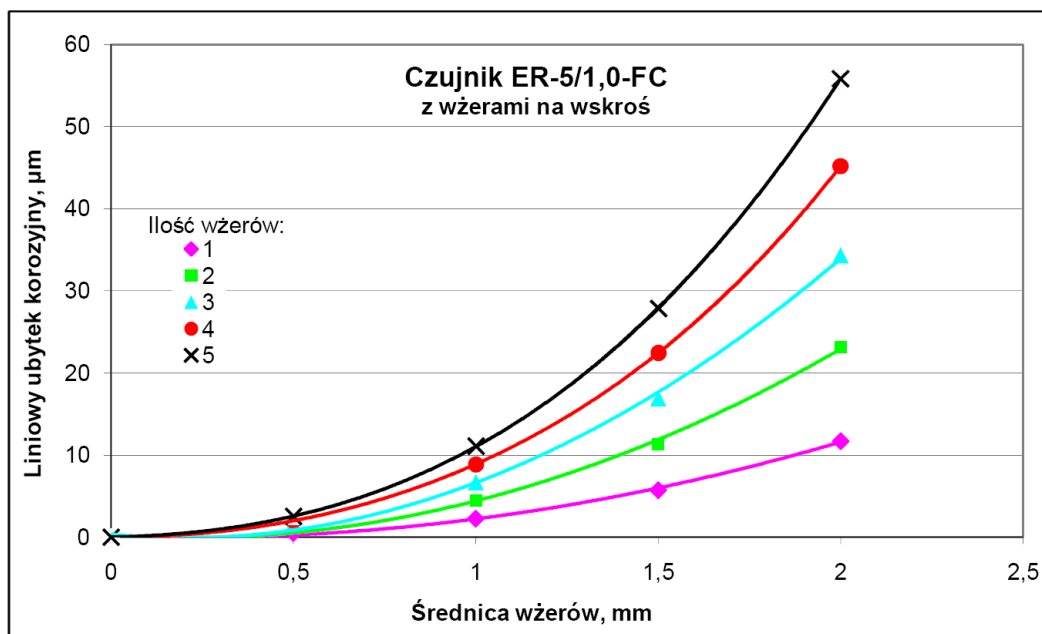
W dalszych etapach analizy oceniono wpływ wżerów o różnej głębokości na wyniki pomiarów korozymetrycznych na przykładzie najbardziej popularnego czujnika typu ER-1/1,0-FC. Wykonano obliczenia dla elementu pomiarowego zawierającego od 1 do 5 wżerów o średnicy 1 mm i głębokościach w zakresie od 20% do 100% grubości elementu. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie graficznej na rys. 5.

Z uzyskanych danych wynika, że dla wszystkich trzech analizowanych typów czujników ER obserwuje się szybki wykładniczy wzrost pozornych liniowych ubytków korozyjnych wraz ze wzrostem średnicy wżerów. Zgodnie z przewidywaniami wzrost ten jest tym szybszy im więcej wżerów występuje na elemencie pomiarowym czujnika. Już pojedyncze wżery o większych średnicach sięgających połowy szerokości elementu pomiarowego skutkują wskazaniem pozornych ubytków korozyjnych powyżej 10 μm, co zawiąza rzeczywisty średni ubytek metalu i w konsekwencji może rzutować na błędną ocenę skuteczności ochrony katodowej.



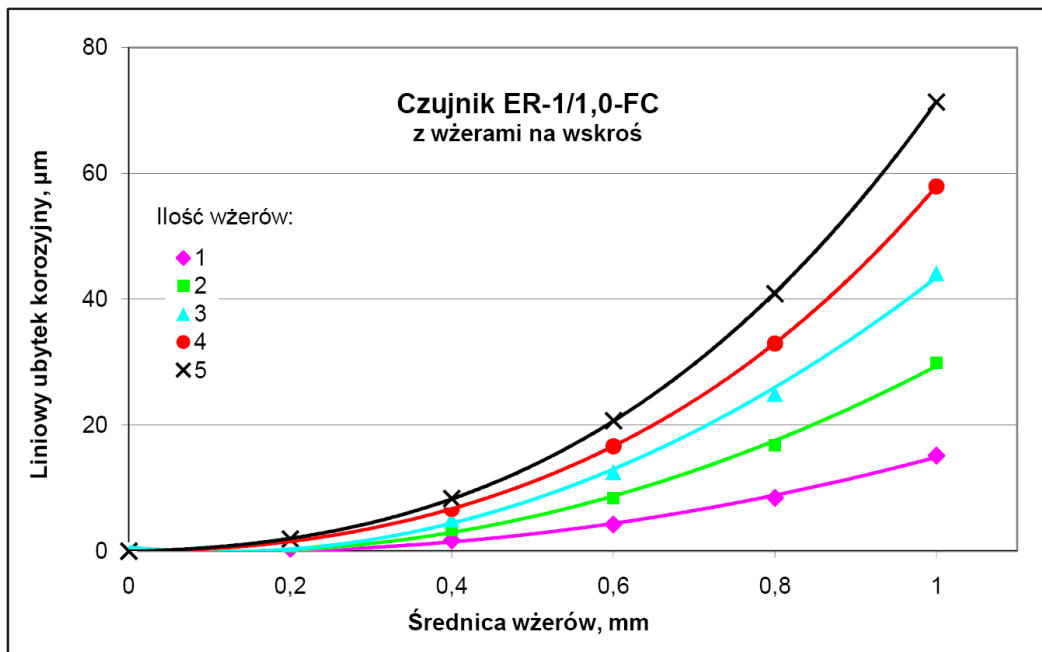
Rys. 2. Pozorne liniowe ubytki korozyjne w funkcji ilości i średnicy wżerów korozyjnych dla czujnika typu ER-5/0,5-FS.

Fig. 2. The apparent linear corrosion losses in function of number and diameter of corrosion pits for the ER probe type ER-5/0,5-FS.



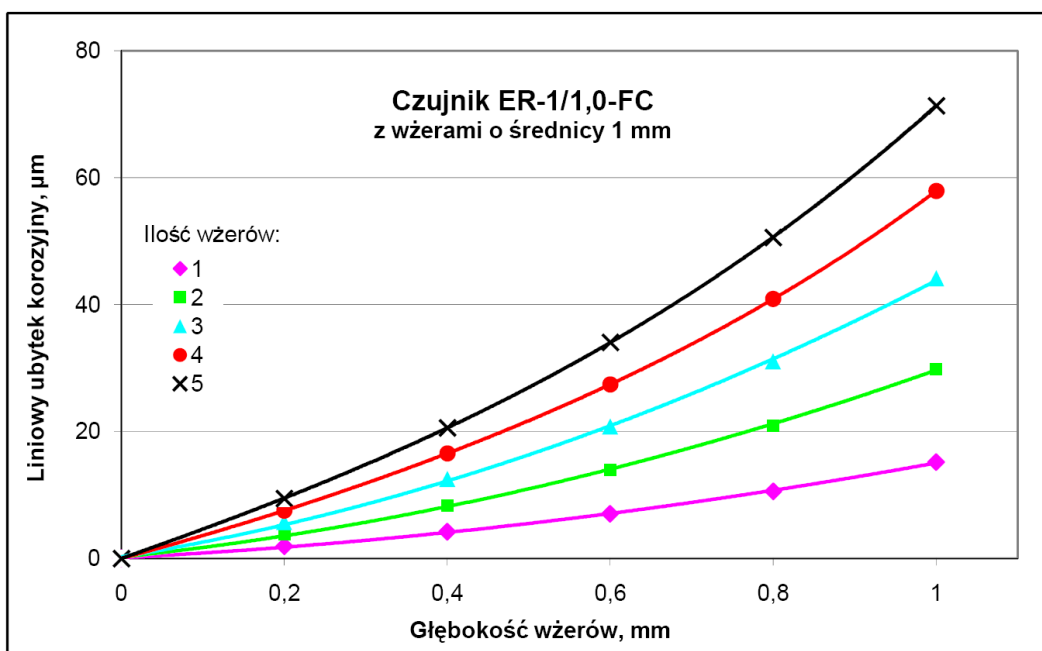
Rys. 3. Pozorne liniowe ubytki korozyjne w funkcji ilości i średnicy wżerów korozyjnych dla czujnika typu ER-5/1,0-FC.

Fig. 3. The apparent linear corrosion losses in function of number and diameter of corrosion pits for the ER probe type ER-5/1,0-FC.



Rys. 4. Pozorne liniowe ubytki korozyjne w funkcji ilości i średnicy wżerów korozyjnych dla czujnika typu ER-1/1,0-FC.

Fig. 4. The apparent linear corrosion losses in function of number and diameter of corrosion pits for the ER probe type ER-1/1,0-FC.



Rys. 5. Pozorne liniowe ubytki korozyjne w funkcji ilości i głębokości wżerów korozyjnych dla czujnika typu ER-1/1,0-FC.

Fig. 5. The apparent linear corrosion losses in function of number and depth of corrosion pits for the ER probe type ER-1/1,0-FC.

Porównując wpływ wżerów o jednakowej średnicy na wyniki pomiarów rezystometrycznych trzech analizowanych czujników widać, że najmniej czuły na korozję wżerową jest czujnik typu ER-5/0,5-FS o najszerszym elemencie pomiarowym. Natomiast najbardziej wrażliwy na korozję wżerową jest czujnik typu ER-1/1,0-FC o najwęższej ścieżce rezystancyjnej.

Zależności przedstawione na rys. 5 wskazują, że im większa jest głębokość wżerów tym większe są wyznaczone liniowe ubytki korozyjne, przy czym podobnie do zależności ukazanych na rys. 2-4 mają one również charakter wykładniczy, ale o łagodniejszym przebiegu.

Przy typowej czułości aparatury korozymetrycznej na poziomie 0,1% przyrosty rezystancji analizowanych czujników ER spowodowane korozją wżerową są w większości badanych przypadków wyraźnie wykrywalne. Poniżej progu wykrywalności są jedynie najmniejsze wżery obecne w małej ilości, np. w przypadku czujnika typu ER-5/1,0-FC są to 1 lub 2 wżery o średnicy $D_w \leq 0,5$ mm, kiedy to $\Delta G \leq 1,0$ μm .

Sprawdzono obliczeniowo, że wyznaczone techniką rezystometryczną liniowe ubytki korozyjne czujników korodujących wżerowo są większe, aniżeli wynikałoby to z równomiernego rozłożenia ubytków lokalnych na całą powierzchnię czujników, i to im większa jest średnica wżerów, tym większe..

Pomimo znanych od dawna pewnych ograniczeń, jakie posiada technika korozymetrii rezystancyjnej, na korzyść jej stosowania w technologii ochrony katodowej przemawia fakt, że polaryzacja katodowa stali zapobiega rozwojowi korozji wżerowej, jak również innych form korozji lokalnej [11]. Efekty takie obserwuje się nawet przy niepełnej ochronie katodowej, a więc istnieje stosunkowo niewielkie prawdopodobieństwo, że chronione katodowo wraz z zabezpieczanymi przed korozją konstrukcjami czujniki ER będą korodować wżerowo. Tym niemniej, aby być pewnym, że mierzone za ich pomocą ubytki korozyjne oraz wyznaczone na ich podstawie szybkości korozji są wiarygodne, a zatem pozwalają na prawidłową ocenę skuteczności ochrony katodowej, należałoby dokonywać wybiórczych odkrywek i sprawdzać stan powierzchni czujników korozymetrycznych. Podejrzenie korozji wżerowej czujników może być uzasadnione zwłaszcza w przypadku uzyskiwania wyników pomiarów wskazujących na wyższe szybkości korozji stali przekraczające kryterium 10 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Natomiast, jeśli wyznaczone metodą korozymetrii rezystancyjnej szybkości korozji spełniają kryterium kinetyczne ochrony katodowej, to uzyskiwane wyniki raczej nie powinny budzić wątpliwości.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej dotyczącej wpływu korozji wżerowej czujników ER na mierzone ubytki metalu techniką korozymetrii rezystancyjnej można sformułować następujące wnioski:

- Obecność już niewielkiej ilości wżerów korozyjnych może w istotny sposób zniekształcać wyniki pomiarów rezystometrycznych sugerując występowanie nadspodziewanie dużych ubytków korozyjnych, a w konsekwencji zawyżonych liniowych szybkości korozji konstrukcji chronionych katodowo,

- Najwyższą czułość na obecność wżerów korozyjnych wykazują czujniki ER o największym elemencie pomiarowym i odwrotnie. Spośród czujników krajowych są to odpowiednio czujniki typu ER-1/1,0-FC oraz ER-5/0,5-FS.
- Nie można bezkrytycznie traktować uzyskanych wyników pomiarów rezystometrycznych, jeżeli nieznan jest charakter korozji czujników. Zaleca się dokonywanie wybiórczych kontroli stanu powierzchni czujników ekspozycyjnych w gruncie lub żelbecie i sprawdzanie czy korodują równomiernie, zwłaszcza w przypadkach, gdy wyniki pomiarów wskazują na szybkości korozji przekraczające kryterium kinetyczne ochrony katodowej.

5. Bibliografia

- [1] PN-EN 12954 Ochrona katodowa konstrukcji metalowych w gruntach lub w wodach - Zasady ogólne i zastosowania dotyczące rurociągów.
- [2] PN-EN 13636:2006 Ochrona katodowa metalowych zbiorników podziemnych i związanych z nimi rurociągów.
- [3] ISO 15589-1:2003 Petroleum and natural gas industries – Cathodic protection of pipeline transportation systems – Part 1: On-land pipelines.
- [4] ST-IGG-0602:2009 Ochrona przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych. Ochrona katodowa, Projektowanie, budowa i użytkowanie.
- [5] J. Jankowski, J. Szukalski: Zastosowanie korozymetrii rezystancyjnej do pomiarów skuteczności ochrony katodowej konstrukcji podziemnych, Materiały IV Krajowej Konferencji „Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej”, Jurata 1996, s. 51-58.
- [6] J. Jankowski, W. Sokólski: Monitorowanie skuteczności ochrony katodowej techniką rezystometryczną, Ochrona przed Korozją **46**, nr 8, 218 (2003).
- [7] J. Jankowski: Korozymetria jako wiarygodna technika pomiaru skuteczności ochrony katodowej, Materiały VIII Krajowej konferencji „Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej”, Jurata 2004, s. 29-39.
- [8] W. Sokólski, J. Jankowski: Stara metoda w nowej odsłonie – zastosowanie korozymetrii w technologii ochrony katodowej, Ochrona przed Korozją **52**, nr 4-5, 128 (2009).
- [9] M. Fiedorowicz, M. Jagiełło: Korozymetria rezystancyjna w badaniach korozji podziemnych rurociągów, Ochrona przed korozją **53**, nr 8, 391 (2010).
- [10] J. Jankowski, prace niepublikowane, SPZP CORRPOL 2017.
- [11] R. Juchniewicz, Katodowa, protektorowa i anodowa ochrona metali w technice, PWT Warszawa 1960.