



KOROZJA PRZEMIENNOPRĄDOWA A OCHRONA KATODOWA PODZIEMNYCH RUROCIĄGÓW

AC CORROSION AND CATHODIC PROTECTION OF BURIED PIPELINES

Marek Fiedorowicz, Michał Jagiełło

OGP Gaz-System
Oddział w Gdańsku

Słowa kluczowe: korozja, korozja prądu przemiennego, ochrona katodowa
Keywords: corrosion, a.c. corrosion, cathodic protection

Streszczenie

Wg EN 12954 prawdopodobieństwa korozji powodowanej przez prąd przemienny można nie uwzględniać, jeżeli gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy odsłoniętą powierzchnią stalowej ścianki a środowiskiem elektrolitycznym jest mniejsza niż 30 A/m^2 , a potencjał konstrukcji spełnia kryteria ochrony katodowej. Ochrona katodowa generalnie nie powstrzymuje korozji powodowanej przez prąd przemienny dużej gęstości. Co więcej, wyniki niektórych badań wskazują, że towarzysząca przepływowi prądu katodowego alkalizacja środowiska, może wręcz stymulować korozję prądu przemiennego stali węglowej. Jednakże autorzy zaobserwowali na gazociągach zabezpieczonych ochroną katodową, że jeśli ochrona katodowa prowadzi do wytworzenia osadów katodowych w uszkodzeniu powłoki izolacyjnej, wówczas szybkość korozji prądu przemiennego zmniejsza się do akceptowalnego poziomu.

Summary

According to EN 12954, corrosion power resulted from an alternating current, can be leave out of account on the conditions that the density of the alternating current, between uncovered steel wall and electrolytical environment, is under 30 A/m^2 and potential of the structure keeps requirements of cathodic protection. When alternating current is of large density, cathodic protection, in general, doesn't prevent corrosion. Moreover some reports show, that alkalization of environment can stimulate alternating current corrosion of carbon steel. We have observed on gas pipings that corrosion rate has diminished down to accepted value in the case when cathodic protection has generated deposits in damaged insulating coats.

Wprowadzenie

Korozja powodowana przez elektryczny prąd przemienny wydaje się być najpoważniejszym zagrożeniem korozyjnym podziemnych rurociągów stalowych zabezpieczonych ochroną katodową (innym istotnym zagrożeniem takich rurociągów jest korozja odcinków ułożonych w stalowych rurach ochronnych, z którymi są galwanicznie zwarte). Co więcej, ochrona katodowa - technologia, której celem i istotą jest praktyczne powstrzymanie korozji za pomocą wymuszonego, ukierunkowanego przepływu prądu stałego - może wręcz stymulować korozję prądu przemiennoprowadowego!

Mechanizm korozji prądu przemiennoprowadowego nie jest jeszcze do końca rozpoznany, aczkolwiek wiedza na ten temat jest coraz większa.

W niedawnej przeszłości, jeszcze w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia uznawano, że prąd przemienny nie stanowi istotnego zagrożenia korozyjnego dla stali, w pełni doceniano natomiast korozyjne oddziaływanie stałych (wolnozmiennych) prądów błędzących. Przykładowo, w krajowych normatywach BN-85/2320-01 [1] oraz w PN-90/E-05030/01 [2], kwestia zagrożenia korozyjnego rurociągów powodowanego przez stałe prądy błędzące jest szeroko potraktowana, natomiast zagrożenie korozyjne powodowane przez prądy przemiennoprowadowe jest całkowicie nie uwzględnione. Co więcej, do dzisiaj nie jest zdefiniowane pojęcie korozji prądu przemiennoprowadowego. Autorzy w jednej ze swoich publikacji [3] próbowali używać takiego terminu „korozja prądu przemiennoprowadowego”, jednakże z powodu zastrzeżenia recenzenta, że taka korozja nie jest nigdzie zdefiniowana, zmuszeni byli użyć zwrotu „korozja powodowana przez prąd przemienny”.

Obecnie uznaje się, że prąd przemienny przepływający pomiędzy stalowym podziemnym rurociągiem a ziemią może powodować istotne uszkodzenia korozyjne. Skala zagrożenia korozyjnego zależy m.in. od gęstości tego prądu. Wg PN-EN 12954 [4], prawdopodobieństwa korozji można nie uwzględniać, jeśli gęstość prądu przemiennoprowadowego na 1 cm^2 odsłoniętej powierzchni (np. sondy) jest mniejsza niż 30 A/m^2 . Natomiast wg doniesień literaturowych korozję prądu przemiennoprowadowego stwierdzano przy mniejszych gęstościach, ok. 20 A/m^2 [5].

Wiele kryteriów oceny zagrożenia korozją prądu przemiennoprowadowego podano w niedawno ustanowionej normie CEN/TS 15280:2005 [6]. Zdaniem autorów, część spośród podanych w tej normie kryteriów oceny zagrożenia jest co najmniej dyskusyjna. Zauważa się pewną sprzeczność pomiędzy kryteriami podanymi w tej normie a kryterium podanym w PN-EN 12954.

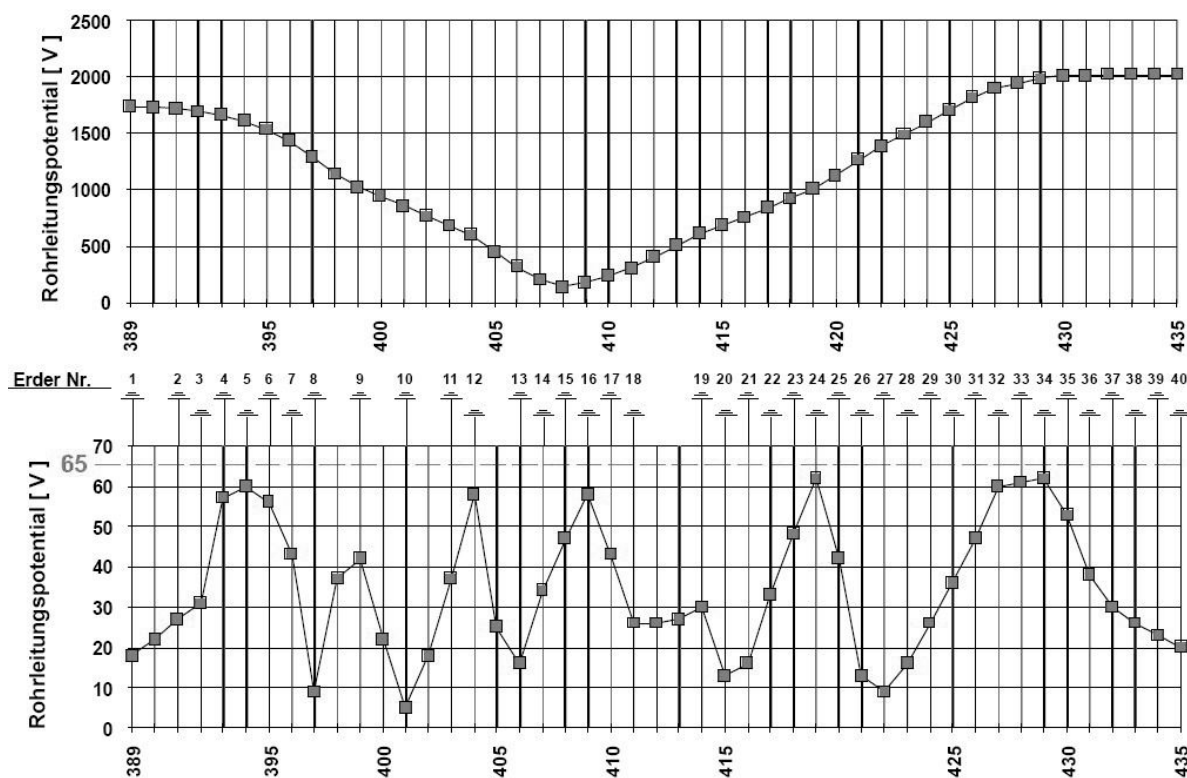
W kwestii wpływu ochrony katodowej na korozję prądu przemiennoprowadowego w literaturze spotyka się w zasadzie przeciwstawne stanowiska. Z jednej strony twierdzi się, że jeśli gęstość prądu polaryzacji katodowej będzie stanowić odpowiednio dużą część gęstości prądu przemiennoprowadowego przepływającego pomiędzy odsłoniętą powierzchnią stalową a środowiskiem elektrolitycznym, wówczas korozja prądu przemiennoprowadowego ulegnie powstrzymaniu. Z drugiej strony twierdzi się, że alkalizacja przyległego środowiska towarzysząca polaryzacji katodowej powierzchni stalowej, szczególnie w małych uszkodzeniach powłoki izolacyjnej występujących w gruntach niskooporowych, stymuluje korozję prądu przemiennoprowadowego.

Autorzy na podstawie wieloletnich obserwacji i pomiarów zauważają, że jeśli polaryzacja katodowa prowadzi do wytworzenia się w uszkodzeniu powłoki izolacyjnej zwartych osadów katodowych – a tak dzieje się bardzo często – wówczas korozja prądu przemiennoprowadowego ulega istotnemu spowolnieniu, praktycznie – powstrzymaniu.

1. Mechanizm korozji prądu przemiennoprowadowego podziemnych rurociągów chronionych katodowo

Zjawisko korozji stali węglowej na skutek przepływu prądu przemiennoprowadowego przez granicę faz metal - elektrolit było znane i badane już wiele lat temu [7]. Np. już w 1958 r. ukazała się

praca [8], której autorzy wykazali, że prąd przemienny o gęstości powyżej ok. 40 A/m^2 wywołuje korozję próbek ze stali węglowej, zaś „efektywność” roztwarzania stali przez prąd przemienny w stosunku do prądu stałego o równoważnym ładunku sięga do 1%. Problem realnego zagrożenia korozją prądu przemiennoprowadzących rurociągów podziemnych dostrzeżono dopiero 30 lat później - po awarii gazociągu w południowych Niemczech, wywołanej, jak wykazały wnikliwe badania, przez korozję prądu przemiennoprowadzącego [5]. Do tego czasu problem indukowania się napięć przemiennych w podziemnych rurociągach, ułożonych w sąsiedztwie linii WN lub linii trakcyjnych prądu przemiennego, uwzględniano przy projektowaniu i w eksploatacji rurociągów jedynie w kontekście zapewnienia zgodności z przepisami ochrony przeciwporażeniowej. Na przykład na jednym z gazociągów w Niemczech, którego trasa na wielu odcinkach została wytyczona wzdłuż linii WN, na etapie projektowania obliczono, że w warunkach roboczego obciążenia linii, napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią może sięgać 2000 V (!). Po zaprojektowaniu i zastosowaniu odpowiednich zabezpieczeń – kilkudziesięciu uziomów rozłożonych wzdłuż trasy gazociągu, w tym uziomów głębinowych, napięcia te udało się obniżyć poniżej dopuszczalnego przez przepisy poziomu 65 V (rys. 1) [9].



Rys. 1. Napięcie pomiędzy rurociągiem a ziemią odniesienia indukowane od linii WN, przy roboczym obciążeniu linii, bez - i z zastosowanym systemem doziemień [9]

Gęstość prądu w defekcie izolacji w kształcie koła można w przybliżeniu oszacować z zależności:

$$j = \frac{8U}{\pi d \rho} \quad (1)$$

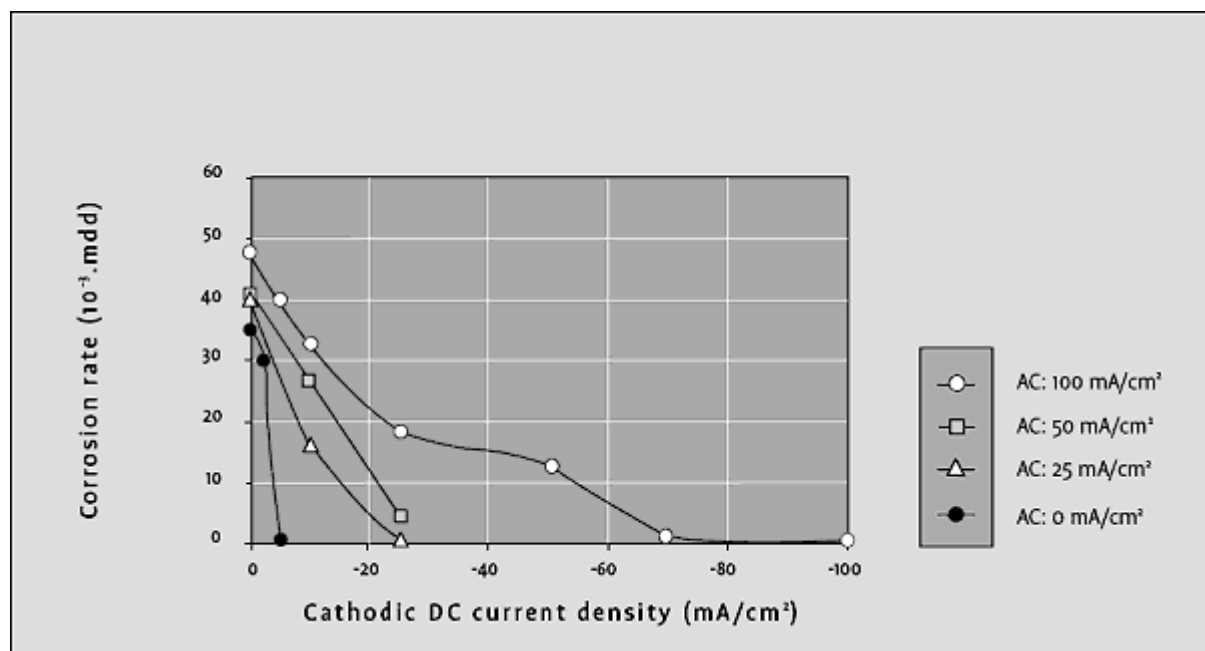
gdzie: U - napięcie pomiędzy rurociągiem a ziemią, d – średnica defektu, ρ - rezystywność gruntu

Zatem już przy napięciu pomiędzy rurociągiem a ziemią $U = 20 \text{ V}$, gęstość prądu przemiennego przepływającego przez defekt o średnicy $d = 1,13 \text{ cm}$ (powierzchni

$S = 1,0 \text{ cm}^2$), znajdujący się w gruncie o rezystywności $\rho = 20 \text{ }\Omega\text{m}$, będzie w przybliżeniu równa $j = 225 \text{ A/m}^2$ (!). Przyjmuje się, że prąd stały o natężeniu 1 A/m^2 , wypływając ze stalowej konstrukcji do środowiska, w ciągu roku rozтворя 9,1 kg stali, co odpowiada ubytkowi grubości 1,2 mm. Prąd przemienny o gęstości 200 A/m^2 , przy „efektywności” rozтворя 1% w stosunku do prądu stałego, może wywołać ubytek 2,4 mm!

Należałoby zatem w tym miejscu postawić pytanie, dlaczego w krajach wysoko uprzemysłowionych przy projektowaniu oraz eksploatacji podziemnych rurociągów dalekosieżnych przez kilkadziesiąt lat bagatelizowano zagrożenie korozją przeniennoprądową, dopuszczając występowanie napięć przemiennych pomiędzy rurociągiem a ziemią rzędu kilkudziesięciu V? Sensowna odpowiedź może być tylko jedna – najwidoczniej przez kilkadziesiąt lat nie stwierdzono przypadku korozji lub awarii korozyjnej, który by można w sposób jednoznaczny przypisać działaniu korozji przeniennoprądowej. Ze względu na skalę potencjalnego zagrożenia korozją przeniennoprądową nie można tego faktu przypisać szczęśliwemu zbiegowi okoliczności. Jedynym racjonalnym wytłumaczeniem jest ochronne działanie funkcjonującej ochrony katodowej, którą są obligatoryjnie objęte poddane oddziaływaniom prądów przemiennych rurociągi dalekosieżne, czyli głównie gazociągi i rurociągi paliwowe.

Wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że prąd stały (prąd ochrony katodowej), ogranicza, a przy dostatecznie dużej gęstości, całkowicie hamuje korozyjne oddziaływanie prądu przemiennego (rys. 2) [10]. Zachodzi to wówczas, gdy gęstość prądu polaryzacji katodowej stanowi odpowiednio dużą część gęstości prądu przemiennego, a więc przy bardzo dużej gęstości prądu polaryzacji.

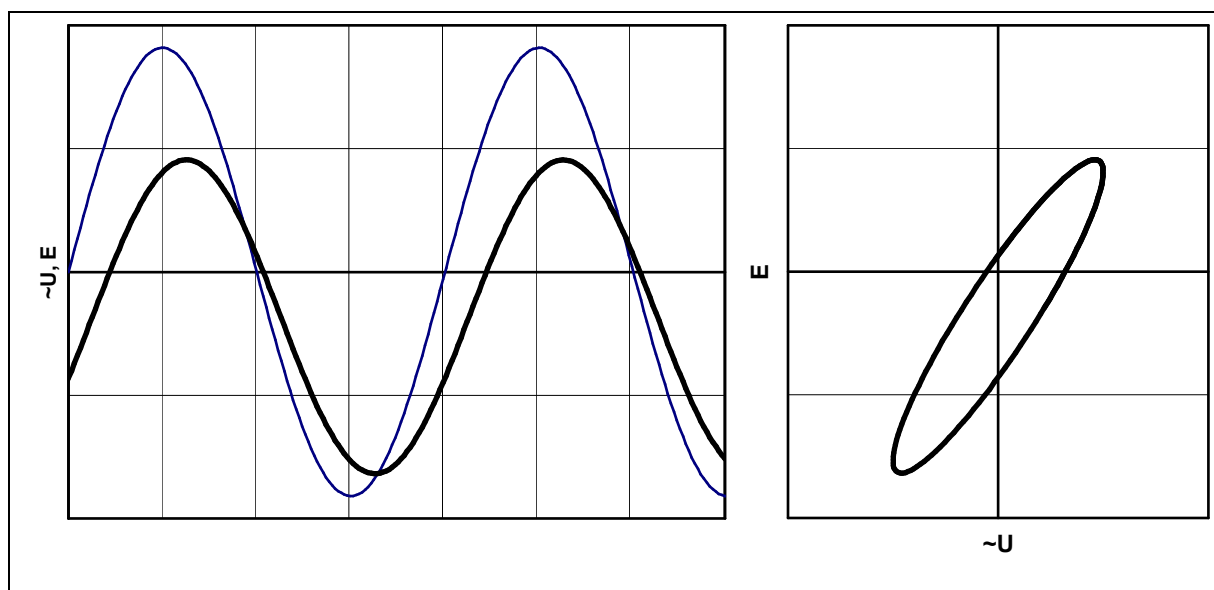


Rys. 2. Zależność szybkości korozji próbek ze stali węglowej (w $\text{mg}/(\text{dm}^2 \times \text{doba})$) od gęstości prądu przemiennego i gęstości nałożonego prądu ochrony katodowej [10]

Jednakże wartości potencjałów załączeniowych, przy jakich prowadzi się ochronę katodową podziemnych rurociągów są takie, że gęstości prądu ochrony katodowej w defektach izolacji w praktyce są wielokrotnie mniejsze od gęstości prądów przemiennych, najczęściej o dwa – trzy rzędy wielkości. Efektywność ograniczania procesu korozji przeniennoprądowej wg mechanizmu [10] może być w związku z tym w wielu przypadkach mało znacząca.

Kluczowe dla wyjaśnienia mechanizmu korozji prądu przemiennego podziemnych konstrukcji chronionych katodowo było ustalenie, że decydujące znaczenie ma zakres zmian chwilowej wartości potencjału polaryzacji na skutek przepływu prądu przemiennego. (Oczywiście zakres zmian potencjału jest ściśle związany z gęstością prądu przemiennego.)

Na rys.3 przedstawiono, w sposób schematyczny, typową zależność obrazującą zmianę chwilowego potencjału polaryzacji w defekcie powłoki konstrukcji podziemnej chronionej katodowo w wyniku oddziaływania napięcia przemiennego. Tego typu obraz zależności pomiędzy napięciem przemiennym i potencjałem polaryzacji można uzyskać posługując się typowym zastępczym schematem elektrycznym dla defektu w powłoce izolacyjnej, jak również przeprowadzając pomiary z zastosowaniem sondy symulującej (sztucznego defektu powłoki) przy pomocy miernika/rejestratora o bardzo dużej częstotliwości próbkowania, rzędu 1 kHz.

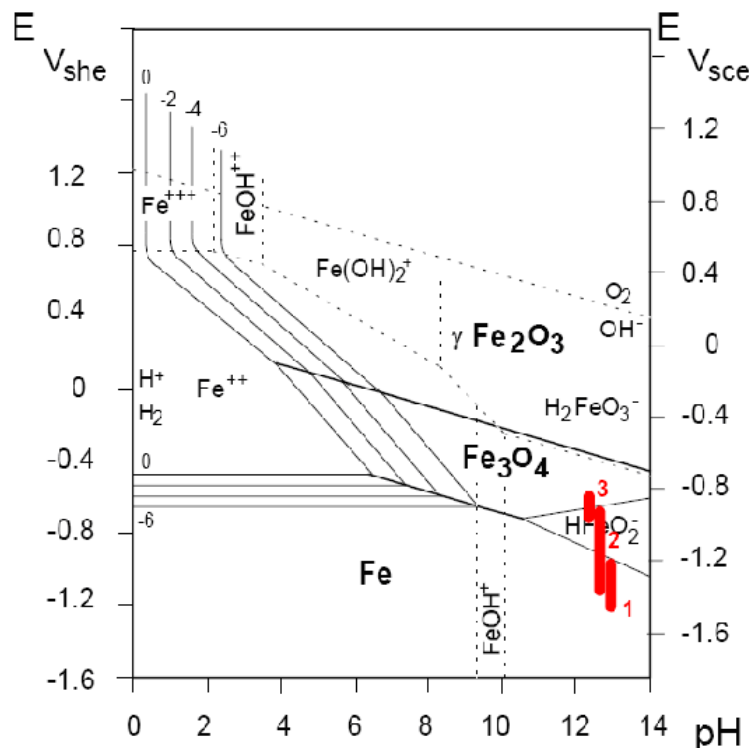


Rys. 3. Schematyczna zależność pomiędzy napięciem przemiennym $\sim U$ i potencjałem polaryzacji E w defekcie powłoki konstrukcji podziemnej chronionej katodowo

Mechanizm korozji prądu przemiennego zachodzącej na podziemnej konstrukcji chronionej katodowo można objaśnić w sposób następujący:

- na skutek polaryzacji katodowej, w defekcie powłoki podziemnej konstrukcji przy powierzchni stalowej ścianki środowisko ulega alkalizacji,
- w okresie połówki anodowej, w wyniku wypływania wypadkowego prądu, w środowisku alkalicznym powstaje warstewka pasywna np. Fe_3O_4 ,
- w okresie połówki katodowej, wpływający do konstrukcji prąd powoduje redukcję warstewki pasywnej do wodorotlenku żelaza, np. $Fe(OH)_2$,
- w każdym kolejnym cyklu powstaje nowa warstewka pasywna, która jest redukowana do wodorotlenku żelaza, czyli zwiększa się ubytek stali i przyrasta warstwa wodorotlenku żelaza.

Rys 4 [11] przedstawia wykres Pourbaix $E - pH$ dla żelaza, z oznaczonymi przykładowymi zakresami zmian potencjału polaryzacji stalowych próbek, w wyniku przepływu prądu przemiennego.



Rys. 4. Wykres Pourbaix E – PH dla żelaza z oznaczonymi przykładowymi zakresami zmian potencjału polaryzacji stalowych próbek, poddanych oddziaływaniom prądu przemiennego [11]

Z badań [11] wynika, że korozja przeniennoprądowa nie zachodzi, gdy chwilowy potencjał polaryzacji jest stale bardziej ujemny niż ok. $-1,2 V_{Cu/CuSO_4}$ (zakres 1). Czyli przy danej, stałej gęstości prądu przemiennego, korozję przeniennoprądową można zahamować stosując odpowiednio silną polaryzację katodową.

Jeśli zakres zmian potencjału polaryzacji mieści się w obszarze pasywacji (zakres 3), również nie obserwuje się korozji przeniennoprądowej. W praktyce stan taki może mieć miejsce przy łagodnej polaryzacji katodowej i niezbyt silnym oddziaływaniu przeniennoprądowym.

Dla zakresu zmian potencjału oznaczonego cyfrą 2 szybkość korozji jest tym większa im mniej ujemne wartości przyjmuje chwilowy potencjał polaryzacji próbki. Czyli przy danej, stałej gęstości prądu polaryzacji katodowej, szybkość korozji przeniennoprądowej będzie rosła w miarę zwiększania gęstości prądu przemiennego.

Ocena zagrożenia korozją przeniennoprądową wg CEN/TS 15280:2005

Od czasu stwierdzenia pierwszego przypadku korozji przeniennoprądowej na chronionym katodowo podziemnym rurociągu w 1986 r. w licznych ośrodkach prowadzone są na dużą skalę badania nad korozją przeniennoprądową. W tym czasie zebrane zostały także liczne doświadczenia praktyczne z eksploatacji podziemnych rurociągów poddanych oddziaływaniom przeniennoprądowym.

W roku 2005 ukazała się norma CEN/TS 15280:2005 [6], niejako podsumowująca współczesny stan wiedzy w zakresie praktycznej oceny zagrożenia korozją przeniennoprądową podziemnych rurociągów chronionych katodowo.

Co jest szczególnie znamienne podane w tej normie możliwe do praktycznego stosowania kryteria zagrożenia korozją przeniennoprądową, wśród których jest także znane z wcześniejszych przepisów [4,12] kryterium gęstości prądu przemiennego na sondzie 1 cm^2 , nie mają „charakteru bezwarunkowego”, tak jak to jest np. w przypadku kryterium

potencjałowego, stosowanego w ocenie skuteczności ochrony katodowej. W dosłownym tłumaczeniu nie są to właściwie kryteria ale „czynniki pozwalające ocenić prawdopodobieństwo korozji prądu przemiennego”. Niebagatelną tego konsekwencją jest znaczne zwiększenie odpowiedzialności specjalistów za podejmowane decyzje związane z zapewnieniem skutecznej ochrony przeciwkorozyjnej podziemnych rurociągów.

W tabl. 1 zebrano podane w tej normie kryteria oceny zagrożenia korozją prądu przemiennego, niektóre z nich autorzy pozwolili sobie opatrzyć komentarzem.

Tablica 1. Kryteria ochrony konstrukcji stalowych przed korozją prądu przemiennego wg CEN/TS 15280:2005

Nr	Czynnik uwzględniany przy ocenie prawdopodobieństwa korozji prądu przemiennego	Uwagi	Komentarz autorów
1	Napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią nie powinno przekraczać: - 10 V na całej długości rurociągu, - 4 V na odcinkach ułożonych w gruntach o rezystywności mniejszej niż 25 Ω m.	Podane wartości graniczne nie mają charakteru „absolutnego”, wynikają z doświadczeń praktycznych.	1)
2	Potencjały polaryzacji (potencjały odłączeniowe sond) powinny być bardziej ujemne niż potencjały ochrony -0,85 V lub -0,95 V ale możliwie jak najbardziej bliskie tym potencjałom.	Zalecenie wynika z mechanizmu korozji prądu przemiennego konstrukcji chronionej katodowo; tłumaczone jest próbą uniknięcia cyklicznych przejść ze stanu ochrony do stany pasywnego.	2)
3	Dla gęstości prądu przemiennego mierzonego na sondzie o powierzchni 1 cm ² prawdopodobieństwo korozji jest: $J_{\sim} < 30 \text{ A/m}^2$ – brak lub niewielkie, $J_{\sim} 30 > 100 \text{ A/m}^2$ – średnie, $J_{\sim} > 100 \text{ A/m}^2$ – bardzo duże	Wyniki pomiarów mogą być wypaczone na skutek: - braku kontaktu części powierzchni sondy z gruntem, - pokrycie części powierzchni sondy przez osady katodowe. W efekcie – rzeczywista gęstość prądu na odsłoniętej powierzchni może być większa, niż zmierzona.	3)
4	Potencjał załączeniowy rurociągu powinien być tak dobrany, by potencjały polaryzacji (potencjały odłączeniowe sond) były bardziej ujemne niż potencjały ochrony ale możliwie jak najbardziej bliskie tym potencjałom.	Zalecenie ma na celu ograniczenie nadmiernej alkalizacji środowiska w defekcie powłoki, która może się przyczynić m.in. do obniżenia rezystancji przejścia defektu i w efekcie zwiększenia gęstości prądu przemiennego w defekcie.	2), 4)

5	Prawdopodobieństwo korozji przeniennoprądowej można oszacować na podstawie stosunku prądu przemiennego do prądu stałego, które płyną przez sondę. Jeśli: $L/I < 5$ – prawdopodobieństwo jest małe, $5 < L/I < 10$ – istnieje prawdopodobieństwo korozji, należy przeprowadzić inne badania, $L/I > 10$ prawdopodobieństwo jest duże.	Kryterium oceny wynika z doświadczeń praktycznych.	5)
---	---	--	----

Komentarz autorów:

- 1) W gruntach o bardzo małej rezystywności, mniejszej niż np. $10 \Omega m$, gęstości prądu przemiennego w niewielkich defektach izolacji, przy napięciu 4 V, mogą przekraczać $100 A/m^2$. Z kolei w gruntach wysokooporowych, o rezystywnościach, rzędu $10^2 \div 10^3 \Omega m^2$, nawet przy dużych napięciach przemiennych gęstości prądów przemiennych będą mniejsze od gęstości krytycznej. To kryterium jest niespójne z kryterium nr 3 oraz z kryterium gęstości prądu przemiennego wg EN 12954.
- 2) Kryterium nierealistyczne, praktycznie niemożliwe do zrealizowania, niespójne z kryterium nr 5, sprzeczne z zaleceniem zawartym w EN 12954 w załączniku A, informującym, że w celu spełnienia potencjałowego kryterium ochrony w obecności oddziaływań prądu przemiennego może być konieczne stosowanie zwiększonej gęstości prądu polaryzacji katodowej.
 Podziemne rurociągi pokryte powłokami izolacyjnymi z nieciągłościami (uszkodzeniami) charakteryzują się naturalną skłonnością do nierównomiernej, zróżnicowanej polaryzacji katodowej w poszczególnych nieciągłościach powłoki izolacyjnej, różniących się powierzchnią, kształtem, miejscem usytuowania na rurze, warunkami środowiska [3]. Najsilniej polaryzują się „defekty” małe, w kształcie rysy, usytuowane w gruntach niskooporowych. W takich defektach powłoki izolacyjnej występuje również największe zagrożenie korozją przeniennoprądową rurociągu. Z praktyki wynika, że w przypadku gruntów o niskiej rezystywności, ok. $20 \Omega m$, do spolaryzowania defektu o powierzchni ok. $1 cm^2$ do potencjału ochrony $E_{IRfree} -0,85 V$ wystarczający jest zwykle potencjał załączeniowy na poziomie ok. $-1,0 V$. Przy takim potencjale, we wszystkich większych defektach oraz w defektach zlokalizowanych w gruntach o większych rezystywnościach, nie będzie spełnione potencjałowe kryterium ochrony katodowej!
 Podane zalecenie w praktyce może dotyczyć rurociągów w powłokach o wysokim poziomie szczelności. Na takich rurociągach, zdaniem autorów, zdecydowanie pewniejszym zabezpieczeniem przed korozją przeniennoprądową jest uzyskanie na odcinkach zagrożonych korozją przeniennoprądową powłoki szczelnej (bezdefektowej).
- 3) Z praktycznych doświadczeń przeprowadzanych na sondach wynika, że przypadki korozji przeniennoprądowej były stwierdzane już przy gęstościach prądu przemiennego $20 A/m^2$. Być może wartości takie otrzymano w przypadku sond, których powierzchnia częściowo pokryta była osadami katodowymi lub nie miała pełnego kontaktu z gruntem. Mając świadomość, że wynik pomiaru natężenia prądu przemiennego płynącego przez sondę może być obarczony błędem, bezpieczniej jest, zdaniem autorów, posługiwać się bardziej surowym kryterium gęstości prądu, np. $20 A/m^2$.

- 4) Wieloletnie doświadczenia praktyczne autorów ze stosowaniem elektrod symulujących na katodowo chronionych gazociągach wskazują, że załączeniowe potencjały eksploatacyjne na poziomie ok. $-1,5$ V, nie przeszkadzają w wytworzeniu się na powierzchniach elektrod 1 cm^2 osadów katodowych, niekiedy wręcz przeciwnie – dopiero po pogłębieniu polaryzacji do potencjału załączeniowego ok. $-1,5$ V obserwowano gwałtowne zwiększenie rezystancji przejścia elektrod.
- 5) Kryterium stosunku prądu przemiennego do prądu stałego stoi w jaskrawej sprzeczności z zaleceniami 2 i 4. Jeśli przykładowo gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy stalową powierzchnią a środowiskiem elektrolitycznym wynosi 100 A/m^2 , to zgodnie z tym zaleceniem należałoby zastosować gęstość prądu polaryzacji katodowej większą niż 20 A/m^2 , aby ryzyko korozji prądu przemiennego było małe. Jeśli wziąć pod uwagę fakt, że średnio gęstość prądu ochrony katodowej powodująca osiągnięcie potencjałów ochrony przy braku oddziaływań prądu przemiennego to ok. $0,1\text{ A/m}^2$, to zastosowanie tak dużej gęstości prądu ochrony katodowej spowoduje powstanie bardzo ujemnych potencjałów E_{IRfree} , ze wszystkimi negatywnymi konsekwencjami dla chronionej stalowej konstrukcji i jej powłoki izolacyjnej. Aby osiągnąć tak duże gęstości prądu ochrony katodowej należałoby stosować bardzo ujemny potencjał załączeniowy; niezbędne byłoby użycie urządzeń polaryzujących dużych mocy.

Zapobieganie korozji prądu przemiennego rurociągów w OGP GAZ-SYSTEM, Oddział w Gdańsku

Na terenie działania OGP Gaz - System Oddział w Gdańsku (poprzednio Regionalny Oddział Przesyłu w Gdańsku, a wcześniej Pomorski Okręgowy Zakład Gazownictwa; łączna długość eksploatowanych gazociągów wys. ciśn. - ok. 1500 km) zagrożenie korozyjne korozją prądu przemiennego gazociągów przesyłowych zaczęto badać w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Zidentyfikowano zagrożone odcinki gazociągów. W tym celu wykonano różnorodne pomiary, przede wszystkim długotrwałe rejestracje napięć przemiennych pomiędzy gazociągami poddawanymi oddziaływaniom prądu przemiennego a ziemią odniesienia. Wszędzie tam, gdzie stwierdzono napięcia przemiennych pomiędzy gazociągiem a ziemią większe od 2 V wykonano pomiary rezystywności gruntu w celu oszacowania gęstości prądu przemiennego przepływającego pomiędzy gazociągiem a ziemią poprzez małe uszkodzenia powłoki izolacyjnej. Mierzono gęstości prądów przemiennych na przenośnych elektrodach symulujących w postaci stalowych izolowanych szpilek z odsłoniętymi ostrzami, wbijanych w ziemię i łączonych z gazociągiem. Zamontowano elektrody symulujące małe defekty powłoki (kupy) w celu monitorowania zagrożenia. Na fotografii (rys. 5.) przedstawiono przykład korozji prądu przemiennego kuponu o pow. 1 cm^2 po dwuletniej ekspozycji w zagrożonym miejscu; w miejscu tym wżer nie jest głęboki, gdyż początkowa korozja została powstrzymana w wyniku powstania osadów katodowych.



Rys.5. Korozja prądu przemiennego na elektrodzie symulującej 1 cm^2 po okresie dwuletniej ekspozycji w zagrożonym miejscu, z lewej - widok przed usunięciem osadów (Wzór nie jest głęboki, gdyż początkowa korozja prądu przemiennego została powstrzymana w wyniku wytworzenia się osadów katodowych)

W ostatnim czasie zaczęto stosować rezystancyjne czujniki korozymetryczne o pow. 1 cm^2 , co pozwala oceniać szybkość korozji bez potrzeby odkopywania czujników (rys. 6.).



Rys. 6. Korozymetr rezystancyjny oraz rezystancyjne czujniki korozymetryczne o powierzchni 1 cm^2 (walcowy) i 5 cm^2 (prostokątny)

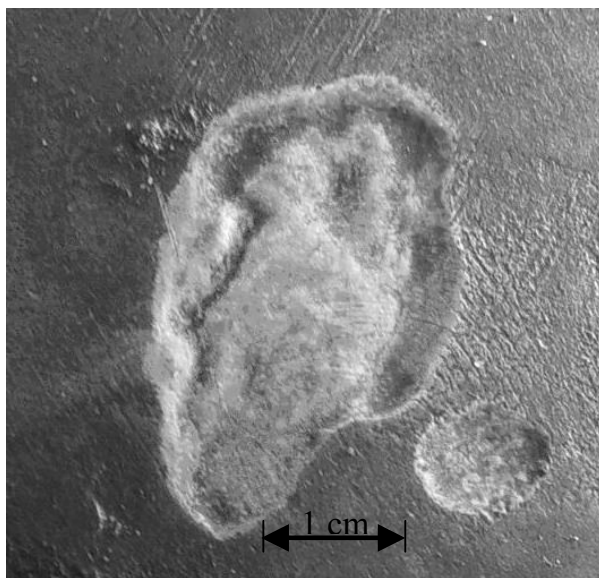
W szczególnych przypadkach badania wykonywano także gdy napięcia przemienne pomiędzy gazociągami a ziemią były mniejsze niż 2 V , jednakże z uwagi na małą rezystywność gruntu,

np. mniejszą niż 10 Ωm , gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy gazociągiem a ziemią poprzez małe uszkodzenia powłoki izolacyjnej mogłaby być większa niż krytyczna.

Odcinki gazociągów zidentyfikowane jako zagrożone są zabezpieczane przed korozją przeniennoprądową. Stosowane są następujące sposoby zmniejszenia, czy też wyeliminowania zagrożenia gazociągów tą korozją:

- bezpośrednie i pośrednie uziemianie zagrożonych gazociągów poprzez odpowiednie układy, w celu zmniejszenia napięcia przemiennego pomiędzy gazociągami a ziemią (obecnie zamontowane są 102 takie urządzenia),
- montowanie w gazociągach liniowych złączy izolujących dzielących zagrożone odcinki na elektrycznie odizolowane sekcje, w celu zmniejszenia napięć przemiennych indukowanych w tych sekcjach oraz w celu oddzielenia odcinków ułożonych w gruntachiskooporowych od odcinków, w których indukują się napięcia przemiennie (aktualnie zamontowanych jest 9 takich złączy izolujących),
- obsypka piaskowa szczególnie zagrożonych odcinków, w celu zwiększenia rezystancji uziemienia rurociągu w potencjalnych defektach powłoki izolacyjnej i zmniejszenia tym samym gęstości prądu przemiennego,
- doprowadzanie do wytworzenia się osadów katodowych w defektach powłok izolacyjnych gazociągów,
- lokalizowanie i naprawa uszkodzeń powłok izolacyjnych na zagrożonych odcinkach gazociągów.

Prowadzi się odkrywki gazociągów w miejscach, w których wskutek oddziaływania prądu przemiennego mogło dojść w przeszłości do uszkodzenia ścianki gazociągu. Na fotografii (rys. 7.) przedstawiono przykład takiego wżeru, ujawnionego po dokonaniu celowej odkrywki gazociągu w miejscu, gdzie podejrzewano powstanie uszkodzenia ścianki.



Rys. 7. Uszkodzenie korozyjne ścianki gazociągu w miejscu defektu powłoki izolacyjnej wskutek oddziaływania prądu przemiennego

W 2005 r. przeprowadzono remont powłoki izolacyjnej połączony z naprawami ścianki gazociągu, na uprzednio zidentyfikowanym jako zagrożonym korozją przeniennoprądową odcinku tego gazociągu dług. 4,7 km. Dwudziestoletni gazociąg pokryty jest bitumiczną powłoką izolacyjną. Wykryto i naprawiono 30 wżerów w ścianie gazociągu, osiagających głębokość do 3 mm. W ciągu ostatnich pięciu lat wykryto i naprawiono 53 wżery

spowodowane przez korozję prądu przemienną - wszystkie w ściankach starszych gazociągów, pokrytych bitumicznymi powłokami.

W odniesieniu do nowo projektowanych gazociągów konsekwentnie wymaga się, aby już na etapie projektowania rozpoznane było ewentualne zagrożenie korozją prądu przemienną i zaprojektowane zostały odpowiednie zabezpieczenia. Z żelazną konsekwencją, nie bez oporów, egzekwuje się to od jednostek projektowych.

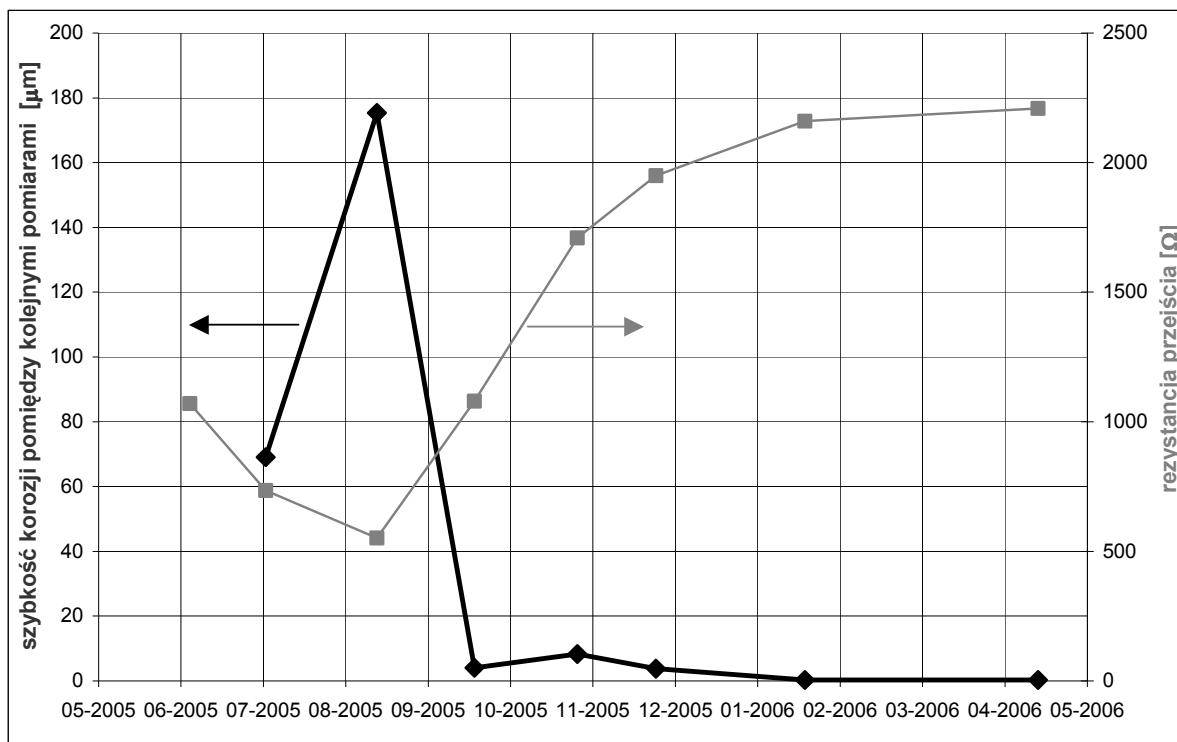
Wypracowany został przez specjalistów aktualnie zatrudnionych w OGP Oddział w Gdańsku sposób zabezpieczania przed korozją prądu przemienną nowo budowanych gazociągów w wysokiej jakości powłokach izolacyjnych. Polega on na wydzielaniu zagrożonych odcinków monoblokami izolującymi i zapewnieniu bezdefektowości powłok izolacyjnych tych odcinków. Bezdefektowość jest okresowo sprawdzana i utrzymywana w toku użytkowania gazociągu.

Zwiększone stosowanie liniowych monobloków izolujących w gazociągach przesyłowych spowodowało zwiększenie wymagań odnośnie ich niezawodności. Obecnie w OGP Oddział w Gdańsku wymaga się, aby monobloki izolujące objęte były co najmniej 25-letnią gwarancją niezawodnego działania.

Wpływ osadów katodowych na szybkość korozji prądu przemienną

Na podstawie wyników wieloletnich pomiarów na elektrodach symulujących uszkodzenia powłoki izolacyjnej o pow. 1 cm^2 zainstalowanych w różnorodnych gruntach na terenie Pomorza autorzy zauważają, że w zdecydowanej większości przypadków rezystancje uziemienia tych elektrod rosną w toku trwania polaryzacji katodowej wskutek wytwarzania się osadów katodowych. Obserwacje takich elektrod po wykopaniu wykazują, że głębokości wżerów w tych elektrodach nie są istotne – wżery są powierzchniowe, i w zasadzie nie zależą od czasu trwania ekspozycji w zagrożonym miejscu, pod warunkiem, że przez cały czas ekspozycji zapewniona była ochrona katodowa.

W 2003 r. została m.in. zamontowana elektroda symulująca o pow. 1 cm^2 na gazociągu DN 300 w pobliżu Gdańska w sąsiedztwie miejsca, gdzie wykryto wżer w ściance gazociągu spowodowany przez korozję prądu przemienną (rys. 7.), w trzęsawisku pod linią WN 400 kV, w którym rezystywność gruntu wynosi $50\ \Omega\text{m}$, a napięcie przemienne pomiędzy gazociągiem a ziemią osiąga 14 V. Po wydobyciu elektrody po dziewięciomiesięcznym okresie ekspozycji stwierdzono wżer w elektrodzie o głęb. do 0,1 mm. Zamontowano nową elektrodę w tym samym miejscu. Po dwuletnim okresie ekspozycji stwierdzono, że wżer w tej elektrodzie (rys. 5.) nie był większy, niż w elektrodzie uprzednio zamontowanej, eksponowanej przez krótszy okres 9 miesięcy. Autorzy wysnuli hipotezę, że wżery w tych elektrodach powstawały w początkowych okresach ekspozycji, zanim wytworzyły się osady katodowe. W celu zbadania tej hipotezy została zamontowana w tym miejscu rezystancyjna elektroda korozymetryczna o powierzchni 1 cm^2 prod. firmy Corropol Gdańsk, umożliwiająca monitorowanie szybkości korozji bez potrzeby odkopywania elektrody, oraz tradycyjna elektroda symulująca uszkodzenie powłoki izolacyjnej o pow. 1 cm^2 . Okresowo wykonywano m.in. pomiary rezystancji uziemienia zamontowanych elektrod oraz szybkość korozji rezystancyjnej elektrody korozymetrycznej. Wyniki pomiarów na rezystancyjnej elektrodzie korozymetrycznej przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Wyniki pomiarów wykonanych na rezystancyjnej elektrodzie korozymetrycznej; napięcia przemienne pomiędzy elektrodą a ziemią $U = 6 \div 14$ V, rezystywność gruntu $\rho = 50 \Omega\text{m}$

W początkowym przedziale czasu po montażu rezystancja uziemienia elektrody korozymetrycznej maleje, a szybkość korozji rośnie, osiągając wartość maksymalną ok. 175 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Autorzy tłumaczą to zjawisko następująco: bezpośrednio po zakopaniu elektrody, wskutek osiadania gruntu następuje lepsze „doziemienie” elektrody, dodatkowo, w wyniku polaryzacji katodowej, dochodzi do alkalizacji przylegającego środowiska, w rezultacie zmniejszenie rezystancji uziemienia, wzrost gęstości prądu przemiennego i wzrost szybkości korozji.

W następnym przedziale czasu następuje wzrost rezystancji uziemienia elektrody - wskutek osadzania się osadów katodowych - oraz zmniejszenie szybkości korozji (w wyniku wzrostu rezystancji uziemienia elektrody zmniejsza się natężenie i gęstość prądu przemiennego i w związku z tym zmniejsza się szybkość korozji). Zauważa się przy tym, że w pewnym momencie szybkość korozji maleje gwałtownie do wartości poniżej 10 $\mu\text{m}/\text{rok}$ - jest to zapewne wynik tego, że przy odpowiednio dużej rezystancji uziemienia gęstość prądu przemiennego maleje do wartości mniejszej niż krytyczna.

W przypadku tradycyjnej elektrody symulującej uszkodzenie powłoki izolacyjnej o pow. 1 cm^2 zaobserwowano szybszy wzrost rezystancji uziemienia i do zdecydowanie wyższej wartości (ponad 50 k Ω). W uszkodzeniu powłoki izolacyjnej osady katodowe wytwarzają się szybciej, a ich warstwa lepiej „pokrywa” powierzchnię stalową, niż w przypadku elektrody korozymetrycznej. Może to być wskazówka dla producentów rezystancyjnych elektrod korozymetrycznych.

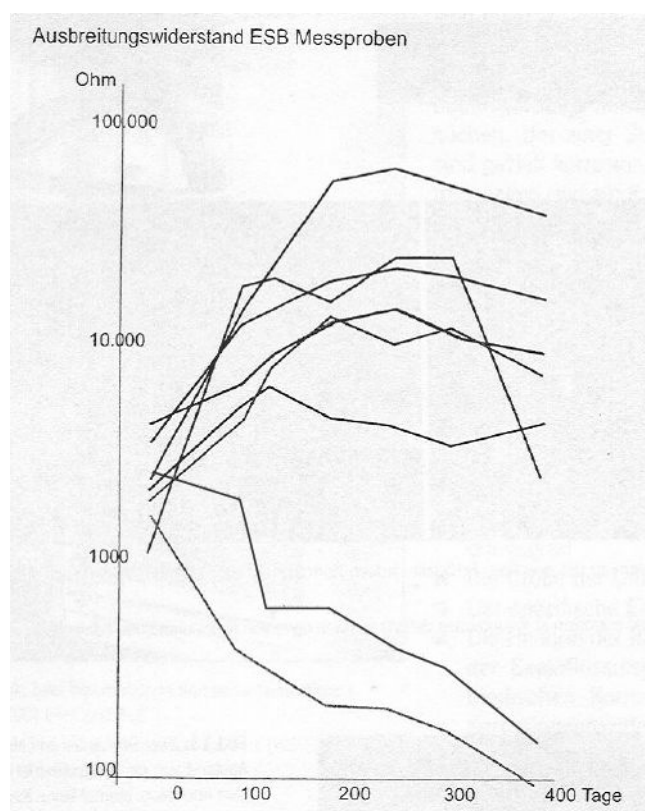
Wyniki pomiarów wykonywanych z zastosowaniem elektrod symulujących i czujników korozymetrycznych w zasadzie dotyczą miejsc, w których zostały zamontowane. Rozciąganie uzyskanych wyników na cały odcinek rurociągu poddany oddziaływaniom przeniennopięciowym bez szczegółowej znajomości wielu wielkości może być ryzykowne.

Osady katodowe w uszkodzeniach powłok izolacyjnych nie zawsze się wytwarzają, a wytworzone warstwy osadów nie zawsze szczelnie okrywają defekt powłoki. Może

wówczas dochodzić do korozji prądu przemiennego, pomimo działania ochrony katodowej. Szczególnie niekorzystne warunki występują w gruntach, w których wśród rozpuszczonych kationów dominują kationy alkaliczne Na^+ , K^+ i Li^+ . Rezystancje uziemienia odsłoniętych w uszkodzeniach powłoki metalowych powierzchni mogą się w następstwie polaryzacji katodowej znacząco obniżyć.

Przykład zmian rezystancji uziemienia elektrod symulujących o powierzchni 1 cm^2 zakopanych na trasie gazociągu poddanego oddziaływaniom prądu przemiennego przedstawiono na rys. 9 [13].

Biorąc pod uwagę ciągle występującą niepewność odnośnie kryteriów zagrożenia i wpływu polaryzacji katodowej oraz niepewność odnośnie własności środowiska na trasie odcinka rurociągu poddanego oddziaływaniom prądu przemiennego, w wielu przypadkach jedynym sposobem pewnego zabezpieczenia rurociągu jest wykrycie i naprawienie uszkodzeń powłoki izolacyjnej, szczególnie uszkodzeń małych. Aby wykrycie takich małych uszkodzeń było możliwe, powinna być zastosowana odpowiednia technika lokalizacji defektów powłoki.



Rys. 9. Zmiana w czasie rezystancji uziemienia ośmiu elektrod symulujących o pow. 1 cm^2 zakopanych w różnych miejscach trasy gazociągu poddanego oddziaływaniom prądu przemiennego [13]

Podsumowanie

1. Występuje ciągle niepewność odnośnie kryteriów ochrony konstrukcji stalowych przed korozją prądu przemiennego. Podane w CEN/TS 15280:2005 kryteria ochrony są niespójne.
2. Ochrona katodowa może zarówno intensyfikować, jak i powstrzymać korozję prądu przemiennego.
3. Z pewnością korozja prądu przemiennego zostaje powstrzymana, jeśli ochrona katodowa doprowadza do wytworzenia w nieciągłościach powłoki izolacyjnej podziemnej konstrukcji stalowej zwartych osadów katodowych o właściwościach izolacyjnych.

4. Pewnym sposobem ochrony podziemnych rurociągów stalowych przed korozją prądu przemienną wydaje się być wydzielenie zagrożonych odcinków rurociągów złączami izolującymi i utrzymywanie na tych odcinkach szczelnych, bezdefektowych powłok izolacyjnych.

Literatura

- [1] BN-85/2320-01 *Rurociągi stalowe układane w ziemi. Określanie zagrożenia korozyjnego*, 1985
- [2] PN-90/E-05030/01 *Ochrona przed korozją. Elektrochemiczna ochrona katodowa. Metalowe konstrukcje podziemne. Wymagania i badania*, 1990
- [3] Fiedorowicz M., Jagiełło M.: *Stopień szczelności powłoki a ochrona katodowa podziemnego rurociągu*, *Ochrona przed korozją*, 44, 329 (2001) cz. I, 35 (2002) cz. II
- [4] PN-EN 12954:2004 *Ochrona katodowa konstrukcji metalowych w gruntach lub w wodach. Zasady ogólne i zastosowania dotyczące rurociągów*
- [5] Heim G.v., Peez G.: *Wechselstrombeeinflussung einer kathodisch geschützten Erdgas Hochdruckleitung*, 3R International 5, 1988
- [6] CEN/TS 15280:2005 *Evaluation of a.c. corrosion likelihood of buried pipelines - Application to cathodically protected pipelines*
- [7] Dziuba W., Dąbrowski J.: *Korozja rurociągów spowodowana oddziaływaniem elektroenergetycznych linii przesyłowych prądu przemiennego*, biuletyn PKEOpK 1999
- [8] Fuchs W., Steinrath H., Ternes H.: *Untersuchungen über die Wechselstromkorrosion von Eisen in Abhängigkeit von der Stromdichte und Frequenz - Ein Beitrag zur Wechselstromkorrosion erdverlegter Rohrleitungen*, gwf Wasser - Abwasser nr 2, 1958.
- [9] Naumann H.-G., Knychalla R., Jung M. : *High voltage interference, protective measures and effect to cathodic protection systems of the Midal gas transmission pipeline*, 3R international 7, 1996
- [10] Chin D-T.: *Corrosion by alternating current*, International congress on metallic corrosion, Toronto, Canada, 3-7 June 1984
- [11] Gregoor R., Carpentiers Ph., Pourbaix A.: *Detection of AC corrosion (Protection, criteria, measurements of corrosion rate and PH, using the CORREAC system and an electrical resistance probe)*, CEOCOR colloque Sicily 2003
- [12] DIN 50925 *Korrosion der Metalle; Nachweis der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes erdverlegter Anlagen*, 1992
- [13] Peez G.: *Korrosionsschutz der wechselstrombeeinflussten „Isar-Schiene“ im Wandel der Zeit und Technik: 1976 – 2004*, 3R international 7, 2004