

XVI Krajowa Konferencja POMIARY KOROZYJNE
W OCHRONIE ELEKTROCHEMICZNEJ
XVI National Conference CORROSION MEASUREMENTS
IN ELECTROCHEMICAL PROTECTION
17-19. 10. 2022 Jastarnia, Poland



POTENCJAŁ ZAŁĄCZENIOWY – NOWA ODSŁONA?

ON POTENTIAL – NEW PERSPECTIVE?

Marek Fiedorowicz

Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu definicji potencjału, omówiono specyficzne cechy potencjału załączeniowego oraz jego znaczenie w praktyce i ocenach skuteczności ochrony katodowej, w ocenach zagrożeń korozyjnych powodowanych przez oddziaływanie prądów błądzących DC na rurociągi chronione katodowo oraz w ocenach oddziaływań prądów AC na takie rurociągi.

Słowa kluczowe: ochrona katodowa, potencjał, rurociąg, prądy błądzące, oddziaływania AC

Summary

The article reviews the definition of potential. It discusses specific features of the “on potential” and its importance in practice and assessment of the effectiveness of cathodic protection as well as in assessment of the corrosion hazards caused by the effects of stray currents DC on cathodically protected pipelines and in assessment of the interference of AC currents on such pipelines.

Keywords: cathodic protection, potential, pipeline, stray currents, AC interference

1. Wstęp

Za [1]: *Pomiary potencjałów były, są i będą podstawowymi pomiarami realizowanymi w praktyce ochrony katodowej.*

Najpowszechniej stosowanym kryterium (określonym w stosownych normach), służącym do oceny skuteczności ochrony katodowej podziemnych konstrukcji metalowych, jest kryterium potencjałowe:

$$E_p \leq E_o \quad (1)$$

gdzie: E_p - potencjał polaryzacyjny konstrukcji w defekcie powłoki izolacyjnej, E_o - potencjał ochrony.

Potencjały ochrony podawane są bez tzw. składowej omowej - są to potencjały na granicy faz pomiędzy metalową powierzchnią konstrukcji a środowiskiem elektrolitycznym, przy których szybkość korozji nie jest większa niż 10 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Warunkiem osiągnięcia stanu skutecznej ochrony katodowej stalowej podziemnej konstrukcji (np. rurociągu), pokrytej powłoką izolacyjną z nieciągłościami (defektami), jest odpowiednie obniżenie potencjałów, co najmniej do potencjałów ochrony, wszystkich (odstąpionych) powierzchni metalowych stykających się z elektrolitem glebowym. Aby móc wnioskować o stanie skuteczności, bądź braku skuteczności ochrony katodowej, należy przeprowadzać pomiary pozwalające na ocenę spolaryzowania konstrukcji w defektach izolacji. W warunkach terenowych jest niezmiernie trudno zmierzyć lub wyznaczyć potencjał na granicach faz metal/elektrolit realnej konstrukcji polaryzowanej katodowo. Jak dotąd nie opracowano metody pozwalającej zadowalająco wyznaczać takie potencjały w defektach powłoki izolacyjnej konstrukcji za pomocą pomiarów wykonywanych na powierzchni ziemi. Naturalna skłonność do nierównomiernej polaryzacji rurociągów pokrytych powłokami, czy to bitumicznymi, czy wykonanymi z tworzyw sztucznych (np. z polietylenu), utrudnia wykonywanie takich pomiarów oraz eksploatację ochrony katodowej. Czynnikiem komplikującym wykonanie pomiarów, jak również wyznaczanie potencjałów na granicy faz, są:

- *brak w praktyce możliwości umieszczenia elektrody odniesienia, względem której wykonuje się pomiar potencjału, możliwie blisko metalowej powierzchni konstrukcji w każdym defekcie powłoki izolacyjnej,*

- występowanie w środowisku elektrolitycznym spadków napięć (tzw. składowych omowych IR) wywoływanych przez różne przepływające prądy elektryczne, w tym przez prąd ochrony katodowej chronionej konstrukcji.

Czym jest potencjał konstrukcji? Niestety, w tej kwestii nie ma jednoznaczności.

Definicje

Poniżej podano definicje terminów dotyczących potencjałów w brzmieniu oryginalnym.

potencjał elektrodowy

różnica potencjałów mierzona w obwodzie zewnętrznym pomiędzy elektrodą i elektrodą odniesienia, będących w kontakcie w tym samym elektrolicie [PN-EN ISO 8044:2002]

potencjał korozyjny

potencjał elektrodowy w danym układzie korozyjnym [PN-EN ISO 8044:2002]

potencjał korozyjny

różnica potencjałów mierzona pomiędzy elektrodą i elektrodą odniesienia, będącymi w kontakcie z tym samym elektrolitem, w danym układzie korozyjnym (na podstawie [PN-EN ISO 8044:2002])

swobodny potencjał korozyjny, spoczynkowy potencjał korozyjny

potencjał korozyjny występujący przy braku sumarycznego (zewnętrznego) prądu płynącego do lub od powierzchni metalu [PN-EN ISO 8044:2002]

potencjał konstrukcji

różnica potencjałów między powierzchnią metalowej konstrukcji a określoną elektrodą odniesienia stykających się ze środowiskiem elektrolitycznym (np. ziemią, wodą). Elektroda powinna być możliwie blisko powierzchni konstrukcji, ale bez styczności z nią [PN-E-05030-10:2004]

potencjał polaryzacyjny

istniejący na granicy faz „metal/środowisko” potencjał polaryzowanej konstrukcji stanowiący sumę potencjału korozyjnego i polaryzacji (katodowej lub anodowej) [PN-E-05030-10:2004]

UWAGA – użyty w tej definicji termin „potencjał korozyjny” jest swobodnym potencjałem korozyjnym wg PN-EN ISO 8044: 2002.

potencjał ochrony

wartość progowa potencjału korozyjnego, którą należy uzyskać, aby uzyskać zakres potencjałów ochronnych [PN-EN ISO 8044:2002]

potencjał ochrony

potencjał konstrukcji, przy którym postęp korozji metalu można zaakceptować [PN-EN 12954:2004]

polaryzacja katodowa

spowodowane przepływem prądu przesunięcie potencjału korozyjnego metalu w kierunku elektroujemnym [ST-IGG-0602: 2009]

UWAGA - Pojęcia polaryzacji używa się także w odniesieniu do każdego procesu, w którym prąd elektryczny przepływa pomiędzy metalem a elektrolitem, w wyniku czego następuje przesunięcie potencjału metalu w kierunku ujemnym (polaryzacja katodowa) lub dodatnim (polaryzacja anodowa).

spadek napięcia IR (omowy spadek napięcia)

napięcie w elektrolicie, np. w gruncie, pomiędzy elektrodą odniesienia, a metalem konstrukcji, wywołane przepływem dowolnego prądu, zgodnie z prawem Ohma ($U = I \times R$) [PN-EN 12954:2004]

potencjał bez składowej IR (E_{IRfree})

potencjał konstrukcji, nie zawierający błędu wynikającego ze spadku napięcia IR, wywołanego przez prąd ochrony lub jakiś inny prąd [PN-EN 12954:2004]

potencjał wyłączeniowy

potencjał konstrukcji zmierzony natychmiast po synchronicznym wyłączeniu wszystkich źródeł prądu ochrony katodowej [PN-EN 12954:2004]

potencjał załączeniowy

potencjał konstrukcji zmierzony, gdy płynie prąd ochrony katodowej [PN-EN 12954:2004]

elektroda symulująca (próbka)

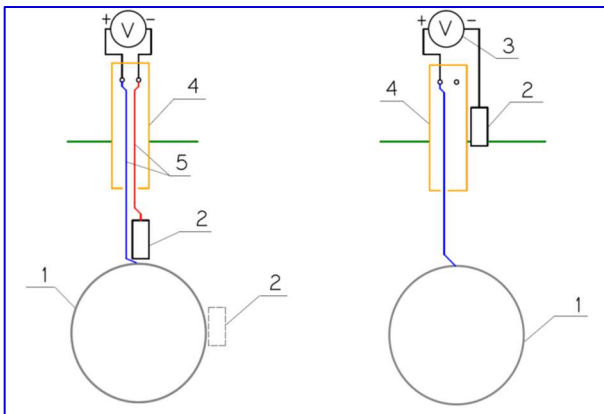
reprezentatywna próbka metalu, stosowana do ilościowej oceny postępu korozji lub skuteczności zastosowanej ochrony katodowej [PN-EN 12954:2004]

potencjał odłączeniowy

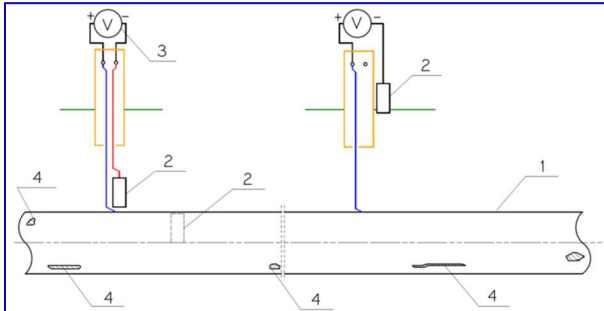
potencjał korozyjny elektrody symulującej mierzony natychmiast po przerwaniu połączenia elektrody z konstrukcją lub natychmiast po synchronicznym przerwaniu połączenia elektrody z konstrukcją i wyłączeniu źródeł polaryzacji katodowej konstrukcji [ST-IGG-0602: 2009]

Reasumując:

Potencjał to napięcie pomiędzy metalową konstrukcją a elektrodą odniesienia, umieszczonymi w środowisku elektrolitycznym. W zależności od stanu konstrukcji, usytuowania elektrody odniesienia, warunków i techniki wykonywania pomiaru, zmierzone napięcie będzie oznaczać różną wielkość (typ potencjału) (rys. 1).



Rys. 1. Pomiar jakiegoś potencjału (z rysunku nie wynika, jaki typ potencjału jest mierzony) podziemnego rurociągu; 1 – rurociąg, 2 – elektroda odniesienia, stała zakopana lub przenośna ustawiona na powierzchni ziemi, 3 – woltomierz d.c., 4 – słupek punktu pomiarów elektrycznych, 5 – kable punktu pomiarów elektrycznych



Rys. 2. Elektroda odniesienia, zakopana przy zaizolowanej konstrukcji lub przenośna ustawiona nad konstrukcją na powierzchni ziemi, jest oddalona jest od defektów w powłoce izolacyjnej; 1 – rurociąg, 2 - elektroda odniesienia, 3 – woltomierz d.c., 4 – defekty w powłoce izolacyjnej rurociągu

2. Potencjał załączeniowy

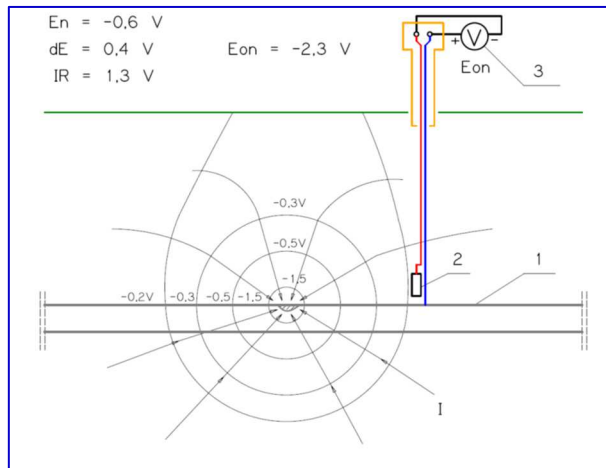
Wg [1]: Prąd elektryczny polaryzacji katodowej, wpływając do podziemnej metalowej konstrukcji na przykład poprzez defekty w powłoce izolacyjnej, wytwarza w przestrzeni wokół defektów (w ziemi) tzw. przepływowe pola elektryczne. Wokół konstrukcji (defektów) w ziemi można wyróżnić linie (sfery) ekwipotencjalne, przy czym im bliżej konstrukcji (defektu), to linie te będą oznaczały bardziej ujemny potencjał elektryczny. W danych warunkach, dla konkretnego miejsca konstrukcji, zmierzony potencjał załączeniowy będzie od miejsca ustawienia elektrody odniesienia, a konkretnie – od potencjału elektrycznego ziemi w miejscu lokalizacji elektrody odniesienia (czyli – na jakiej linii ekwipotencjalnej usytuowana jest elektroda odniesienia).

UWAGA – Napięcie pomiędzy dwoma punktami w ziemi lub na jej powierzchni, spowodowane przepływem prądu elektrycznego, nazywane jest (w technice ochrony katodowej) gradientem potencjału.

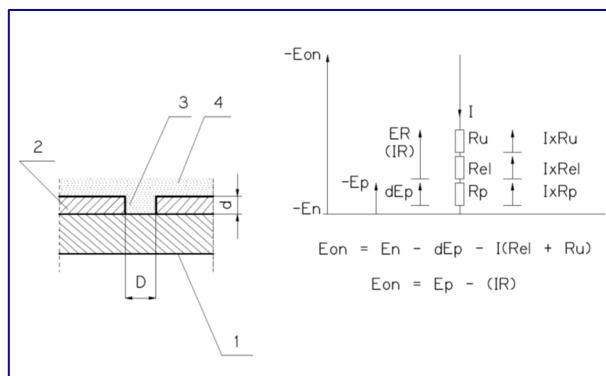
Z definicji potencjału załączeniowego nie wynika, iż jego znamioną cechą jest składowa IR . W przypadku konstrukcji pokrytych powłoką izolacyjną i polaryzowanych katodowo, potencjał załączeniowy mierzony względem elektrody odniesienia zakopanej, a tym bardziej ustawionej na powierzchni ziemi, zawsze zawiera omowy spadek napięcia IR (rys. 2, 3, 4). Jednakże występują sytuacje, gdy zmierzony potencjał załączeniowy obciążony jest pomijalnie małą składową IR . Dotyczy to np. gołych konstrukcji zanurzonych w wodzie o dużej przewodności elektrycznej, gdy nie występują obce pola elektryczne, a elektroda odniesienia usytuowana jest możliwie blisko powierzchni konstrukcji. Wówczas $E_{on} \approx E_{IRfree}$.

W przypadku podziemnych konstrukcji zaizolowanych zmniejszenie składowej IR można uzyskać ustawiając elektrodę odniesienia nad defektem w powłoce izolacyjnej. Jednak nawet wówczas, gdy elektroda odniesienia będzie ustawiona na powierzchni ziemi dokładnie nad defektem w powłoce izolacyjnej, mierzona wartość potencjału E_{on} może się różnić od potencjału polaryzacyjnego E_p znacząco, np. o kilkaset miliwoltów.

Na ogół potencjał załączeniowy nie odwzorowuje potencjału na granicy faz pomiędzy konstrukcją chronioną a elektrolitem (rys. 2, 3, 4). Pomiar tego potencjału może być wykonywany względem elektrody odniesienia usytuowanej w różnych miejscach.



Rys. 3. Prąd ochrony katodowej wpływający do rurociągu poprzez defekt w powłoce izolacyjnej, wytwarza w przestrzeni elektrolitu (w ziemi) wokół defektu przepływowe pole elektryczne (spadki napięcia IR), w którym można wyznaczyć linie ekwipotencjalne; pomiędzy powierzchnią metalową w defekcie a elektrodą odniesienia występuje spadek napięcia IR , który jest składnikiem mierzonego potencjału E_{on} ; 1 – rurociąg, 2 – elektroda odniesienia, 3 – woltmierz d.c., I – prąd polaryzacji katodowej, E_n – spoczynkowy potencjał korozyjny, dE – polaryzacja katodowa, E_{on} – potencjał załączeniowy mierzony względem elektrody odniesienia 2



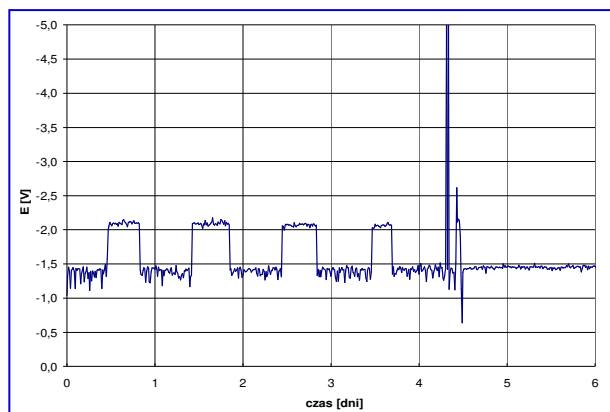
Rys. 4. Rezystancje i napięcia związane z defektem w powłoce izolacyjnej; 1 – ścianka metalowa konstrukcji, 2 – powłoka izolacyjna konstrukcji, 3 – defekt w powłoce izolacyjnej o kształcie koła, 4 – elektrolit, D – średnica defektu, d – grubość powłoki izolacyjnej, E_n – spoczynkowy potencjał korozyjny, R_p – rezystancja polaryzacji, R_{el} – rezystancja elektrolitu w defekcie, R_u – rezystancja uziemienia konstrukcji poprzez defekt, dE_p – polaryzacja katodowa, E_p – potencjał polaryzacji katodowej, E_{on} – potencjał załączeniowy względem odległej elektrody odniesienia, IR – składowa omowa potencjału załączeniowego

Potencjał załączeniowy wykorzystuje się m.in.:

- jako wyznacznik działania/niedziałania polaryzacji katodowej,
- w monitoringu ochrony katodowej,
- w ocenach skuteczności ochrony katodowej, jeśli uprzednio dokonano szczegółowych pomiarów właściwą metodą/ocen skuteczności ochrony w defektach izolacji,
- w ocenach skuteczności ochrony katodowej rurociągów pokrytych powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności,
- w badaniach oddziaływań prądów błądzących – zagrożeń korozyjnych i skuteczności zabezpieczeń,
- w badaniach oddziaływań prądów AC - zagrożeń korozyjnych i skuteczności zabezpieczeń.

Pomiary potencjału załączeniowego stosuje się przede wszystkim w celu kontroli działania ochrony katodowej, w tym w ramach zdalnego monitoringu oraz na obszarach oddziaływań prądów błądzących. Jeśli np. spoczynkowy potencjał korozyjny konstrukcji wynosił $-0,6$ V względem siarczano-miedzowej elektrody odniesienia, a obecnie mierzony potencjał załączeniowy wynosi np. $-1,5$ V, to oznacza to, że konstrukcja obecnie jest polaryzowana katodowo (oczywiście przy założeniu, że w rejonie wykonywania pomiaru nie pojawił się np. obcy potencjałowy stożek anodowy).

Jeśli w ciągu wielu lat potencjał załączeniowy konstrukcji w pewnym punkcie wynosił np. ok. $-1,6$ V, a podczas kolejnych pomiarów zmierzono w terenie lub „zdalnie” poprzez system zdalnego monitoringu $-1,1$ V, to może to oznaczać, iż wystąpiło zakłócenie ochrony katodowej (na przykład jakieś doziemienie rurociągu, powstanie dużego defektu w powłoce izolacyjnej, awaria źródła prądu polaryzacji katodowej, zmniejszenie natężenia prądu polaryzacji wskutek wzrostu rezystancji uziomu anodowego i in.). Patrz np. rys. 5.



Rys. 5. Przykładowe zmiany chwilowych potencjałów E_{ON} rurociągu spowodowane okresowymi doziemieniami wskutek zwarć iskiernika połączonego z uziomem; gazociąg w izolacji PE dobrej jakości; punkt monitorowania oddalony o 35 km od miejsca zdarzenia

Jeśli pomiary potencjałów załączeniowych poprzedzone są pomiarami skuteczności ochrony katodowej odpowiednią dla danych warunków metodą (metodą wyłączeniową, metodą pomiarowo-obliczeniową stosowaną w pomiarach intensywnych, lub za pomocą elektrod symulujących), podczas których wykonano pomiary potencjału załączeniowego rurociągu, to potencjały załączeniowe zmierzone później mogą dostarczać informacji o spełnieniu kryteriów ochrony katodowej rurociągu w defektach powłoki izolacyjnej. Jeśli za pomocą właściwych metod uprzednio wykazano, że spełnione są kryteria ochrony katodowej w defektach powłoki izolacyjnej i temu stanowi towarzyszył potencjał załączeniowy o wartości E_{on} , a pomiary wykonane później wykazały, że potencjał załączeniowy nie jest mniej ujemny niż E_{on} , to można przyjąć, że w tych defektach (i w mniejszych) powłoki izolacyjnej nadal są spełnione kryteria skutecznej ochrony katodowej, przy założeniu, że defekty te nie uległy powiększeniu.

Dla rurociągów w powłokach izolacyjnych o wysokim poziomie szczelności, pomiary potencjałów E_{on} w połączeniu z pomiarami natężeń prądów pobieranych przez odcinki rurociągu lub rezystancji przejścia tych odcinków, mogą dostarczać informacji o spełnieniu bądź niespełnieniu kryteriów skutecznej ochrony katodowej rurociągu w defektach powłoki izolacyjnej na tych odcinkach. Zasady tej metody oceny skuteczności ochrony katodowej podano w załączniku F standardu [3] oraz w [2]. Parametrami charakteryzującymi jakość (stopień szczelności) powłoki izolacyjnej „po zasypaniu” są m.in. rezystancja przejścia lub pobór prądu ochrony katodowej. W tablicach 1 - 3 przedstawiono dopuszczalne maksymalne pobory prądu i wymagane minimalne rezystancje przejścia dla pojedynczego defektu izolacji/oceniającego odcinka rurociągu, dla różnych potencjałów załączeniowych, aby spełniona była skuteczna ochrona katodowa (osiągnięty został potencjał ochrony E_O) w pojedynczym defekcie izolacji/na ocenianym odcinku rurociągu.

Tablica 1. Dopuszczalne (maksymalne) pobory prądu polaryzacji I oraz wymagane minimalne rezystancje przejścia R_{CO} przy założeniach: wymagane gęstości prądu polaryzacji $j_O = 0,1 \text{ A/m}^2$, rezystywność gruntu $\rho = 100 \Omega\text{m}$, grubość powłoki antykorozyjnej $d = 3 \text{ mm}$, dla wybranych wartości potencjału załączeniowego E_{on} i potencjału ochrony E_O

	$E_O = -0,85 \text{ V}$		$E_O = -0,95$	
	$E_{on} = -1,30 \text{ V}$	$E_{on} = -1,50 \text{ V}$	$E_{on} = -1,30 \text{ V}$	$E_{on} = -1,50 \text{ V}$
I [mA]	0,9	1,96	0,52	1,38
R_{CO} [Ω]	500	332	671	399

Tablica 2. Dopuszczalne (maksymalne) pobory prądu polaryzacji I oraz wymagane minimalne rezystancje przejścia R_{CO} przy założeniach: wymagane gęstości prądu polaryzacji $j_O = 0,1 \text{ A/m}^2$, rezystywność gruntu $\rho = 70 \Omega\text{m}$, grubość powłoki antykorozyjnej $d = 3 \text{ mm}$, dla wybranych wartości potencjału załączeniowego E_{on} i potencjału ochrony E_O

	$E_O = -0,85 \text{ V}$		$E_O = -0,95$	
	$E_{on} = -1,30 \text{ V}$	$E_{on} = -1,50 \text{ V}$	$E_{on} = -1,30 \text{ V}$	$E_{on} = -1,50 \text{ V}$
I [mA]	1,91	4,11	1,125	2,91

$R_{CO} [\Omega]$	235,2	158,1	311,1	189,1
-------------------	-------	-------	-------	-------

Tablica 3. Dopuszczalne (maksymalne) pobory prądu polaryzacji I oraz wymagane minimalne rezystancje przejścia R_{CO} przy założeniach: wymagane gęstości prądu polaryzacji $j_0 = 0,06 \text{ A/m}^2$, rezystywność gruntu $\rho = 30 \Omega\text{m}$, grubość powłoki antykorozyjnej $d = 3 \text{ mm}$, dla wybranych wartości potencjału załączeniowego E_{on} i potencjału ochrony E_0

	$E_0 = -0,95$	
	$E_{on} = -1,30 \text{ V}$	$E_{on} = -1,50 \text{ V}$
$I [\text{mA}]$	11,2	28
$R_{CO} [\Omega]$	31,25	19,7

Potencjał załączeniowy można obrazowo nazwać „siłą napędową” polaryzacji. Aby w defekcie powłoki izolacyjnej uzyskać potencjał ochronny konstrukcji, należy zapewnić odpowiednio elektroujemny potencjał załączeniowy. Im większy jest defekt, tym bardziej elektroujemny powinien być potencjał załączeniowy E_{on} :

$$E_{on} \leq E_0 - \frac{j_0 \rho (\pi D + 8d)}{8} \quad (2)$$

gdzie: ρ - rezystywność środowiska elektrolitycznego [Ωm], d - grubość powłoki izolacyjnej [m], D - średnica defektu kołowego [m], j_0 - wymagana gęstość prądu ochrony [A/m^2] prowadząca do osiągnięcia potencjału ochrony E_0 , E_0 - potencjał ochrony [V], E_{on} - potencjał załączeniowy zapewniający osiągnięcie w defekcie potencjału ochrony E_0 [V].

Zależność (2) dotyczy sytuacji, gdy na rurociągu nie oddziałują prądy błądzące. Z kolei jeśli w stanie bez ochrony katodowej na rurociągu występowałyby silne makroogniwa korozyjne – należałoby zastosować odpowiednio dużą gęstość prądu ochrony katodowej, aby osiągnąć odpowiedni potencjał załączeniowy zapewniający w tych warunkach skuteczną ochronę (odpowiednią gęstość wypadkowych prądów polaryzacji w defektach izolacji z uwzględnieniem m.in. konieczności kompensacji anodowych prądów makroogniw korozyjnych, w celu osiągnięcia w tych warunkach potencjałów ochrony).

W zależności 2 (i wartościach obliczonych na podst. tej zależności w tab. 4) oraz na rys. 4 przyjmuje się upraszczająco, że w defekcie izolacji występuje elektrolit taki sam (o takiej samej rezystywności), jak w jego otoczeniu. Tymczasem w wyniku polaryzacji katodowej (wzrostu pH) rezystywność elektrolitu w defekcie i przyległego do defektu ulega zmniejszeniu. Mogą także w i na defekcie wytwarzać się osady katodowe o własnościach izolacyjnych, z kolei zwiększające rezystywność.

Tablica 4. Niezbędne potencjały załączeniowe wg zal. (2) w celu zapewnienia skutecznej ochrony katodowej – potencjału ochrony katodowej $E_0 = -0,85 \text{ V}$, w defektach izolacji o różnych średnicach D , o grubości powłoki $d = 2 \text{ mm}$, w gruncie o rezystywności $\rho = 100 \Omega\text{m}$; założono gęstość prądu ochrony $j_0 = 100 \text{ mA/m}^2$

Średnica defektu izolacji D [m]	0,0128	0,03	0,1	0,2
Niezbędny potencjał załączeniowy E_{on} [V] wzgl. CSE	-0,93	-1	-1,27	-1,67

3. Potencjał załączeniowy a oddziaływania prądów błądzących DC

Jeśli na badany gazociąg oddziałują prądy błądzące, może zachodzić i najczęściej zachodzi konieczność przeprowadzenia pomiarów w dłuższych okresach czasu z zastosowaniem rejestrujących przyrządów pomiarowych w celu określenia zakresu i charakteru zmian potencjałów rurociągu i zmian prądów elektrod symulujących oraz czasów trwania niespełnienia kryteriów ochrony katodowej i ewentualnego wypływania prądu z gazociągu do środowiska elektrolitycznego.

Zgodnie z (nową) PN-EN ISO 21857:2022 [4], dla konstrukcji chronionych katodowo powinny zostać wyznaczone wartości referencyjne: prądy elektrod symulujących lub potencjały załączeniowe, przy których, w okresach braku oddziaływań prądów błądzących (np. w okresach nocnych, gdy nie występuje ruch na trójfazowej), spełnione są potencjałowe kryteria skuteczności ochrony katodowej. Ocenia się średnie zmiany prądów elektrod symulujących lub potencjałów załączeniowych w stosunku do tych wartości referencyjnych, wg kryteriów podanych w tej normie. Norma określa kilka sposobów postępowania/oceny.

Wyznaczenie prawidłowych wartości referencyjnych jest kluczowe. Generalnie nie są to wartości towarzyszące stanowi bez oddziaływań prądów błądzących. Są to (minimalne) wartości, przy których spełniona jest

skuteczna ochrona katodowa w sytuacji/okresie, kiedy prądy błędzące nie występują. Jeśli np. potencjałem załączeniowym zapewniającym skuteczną ochronę katodową rurociągu w okresie bez oddziaływań prądów błędzących jest -1,3 V wzgl. CSE, a ochrona katodowa prowadzona jest (prawidłowo) w taki sposób, że w okresie bez oddziaływań prądów błędzących potencjał załączeniowy wynosi -1,5 V, to wartością referencyjną jest wartość -1,3 V.

W normie w załączniku A (informacyjnym) podana jest kontrowersyjna, znana z PN-EN 50162:2006 [5] tabela z podaniem maksymalnych, dopuszczalnych okresów czasu, w których nie są spełnione referencyjne natężenia prądów ochrony zmierzone na elektrodach symulujących, w zależności od stopnia niespełnienia.

Tablica 5. Dopuszczalne okresy występowania, w których nie są spełnione referencyjne natężenia prądów ochrony zmierzone na elektrodach symulujących, w zależności od stopnia niespełnienia – wg PN-EN ISO 21857:2022 i PN-EN 50162:2006

Prąd w stosunku do referencyjnego prądu ochrony elektrody symulującej %	Maksymalny, dopuszczalny okres występowania	
	„najgorsza godzina” %	w sekundach
> 70	nieograniczony	nieograniczony
< 70	40	1440
< 60	20	720
< 50	10	360
< 40	5	180
< 30	2	72
< 20	1	36
< 10	0,5	18
< 0 (prąd wypływający)	0,1	3,6

Zaznaczono, iż wartości te oparte są na praktycznym doświadczeniu oraz że wykorzystywanie tych wartości w ocenach, gdy potencjały wolne od IR są znacznie (np. o 250 mV) bardziej ujemne niż potencjały ochrony – może skutkować przeszacowaniem ryzyka korozji.

Jednakże norma podaje także inne kryteria oceny.

Oczywiście w każdym przypadku oddziaływania prądów błędzących uznaje się za dopuszczalne, jeżeli potencjał konstrukcji bez składowej IR, E_{IRfree} , mieści się w granicach potencjałów ochronnych: $E_{IRfree} \leq E_O$ (co jest równoznaczne z: $E_{on} \leq E_{on,ref}$). Potencjał E_{IRfree} można mierzyć np. za pomocą elektrod symulujących.

W przypadku oddziaływań zmiennych, gdy maksymalny okres oddziaływań anodowych $T_{a,max}$ nie jest dłuższy, niż 250 sek., norma określa:

średni potencjał załączeniowy (w okresie 24 godz.) $E_{on,avg}$ powinien być równy lub bardziej ujemny, niż różnica załączeniowego potencjału referencyjnego $E_{on,ref}$ i średniego anodowego odchylenia potencjału załączeniowego $\Delta E_{a,avg}$ (w kierunku elektrododatnim od potencjału referencyjnego $E_{on,ref}$):

$$E_{on,avg} \leq E_{on,ref} - \Delta E_{a,avg} \quad (3)$$

Wg doniesień literaturowych [19], w przypadku długotrwałych oddziaływań o charakterze anodowym: potencjał załączeniowy E_{on} powinien być równy lub bardziej ujemny, niż różnica załączeniowego potencjału referencyjnego $E_{on,ref}$ i maksymalnego odchylenia potencjału załączeniowego $\Delta E_{a,max}$ (w kierunku elektrododatnim od potencjału referencyjnego E_{ref}):

$$E_{on} \leq E_{on,ref} - \Delta E_{a,max} \quad (4)$$

PN-EN ISO 21857:2022 [3] podaje m.in. także następujące, uniwersalne kryterium, oparte na współczynniku ratio Q :

$$Q = \frac{(E_{on,ref} - E_{on,avg})}{\Delta E_{a,avg}} \quad (5)$$

Oddziaływania uznaje się za dopuszczalne, jeśli

$$Q \geq 0.004 \text{ s}^{-1} \cdot T_{a,max} \quad (6)$$

gdzie $T_{a,max}$ to maksymalny (najdłuższy) okres ciągłego oddziaływania anodowego w sekundach.

Norma zleca, aby w sytuacji zidentyfikowania gdzieś na rurociągu silnych katodowych (w stosunku do rurociągu) oddziaływań prądów błędzących, wyrażających/objawiających się średnim przesunięciem potencjału załączeniowego w kierunku elektroujemnym $\Delta E_{c,avg}$:

$$\Delta E_{c,avg} > 500 \text{ mV}$$

identyfikować na rurociągu inne obszary, na których towarzyszyć będą (tym oddziaływaniom katodowym) oddziaływania o charakterze anodowym.

W badaniach oddziaływań prądów błędzących może być konieczne stosowanie elektrod symulujących. Może być pożądane stosowanie metod korozymetrycznych, zwłaszcza korozymetrii rezystancyjnej.

W przypadku gazociągów pokrytych powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności należy brać pod uwagę, że przyłączenie do gazociągu elektrody symulującej lub elektrody korozymetrycznej może zmienić warunki rozprywu prądów błędzących i uzyskane wówczas wyniki pomiarów mogą nie być miarodajne.

Jeśli na skrzyżowaniu gazociągu z trakcją i na przyległych odcinkach zastosowana i utrzymywana jest szczelna powłoka izolacyjna, do wykonanie pomiarów na tym skrzyżowaniu z zastosowaniem ewentualnej elektrody symulującej da odpowiedź na pytanie, czy w ewentualnym, hipotetycznym defekcie izolacji, jeśli taki powstanie, będzie lub nie będzie występować zagrożenie korozyjne.

Jeśli szczelna powłoka izolacyjna jest jedynym skutecznym środkiem ochrony i powstanie ewentualnego defektu doprowadziłoby do pojawienia się zagrożenia korozyjnego (pomimo ochrony katodowej), np. na skrzyżowaniach, gdzie na szynach występują silne oddziaływania katodowe (a na gazociągu tym samym – silne oddziaływania anodowe) prądów błędzących, to niezbędne jest okresowe badanie izolacji na takim odcinku w celu potwierdzenia szczelności powłoki.

4. Potencjał załączeniowy a oddziaływania AC

4.1 Wprowadzenie

W niedalekiej przeszłości, jeszcze w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia uznawano, że prąd przemienny nie stanowi realnego zagrożenia korozyjnego dla podziemnych konstrukcji stalowych (uznawano, że prąd przemienny powoduje ubytki metalu na poziomie 1% ubytków powodowanych przez równoważny, o tej samej wartości skutecznej, prąd stały).

Obecnie uznaje się, że prąd przemienny przepływający pomiędzy stalowym podziemnym rurociągiem a ziemią może powodować istotne uszkodzenia korozyjne, szczególnie w przypadku rurociągów objętych ochroną katodową, i jest to potwierdzone w praktyce.

Istotna zmiana w postrzeganiu korozyjnego oddziaływania prądu przemiennego nastąpiła po awarii gazociągu w Niemczech w 1988 r. w wyniku perforacji spowodowanej przez trakcyjny prąd przemienny o częstotliwości 16,7 Hz. Parametrem krytycznym w korozji powodowanej przez prąd przemienny jest nie tylko gęstość prądu AC przepływającego pomiędzy konstrukcją stalową a środowiskiem elektrolitycznym (poprzez defekt w powłoce izolacyjnej).

Stalowe rurociągi podziemne mogą być poddane oddziaływaniom prądu przemiennego. Źródłami oddziaływań mogą być napowietrzne lub podziemne linie energetyczne prądu przemiennego oraz systemy trakcyjne prądu przemiennego. W warunkach krajowych głównym źródłem oddziaływań są napowietrzne linie wysokich i najwyższych napięć (WN/NN).

Oddziaływania prądu przemiennego mogą mieć charakter krótkookresowy lub długookresowy. Długookresowe oddziaływanie prądu przemiennego może powodować korozję w miejscach nieszczelności powłoki izolacyjnej rurociągu, w wyniku przepływu prądu przemiennego pomiędzy stalową ścianką a elektrolitem glebowym. Korozją wywołaną przez prąd przemienny mogą być zagrożone rurociągi nie chronione, jak i chronione katodowo. Krótkookresowe oddziaływania prądu przemiennego występujące w stanach zakłóceń lini energetycznych mogą także stwarzać niebezpieczeństwo porażenia prądem elektrycznym, powodować uszkodzenia powłok izolacyjnych i złączy izolujących.

4.2 Czynniki wpływające na wielkość oddziaływań prądu przemiennego na rurociąg

W wyniku indukcyjnego oddziaływania linii przesyłowych WN/NN, w rurociągu indukuje się przemiennoprądowa siła elektromotoryczna. W rezultacie pomiędzy rurociągiem a ziemią przepływa prąd przemienny poprzez defekty powłoki izolacyjnej i występuje napięcie przemienne $U_{a.c.}$. Wielkość oddziaływań prądu przemiennego na rurociąg – napięcie przemienne pomiędzy rurociągiem a ziemią, gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a środowiskiem poprzez defekty w powłoce izolacyjnej – zależą przede wszystkim od.:

- długości odcinka, na którym występuje zbliżenie tras rurociągu i linii WN/NN,
- odległości pomiędzy rurociągiem i linią WN/NN,
- natężenia prądu w przewodach linii WN/NN,
- konfiguracji przewodów fazowych i przewodów ochronnych linii WN/NN,
- rodzaju, grubości i jakości powłoki izolacyjnej rurociągu, wielkości i rozkładu defektów w powłoce,
- rozkładu rezystywności gruntu, w jakim ułożony jest rurociąg.

Siły elektromotoryczne indukowane w rurociągu w wyniku oddziaływania linii WN/NN oraz rozkład napięcia przemiennego pomiędzy rurociągiem a ziemią można wyznaczyć za pomocą pomiarów przeprowadzonych w terenie oraz można oszacować za pomocą metod obliczeniowych. Metody obliczeniowe można stosować w przypadku gazociągów projektowanych oraz istniejących.

4.3 Mechanizm korozji AC, zagrożenie korozją powodowaną przez prąd przemienny

Ustalono, że mechanizm korozji konstrukcji stalowej objętej ochroną katodową, powodowanej przez prąd przemienny, jest następujący:

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

Produkty korozji „oddalają” się od powierzchni metalowej (są wypychane na zewnątrz) i powodują odsłonięcie powłoki izolacyjnej.

Alkalizacja środowiska ma powierzchni metalowej (pod wpływem ochrony katodowej) i procesy „transportowe” powodują zmniejszenie jego rezystywności w otoczeniu, co prowadzi także do wzrostu gęstości prądu przemiennego.

Ryzyko korozji a.c. zależy przede wszystkim od gęstości prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągami a środowiskiem poprzez defekty w powłoce izolacyjnej.

Korozja powodowana przez prąd przemienny nie zachodzi, jeśli gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy odsłoniętą ścianką rurociągu a ziemią jest mniejsza od gęstości krytycznej.

Najbardziej znaczącymi czynnikami mającymi wpływ na zjawisko korozji a.c. są:

- napięcie przemiennie pomiędzy rurociągami a ziemią,
- gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy metalem a środowiskiem,
- polaryzacja katodowa,
- rozmiary defektów powłoki izolacyjnej,
- rezystywność oraz inne właściwości (skład chemiczny) gruntu.

Wyniki przeglądu kryteriów zagrożenia przedstawiono w 4.4.

4.4 Przegląd kryteriów zagrożenia/braku zagrożenia korozją AC

Baekmann i Schwenk [6] podają, że krytyczna gęstość prądu AC, powyżej której zagrożenie korozją AC występuje, wynosi 20 A/m^2 .

Autorzy pracy [7], podają, że (w pewnych warunkach) przy gęstości prądu AC na poziomie 10 A/m^2 szybkość korozji jest prawie dwukrotnie wyższa niż szybkość korozji swobodnej (bez oddziaływań AC); przy gęstościach prądu przemiennego powyżej 30 A/m^2 wzrost szybkości korozji można uznać za niedopuszczalny.

Gummow i in. w [8] stwierdzili, że szybkość korozji wzrasta wraz ze wzrostem gęstości prądu przemiennego, większej niż 20 A/m^2 i staje się istotna przy gęstościach prądu przemiennego większych niż 100 A/m^2 , niezależnie od wielkości gęstości prądu polaryzacji katodowej.

Yunovich i Thompson w poz. [9] potwierdzają to kryterium (prąd AC o gęstości już 20 A/m^2 powoduje przyspieszoną korozję). Podają także, że stwierdzono, iż przy gęstościach prądu AC poniżej 20 A/m^2 kryterium ochrony katodowej w postaci przesunięcia potencjału korozyjnego o 100 mV w kierunku elektrodjemnym jest skuteczne.

W pracy [10], za opracowaniem poz. bibliograf. [11], podano między innymi następujące kryteria zagrożenia

Gęstość prądu AC $j_{a.c.}$	Prawdopodobieństwo korozji AC
$J_{a.c.} \leq 20 \text{ A/m}^2$	niskie
$20 \text{ A/m}^2 < j_{a.c.} < 100 \text{ A/m}^2$	nieprzewidywalne
$J_{ac} > 100 \text{ A/m}^2$	oczekiwane

W tej pracy, sporządzonej dla (niestety, już nieistniejącej) największej organizacji zrzeszającej operatorów rurociągów (CEPA) zasadniczo przyjmuje się dla rurociągów chronionych katodowo, iż gęstością krytyczną prądu AC jest gęstość 20 A/m^2 . Podano praktyczną wskazówkę, iż ryzyko korozji AC należy zbadać, jeśli napięcie AC pomiędzy rurociągiem a ziemią wyrażone w mV jest liczbowo większe, niż rezystywność gruntu na głębokości ułożenia rurociągu, wyrażona w Ωcm : $U_{a.c.} [\text{mV}] > \rho [\Omega\text{cm}]$, gdyż wówczas gęstość prądu przemiennego w defekcie izolacji o powierzchni 1 cm^2 będzie większa od 20 A/m^2 . Inaczej tę zasadę można wyrazić, stosując wielkości wyrażone w V i Ωm :

a) $U_{a.c.} [\text{V}] > 0,1\rho [\Omega\text{m}]$.

W PN-EN ISO 18086:2021-06 [12] w kontekście zagrożenia korozją AC uwzględniane są dwie sytuacje:

- W przypadku „niskiego” („słabo” ujemnego) potencjału załączeniowego, dopuszczalne jest istnienie pomiędzy rurociągiem a ziemią dość dużego napięcia przemiennego (do 15 V).
- W przypadku „wysokiego” (mocno ujemnego) potencjału, wymagane jest obniżenie napięcia AC do najniższych możliwych poziomów.

Z treści normy wynika, że tą graniczną wartością potencjału załączeniowego, pomiędzy „wysokim (mocno ujemnym)” a „niskim (słabo ujemnym)” jest wartość **-1,2 V** wzgl. CSE.

Wg tej normy w pierwszym kroku napięcie AC pomiędzy rurociągiem a ziemią powinno zostać sprowadzone poniżej 15 V (chodzi o średnią z reprezentatywnego okresu, np. 24 godz.).

W drugim kroku – skuteczne złagodzenie korozji AC może zostać osiągnięte, jeśli jednocześnie osiągnięte zostaną potencjały ochronne ochrony katodowej wg ISO 15589-1:2015 oraz

- utrzymywana będzie gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.}$ poniżej 30 A/m^2 (chodzi o średnią gęstość mierzoną na elektrodzie symulującej o powierzchni 1 cm^2 , w reprezentatywnym okresie np. 24 godz.), lub
- utrzymywana będzie średnia gęstości prądu ochrony katodowej d.c. $J_{d.c.}$ poniżej 1 A/m^2 , gdy gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$ (chodzi o wartości średnie mierzone na elektrodzie symulującej o pow. 1 cm^2 w reprezentatywnym okresie, np. 24 godz.), lub
- zapewniony będzie stosunek (iloraz) gęstości prądu AC do gęstości prądu ochrony d.c. poniżej 5: $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 5$ w reprezentatywnym okresie, np. 24 godz.; norma zaleca, aby ten stosunek był mniejszy, niż 3, aby zmniejszyć ryzyko korozji AC do minimum.

W załączniku E (informacyjnym) do tej normy kryteria pogrupowano dla dwóch sytuacji:

W przypadku „wysokiego” (mocno ujemnego) potencjału załączeniowego można stosować jedno spośród trzech poniższych kryteriów (braku zagrożenia), z uwzględnieniem priorytetów wynikających z kolejności:

- $U_{a.c.}/(|E_{on}| - 1,2) < 3$,
- $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$,
- $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 3$, jeśli $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$.

W tym (trzecim - g)) przypadku istotne jest zapewnienie, aby nie doprowadzać do odspojen katodowych powłok izolacyjnych i negatywnych skutków wydzielania wodoru.

UWAGA 1 – Komentarz. Jeśli ochrona katodowa prowadzona jest przy potencjale załączeniowym $E_{on} \approx -1,5 \text{ V}$, to, zgodnie z pierwszą zależnością e), średnie (w czasie) napięcie $U_{a.c.}$ pomiędzy rurociągiem a ziemią nie powinno być większe, niż $0,9 \text{ V}$.

Dla przypadku „niskiego” („słabo” ujemnego) potencjału załączeniowego można stosować jedno z poniższych trzech kryteriów, z uwzględnieniem priorytetów wynikających z kolejności:

- średnie napięcie przemiennego $U_{a.c.} < 15 \text{ V}$, gdy średni potencjał załączeniowy E_{on} jest mniej ujemny, niż $-1,2 \text{ V}$ wzgl. CSE,
- średnia gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$,
- średnia gęstość prądu ochrony katodowej $J_{d.c.} < 1 \text{ A/m}^2$, gdy $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$.

UWAGA 2 – Przedstawione w normie kryteria dotyczące wielkości mierzonych na elektrodach symulujących o pow. 1 cm^2 z natury rzeczy dotyczą układów (rurociąg/linie WN/NN) istniejących. W przypadku rurociągów projektowanych lub linii WN/NN projektowanych niezbędne jest rozpatrywanie wielkości dotyczących hipotetycznych defektów w powłokach izolacyjnych o pow. 1 cm^2 .

W ramach projektów badawczych DVGW [13, 14] został opracowany matematyczny model korozji przemiennoprądowej. Wyniki prac zostały uwzględnione w przepisach niemieckich GW 28 wg poz. bibliograf. [15, 16], i zostały omówione m.in. w [17, 18, 19].

Jako wyjściowe zastosowano kryterium gęstości prądu przemiennego:

- $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$.

W GW 28 [15] podano kryteria prądowe:

- szybkość korozji AC jest znikoma, jeśli średnia gęstość prądu przemiennego jest mniejsza niż 30 A/m^2 : $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$, lub gęstość prądu ochrony jest mniejsza niż 1 A/m^2 : $J_{d.c.} < 1 \text{ A/m}^2$;
- korozji AC można także uniknąć przy większych gęstościach prądu przemiennego; jest to możliwe, gdy gęstość prądu ochrony katodowej stanowi co najmniej jedną trzecią gęstości prądu przemiennego: $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 3$;

oraz potencjałowe

- w przypadku, gdy potencjał załączeniowy $E_{on} > -1,2 \text{ V}$, napięcie przemiennego pomiędzy rurociągiem a ziemią nie powinno być większe, niż 15 V : $U_{a.c.} < 15 \text{ V}$;
- w przypadku, gdy $E_{on} < -1,2 \text{ V}$ potencjał załączeniowy powinien być odpowiednio ujemny: $E_{on} \leq -U_{a.c.}/3 - 1,2$.

Wyniki/wnioski z wypracowanego matematycznego modelu korozji AC zawarto w załączniku informacyjnym A do suplementu GW 28 [16].

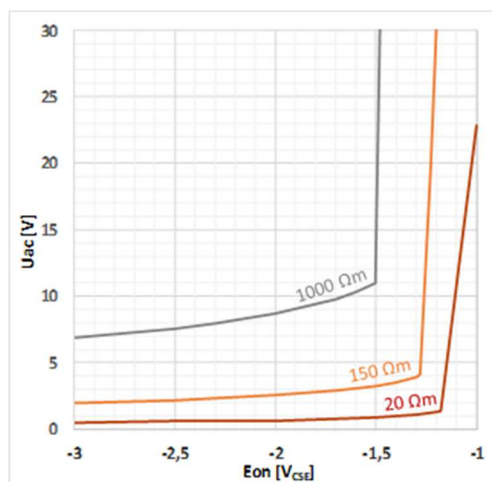
Na podst. poz. bibliograf. [16, 17, 18]:

- Potwierdzono (wypracowanym modelem matematycznym), iż reprezentatywne dla ocen/obliczeń korozji AC są defekty w izolacji o powierzchni 1 cm^2 .
- Korozja AC w początkowym okresie może osiągać bardzo duże szybkości, większe nawet niż 100 mm/rok ; w miarę rozwoju i wzrostu (rozwinęcia) powierzchni metalowej w defekcie/wżerze, jej szybkość znacząco maleje i z czasem praktycznie ustaje; korozja AC zanika po osiągnięciu pewnej określonej, maksymalnej głębokości wżeru (jeśli grubość ścianki rurociągu jest dostatecznie duża).
- W wypracowanym modelu matematycznym uwzględniono/powiązano: gęstość prądu ochrony, gęstość prądu przemiennego (która zmniejsza się w miarę wzrostu wżeru), napięcie przemiennie, potencjał załączeniowy E_{on} , potencjał $E_{IRferec}$, pH (które rośnie pod wpływem polaryzacji katodowej), rezystywność środowiska (która zmniejsza się ze wzrostem pH), powierzchnię defektu/wżeru (która rośnie w miarę postępu korozji), rezystancję rozplywu poprzez defekt (która maleje w wyniku zmniejszenia rezystywności środowiska), średnicę i głębokość wżeru, grubość izolacji.
- Ze wzrostem gęstości prądu ochrony wzrasta pH i maleje rezystancja przejścia poprzez defekt, powodując wzrost gęstości prądu przemiennego przy danej wartości napięcia przemiennego.
- Na podstawie badań laboratoryjnych i terenowych wyznaczono typową relację (iloraz) maksymalnej głębokości wżeru L_{max} do średnicy defektu izolacji d_k : $L_{max}/d_k \approx 0,2$.

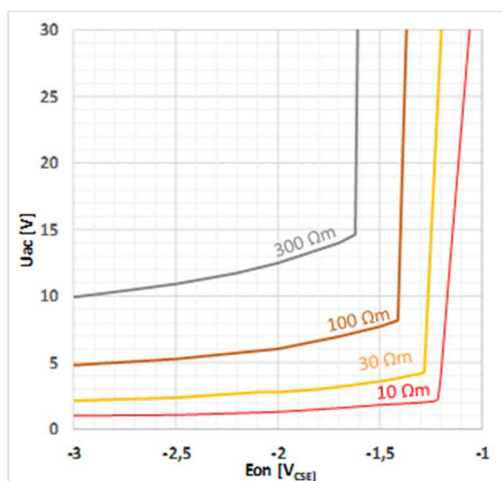
UWAGA 3 – Komentarz. W rzeczywistości jednak te stosunki są różne i zależą m.in. od wielkości napięcia przemiennego $U_{a.c.}$ pomiędzy rurociągiem a ziemią. W pozycjach bibliograficznych [16, 17, 18, 19] przedstawiono wykresy obrazujące maksymalne dopuszczalne (średnie) napięcie przemiennie U_{ac} w funkcji potencjału załączeniowego E_{on} w przypadku dopuszczenia wżerów o różnych głębokościach, jak np. 1, 2, 3, 4, 5 i 7 mm – zawsze dla defektów w powłoce izolacyjnej o powierzchni 1 cm^2 . W tych przypadkach te ilorazy wynoszą od 0,1 do 0,7.

- Wżer początkowo rozwija się w głąb do pewnej głębokości (L_{max}), a następnie, po osiągnięciu tej głębokości, następuje "podbieranie" metalu spod powłoki (korozja podpowłokowa w rejonie krawędzi defektu izolacji) – średnica wżeru staje się większa, niż średnica defektu izolacji; w rezultacie wzrasta powierzchnia wżeru i zmniejsza się gęstość prądu przemiennego.
- Występuje związek pomiędzy maksymalną głębokością wżeru, a powierzchnią, przy której korozja praktycznie ustaje; dla dopuszczalnej maksymalnej głębokości 2 mm powierzchnia ta wynosi ok. 1 cm^2 .
- W przypadku małych defektów w powłoce na ogół nie można uniknąć korozji AC, gdyż wówczas, aby jej zapobiec, należałoby obniżyć napięcie AC praktycznie do 0; w małych defektach izolacji można spodziewać się mniejszych, niż w defektach dużych, głębokości wżerów.
- Oceniając zagrożenie i projektując zabezpieczenia przed korozją AC z przyjęciem jako podstawy defektów o powierzchni 1 cm^2 jednocześnie dopuszcza się (tym samym), że w defektach o mniejszych powierzchniach mogą wystąpić ubytki korozyjne sięgające kilku, np. 2 mm.

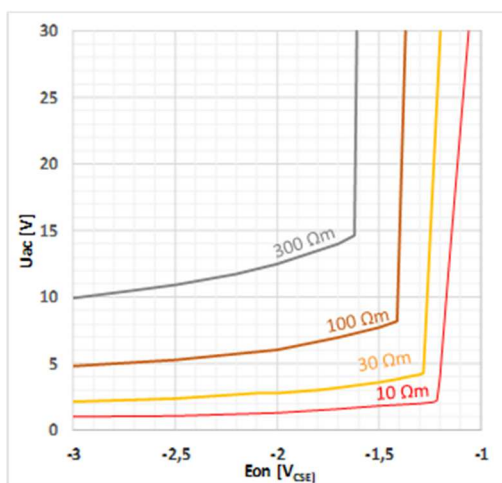
W pozycjach bibliograficznych [15, 16, 17, 18, 19] m.in. przedstawiono wykresy obrazujące maksymalne dopuszczalne (średnie) napięcie przemiennie U_{ac} w funkcji potencjału załączeniowego E_{on} ; przedstawiono także na wykresach te zależności w przypadku dopuszczenia wżerów o różnych głębokościach, jak np. 1, 2, 3, 4, 5 i 7 mm.



Rys. 6. Dopuszczalne napięcia przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią w zależności od potencjału załączeniowego, dla wybranych rezystywności gruntu, niepowodujące korozji AC w defektach o powierzchni 1 cm^2 , wyliczone na podstawie matematycznego modelu korozji. Wykres poglądowy sporządzony na podst. [17]. Kompletny wykres, dla większej ilości rezystywności – w tej pozycji bibliograf.



Rys. 7. Krytyczne napięcia przemiennie pomiędzy rurociągiem w **powłoce poliolefinowej** a ziemią, w zależności od potencjału załączeniowego, dla wybranych rezystywności gruntu, powodujące **wżery o głębokości 3 mm** w defektach izolacji o pow. 1 cm². Wykres poglądowy, sporządzony na podst. [16]. Kompletnie wykresy, dla większej ilości rezystywności i innych głębokości wżerów (5 i 7 mm) – w tej pozycji bibliograf.



Rys. 8. Krytyczne napięcia przemiennie pomiędzy rurociągiem w **powłoce FBE** a ziemią, w zależności od potencjału załączeniowego, dla wybranych rezystywności gruntu, powodujące **wżery o głębokości 5 mm** w defektach izolacji o pow. 1 cm². Wykres poglądowy, sporządzony na podst. poz. bibliograf. [18 i 19]. Kompletnie wykresy, dla większej ilości rezystywności – w tych pozycjach bibliograf.

UWAGA 4 – Komentarz. Porównując wykresy 7 i 8 wysnuwa się wniosek, iż te same napięcia AC krytyczne (jak na wykresach) w gruntach o tych samych rezystywnościach, w przypadku rurociągu w powłoce poliolefinowej (PE, 3LPE, 3LPP) spowodują powstanie wżerów o głębokości 3 mm, a w przypadku rurociągu w (dużo) cieńszej powłoce FBE spowodują powstanie wżerów o głębokości 5 mm.

Wzrost pH w wyniku polaryzacji katodowej prowadzi do zmniejszenia rezystywności przyległego środowiska, co oczywiście prowadzi do wzrostu gęstości prądu AC. W wypracowanym modelu matematycznym uwzględnia się te zjawiska. Powoduje to, iż obliczone maksymalne napięcie U_{ac} w danych warunkach (w tym – rezystywności gruntu), z uwzględnieniem kryterium prądowego $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$, nie powodujące zagrożenia korozyjnego, jest znacząco mniejsze, niż napięcie obliczone bez uwzględnienia tego zjawiska – wynosi ok. 52% tego napięcia. W rezultacie, w zakresie obliczeniowego maksymalnego, dopuszczalnego napięcia $U_{a.c.}$ uzyskuje się wyniki zbliżone lub bardziej rygorystyczne, niż w przypadku zastosowania kryterium 20 A/m^2 , ale bez uwzględniania zmniejszenia rezystywności wskutek wzrostu pH.

PRZYKŁAD 1 – Stosując kryterium 20 A/m^2 dla defektów izolacji w gruncie o rezystywności $20 \Omega\text{m}$ uzyskuje się krytyczne napięcie AC na poziomie ok. 1,8 V. Wg modelu matematycznego korozji AC, w którym stosuje się kryterium 30 A/m^2 i uwzględnia się zmniejszenie rezystywności wskutek wzrostu pH, dla potencjału załączeniowego -1,5 V i takiej samej rezystywności wyjściowej $20 \Omega\text{m}$, krytyczne napięcie AC wynosi ok. 1 V; patrz rys. E1.

Napięcie przemiennie maksymalne (w woltach) można oszacować wg uproszczonej zależności $U_{a.c.max} \approx 0,1\rho$, gdzie ρ to rezystywność gruntu w Ωm (kryterium a)).

UWAGA 5 – Komentarz. Z przytoczonych zależności wynika, że stosując coraz bardziej ujemne potencjały załączeniowe można (tą drogą) przeciwkorozyjnie zabezpieczyć rurociąg przed coraz większymi napięciami przemiennymi, wg zasady E_{on}

$\leq -U_{a.c.}/3-1,2$. W przypadku napięcia przemiennego na poziomie np. 6 V należałoby zastosować potencjał załączeniowy ok. -3,2 V wzgl. CSE. Jednakże stosowanie nadmiernej polaryzacji katodowej prowadzi do negatywnych skutków, jak odspojenia powłok izolacyjnych i nawodorowanie konstrukcji.

UWAGA 6 – Komentarz. Prowadzenie „łagodnej” ochrony katodowej, przy potencjałach załączeniowych mniej ujemnych niż -1,2 V, w celu przeciwkorozyjnego zabezpieczenia rurociągu przed napięciami przemiennymi (do 15 V), najczęściej nie zapewnia skutecznej ochrony przed innymi rodzajami korozji.

UWAGA 7 – Komentarz. Określając ochronę pod kątem defektów izolacji/elektrod symulujących o powierzchniach 1 cm² dopuszcza się milcząco, iż w mniejszych defektach mogą powstać wżery o głębokości kilku mm. Co więcej, w przepisach/opracowaniach niemieckich zauważa się trend do tolerowania wżerów spowodowanych przez korozję AC w większych defektach, o ile nie spowoduje to perforacji. Jednakże każdy wżer jest osłabieniem rury i może powodować np. zainicjowanie naprężeniowych pęknięć korozyjnych SCC.

Można spotkać poglądy (oparte na wynikach badań), iż korozja AC może zachodzić przy gęstościach prądu AC poniżej 20 A/m². Np. Omellese, Brenna i Lazari [20] proponują, aby przy gęstościach prądu d.c. powyżej 1 A/m² gęstość prądu AC nie była większa, niż 10 A/m².

Uwzględniając mechanizm korozji AC wspomniany w 4.3 oraz wykresy – rys. 6 ÷ 10 można stwierdzić, że ochrona katodowa „uczula” rurociąg na korozję AC. Do niedawna uznawano, że w odniesieniu do konstrukcji stalowych (dziś wiemy - nie objętych ochroną katodową) prąd przemienny nie stanowi realnego zagrożenia korozyjnego (uznawano, że prąd przemienny powoduje ubytki metalu na poziomie 1% ubytków powodowanych przez równoważny, o tej samej wartości skutecznej, prąd stały). Innym „potwierdzeniem” tego „uczulenia” są m.in.:

W przypadku słabej ochrony katodowej ($E_{on} > -1,2$ V) bądź jej braku akceptowalne napięcia $U_{a.c.}$ pomiędzy konstrukcją a ziemią mogą być znaczące. Natomiast w przypadku typowej polaryzacji katodowej ($E_{on} < -1,2$ V) należy spełnić różne, „ostre” kryteria, aby uniknąć korozji AC i dopuszczalne napięcia $U_{a.c.}$ są relatywnie niewielkie (patrz 4.4 powyżej).

4.5 Zalecane kryterium dla gazociągów

Biorąc pod uwagę:

- negatywne skutki uboczne nadmiernej polaryzacji katodowej i konsekwencje niepełnej ochrony katodowej,
- celowość ograniczenia korozji AC w defektach powłoki izolacyjnej o powierzchniach mniejszych, niż 1 cm²,
- trudności w pomiarach/oszacowaniach rezystywności gruntu „widzianych” przez defekty w powłoce izolacyjnej,
- niepewność odnośnie do powierzchni styku elektrod symulujących z elektrolitem (pokrywanie się osadami),
- doniesienia literaturowe,
- krajowe doświadczenia – stwierdzono korozję AC przy gęstościach prądu AC dużo poniżej 30 A/m²,
- prostotę kryterium,

celowe jest stosowanie następujących kryteriów (bez uwzględniania wpływu zmniejszania rezystywności środowiska wskutek wzrostu pH):

Zagrożenie korozją prądu przemiennoprądową jest bardzo duże, jeśli gęstość prądu przemiennego jest większa niż:

$$J_{a.c.} \geq 100 \text{ A/m}^2$$

Zagrożenie korozją prądu przemiennoprądową nie występuje lub jest mało prawdopodobne, jeśli gęstość prądu przemiennego jest mniejsza niż:

$$p) \quad J_{a.c.} < 20 \text{ A/m}^2$$

Uproszczoną zależnością (m.in. nie uwzględniającą grubości powłoki w defekcie) określającą gęstość prądu w defekcie izolacji o powierzchni 1 cm² jest

$$J_{a.c.} = \frac{226 \cdot U_{a.c.}}{\rho} \quad (7)$$

(gdzie $U_{a.c.}$ w woltach, ρ w Ωm , $J_{a.c.}$ w A/m^2)

Z kolei dopuszczalne napięcie $U_{a.c.}$ w zależności od rezystywności gruntu ρ , aby w defekcie izolacji o powierzchni 1 cm² gęstość prądu $J_{a.c.}$ nie była większa niż 20 A/m², można określić (wychodząc z zal. 7) na podstawie uproszczonej zależności

$$U_{a.c.} < 0,0885 \cdot \rho \quad (8)$$

(gdzie, ρ w Ωm , $U_{a.c}$ w woltach)

(Zależność/kryterium (8) jest podobne do kryterium a) w 4.4).

Przykład 2. Dla rezystywności gruntu $\rho = 20$ dopuszczalne napięcie $U_{a.c}$ wg zależności (8) wynosi 1,77 V niezależnie od wartości potencjału załączeniowego E_{on} ; wg kryterium a) napięcie to wyniesie 2 V.

Natomiast wg rys. 6 oraz kryteriów e) i m), u podstaw których jest kryterium dopuszczalnej gęstości $J_{a.c.} \leq 30 \text{ A/m}^2$, dopuszczalne napięcie $U_{a.c}$ jest mniejsze i wynosi 0,9 – 1 V.

Bardzo istotną, kluczową kwestią w szacowaniu gęstości prądu $J_{a.c}$ jest stosowanie właściwej rezystywności środowiska. Powinna to być rezystywność „widziana” przez defekt w powłoce izolacyjnej (rzeczywisty/hipotetyczny), wyznaczona poprzez odpowiednie pomiary, lub najmniejsza z możliwych w danym miejscu/rejonie.

Aby ochrona przeciwkorozyjna była w pełni skuteczna, w defektach powłoki izolacyjnej rurociągu/na elektrodach symulujących powinny być także spełnione kryteria skuteczności ochrony katodowej.

Przy ocenie zagrożenia korozją powodowaną przez prąd przemienny mogą być również uwzględniane:

- wartość napięcia przemiennego pomiędzy rurociągiem a ziemią,
- potencjał załączeniowy,
- wartość potencjału polaryzacji w defektach powłoki izolacyjnej rurociągu (elektrod symulujących),
- gęstość prądu ochrony katodowej,
- stosunek gęstości prądu przemiennego do gęstości prądu stałego,
- stosunek napięcia przemiennego do składowej IR potencjału załączeniowego.

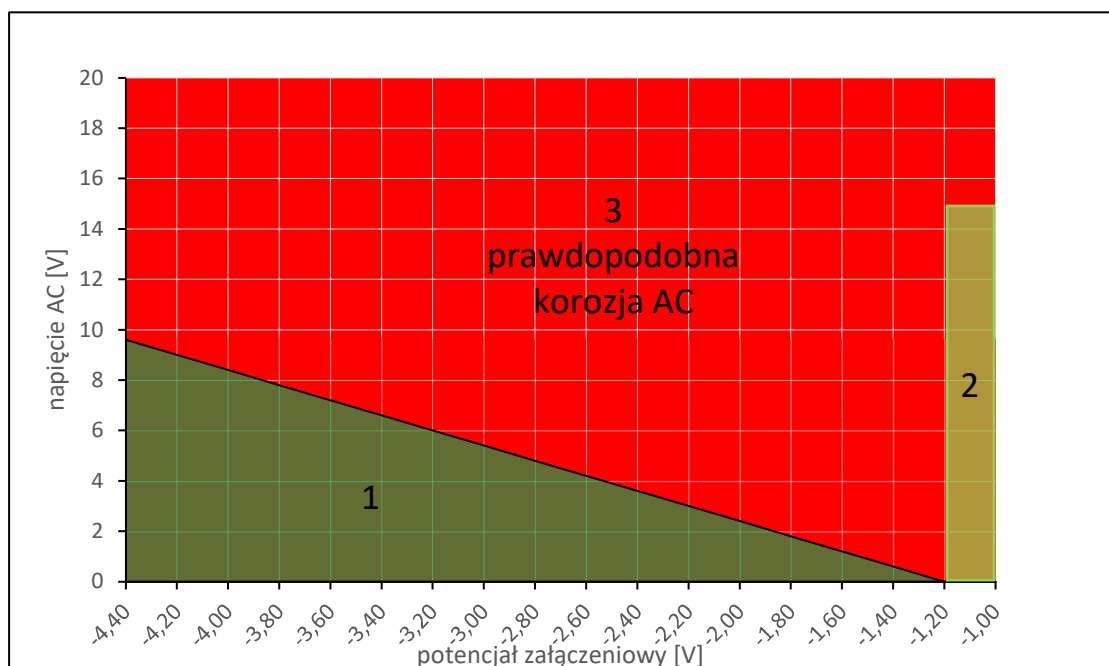
Celowe jest jednakże, mając na uwadze złożoność zjawiska korozji a.c. i związaną z tym złożoność kryteriów oceny zagrożenia korozyjnego/skuteczności zabezpieczeń, aby stosować na istniejących rurociągach metody korozymetryczne, w tym korozymetrię rezystancyjną.

4.6 Podsumowanie roli (zastępczej) E_{on} w ocenach korozyjnych zagrożeń AC

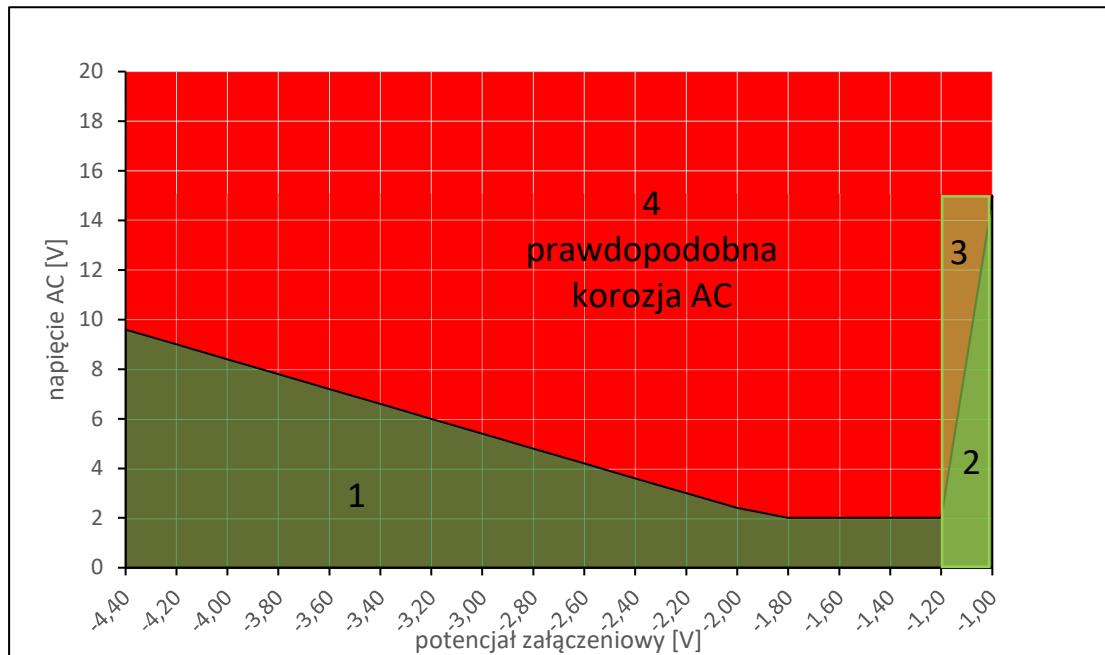
Kluczowe w analizach zagrożeń korozją AC w przypadku chronionych katodowo rurociągów są: gęstość prądu $J_{a.c}$ przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią poprzez defekt izolacji, a także gęstość prądu polaryzacji katodowej $J_{d.c}$ wpływającego poprzez defekt do rurociągu, oraz stosunek gęstości $J_{a.c}$ do gęstości prądu $J_{d.c}$. Wyrazem tego są kryteria a), p), (7) i b), f), i), k), l) oraz d), g), m). Kryteria stosunku $J_{a.c}/J_{d.c}$ można zastąpić przez kryterium stosunku napięcia przemiennego do składowej (IR) potencjału załączeniowego E_{on} : $U_{a.c}/(IR)$, czego wyrazem są kryteria e) i o), w których wprost stosuje się potencjał załączeniowy E_{on} . Składowa (IR) potencjału załączeniowego jest różnicą potencjału polaryzacji E_p i potencjału załączeniowego E_{on} .

Oprócz tego, zgodnie z najbardziej aktualnym stanem wiedzy, określone są zależności/wykresy $U_{a.c}=f(E_{on})$, uwzględniające różnorodne zjawiska dotyczące interferencji AC nakładających się na polaryzację katodową i mające wpływ na korozję (np. patrz rys. 6, 7 i 8).

W normatywach PN-EN ISO 18086:2021-06 [13] i GW 28 [15, 16] przedstawione są diagramy $J_{a.c} = f(J_{d.c})$ oraz $U_{a.c} = f(E_{on})$, obrazujące prawdopodobieństwo korozji AC.



Rys. 9. Diagram napięcie przemiennie – potencjał załączeniowy wg PN-EN ISO 18086:2021-06, obrazujący prawdopodobieństwo korozji AC; 1 – obszar silnej polaryzacji katodowej i „niskiego” napięcia AC – brak zagrożenia korozją AC; 2 – obszar „słabej” polaryzacji katodowej – brak zagrożenia korozją AC.



Rys. 10. Diagram napięcie przemiennie – potencjał załączeniowy na podst. GW28, obrazujący prawdopodobieństwo korozji AC; 1 – obszar silnej polaryzacji katodowej i „niskiego” napięcia AC – brak zagrożenia korozją AC; 2 – obszar „słabej” polaryzacji katodowej – brak zagrożenia korozją AC; 3 – obszar wymagający weryfikacji, pod kątem gęstości prądu AC i DC, jeśli rezystywność gruntu wynosi 10 – 80 Ω; 4 – obszar prawdopodobnej korozji AC

Jak widać, potencjał załączeniowy odgrywa ważną rolę w analizach zagrożeń korozją AC w przypadku chronionych katodowo rurociągów.

4.7 Metody zapobiegania korozji powodowanej przez prąd przemienny

Korekty projektowanej linii WM/NN, jak oddalenie linii od gazociągu, zwiększenie kątów skrzyżowań (zmiana trasy), podwyższenie słupów, zmiana układu faz na przeciwsobny zmniejszając oddziaływanie linii na metalowe rurociągi.

W przypadku rurociągów projektowanych celowy jest, jeśli byłoby to możliwe, wybór odpowiedniej trasy gazociągu względem linii WN/NN, szczególnie w pasach o szerokości 1 km na każdą stronę od linii, jak oddalenie gazociągów od linii, unikanie, na ile to możliwe, przebiegów wzdłużnych i pod łagodnymi kątami względem linii, stosowanie możliwie dużych, zbliżonych do kąta prostego, kątów skrzyżowań z liniami.

Powyższe zabiegi mogą być nierealne lub nie w pełni skuteczne i może być konieczne zastosowanie innych środków zabezpieczających, np.:

- ułożenie w ziemi przewodów redukcyjnych wzdłuż linii WN/NN (ten sposób w pewnych, nie wszystkich układach, może być skuteczny);
- ułożenie w ziemi przewodów redukcyjnych (liniowe, izolowane, redukcyjne przewody (metalowe) układane wzdłuż, w niewielkiej odległości od gazociągu, pomiędzy gazociągiem a linią WN/NN, i okresowo uziemiane);
- urządzenia pośrednio doziemniające (połączenie gazociągu z odpowiednimi, realnymi uziomami poprzez tzw. odgraniczniki) w odpowiednich miejscach i w akceptowalnej ilości, z uziomami o małych, ale realnych rezystancjach uziemień;
- montaż w gazociągu monobloków izolujących oraz montaż dodatkowych źródeł ochrony katodowej i punktów pomiarów elektrycznych;
- doprowadzenie powłoki izolacyjnej na wybranych odcinkach (w tym na odcinkach wydzielonych monoblokami izolującymi) do stanu całkowitej szczelności;
- lokalna wymiana gruntu,
- zastosowanie urządzeń aktywnych – sterowanych zasilaczy kompensujących napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią

Nierzadko stosuje się kombinacje zabezpieczeń (rozwiązania mieszane).

Ochrona przed korozyjnym oddziaływaniem prądu przemiennego polega na odpowiednim zmniejszeniu gęstości prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią poprzez defekty powłoki izolacyjnej i temu służą środki wyżej wymienione, i/lub zmniejszeniu stosunku gęstości prądu przemiennego do gęstości prądu polaryzacji katodowej. Można to osiągnąć poprzez:

- zmniejszenie napięcia przemiennego pomiędzy rurociągiem a ziemią (patrz powyżej pierwsze trzy wypunktowania);
- działania obniżające lokalnie, w miejscach zagrożonych, gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią;
UWAGA 8 - Lokalne obniżenie gęstości prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią można uzyskać poprzez zwiększenie rezystancji uziemienia rurociągu w potencjalnych defektach powłoki. W tym celu na zagrożonych odcinkach rurociągu można stosować obsypkę piaskową na etapie budowy rurociągu. W przypadku rurociągów istniejących można przeprowadzić modyfikację środowiska w rejonie usytuowania defektów w powłoce, w celu wytworzenia w tych defektach osadów katodowych o własnościach izolacyjnych.
- wyeliminowanie przepływu prądu przemiennego pomiędzy rurociągiem a ziemią, poprzez zastosowanie/uzyskanie bezdefektowej, szczelnej powłoki izolacyjnej;
UWAGA 9 - Szczelną, bezdefektową powłokę izolacyjną można zastosować w przypadku zagrożenia korozją prądu przemiennoprądową występującego na krótkich odcinkach rurociągu. Poziom szczelności powłoki izolacyjnej na takich odcinkach powinien być okresowo sprawdzany/kontrolowany z zastosowaniem odpowiednio czułych metod pomiarowych.
- zwiększenie prądu ochrony katodowej tak, by kompensował on anodową część prądu przemiennego; patrz 4.4;
UWAGA 10 - Zwiększenie prądu polaryzacji katodowej w celu redukcji zagrożenia korozją prądu przemiennoprądową wiąże się z pogłębieniem polaryzacji. W przypadku stosowania tej metody należy wziąć pod uwagę ograniczenia dotyczące potencjału polaryzacji.
W celu uzyskania dobrego efektu konieczne może być stosowanie rozwiązań mieszanych.

5. Wnioski

1. Pomiar potencjału załączeniowego jest „pierwotnym” pomiarem w dziedzinie ochrony katodowej. Mimo niekorzystnej specyficznej cechy (z reguły zawiera znaczącą składową IR) jest podstawowym pomiarem realizowanym w praktyce ochrony katodowej rurociągów. Jego znaczenie wzrasta, szczególnie znacząco w odniesieniu do rurociągów zabezpieczonych powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności.
2. W badaniach oddziaływań prądów błądzących na rurociągi pomiar/rejestracje potencjałów załączeniowych mają kluczową rolę. Norma PN-EN ISO 21857:2022-03 określa kryteria zagrożenia oparte na (średnim) potencjale załączeniowym i jego zmianach.
3. Ochrona katodowa „uczula” chronione katodowo rurociągi na korozję AC.
4. W badaniach oddziaływań AC na rurociągi chronione katodowo funkcjonują określone w normach kryteria zagrożeń m.in. oparte na potencjale załączeniowym.
5. Wiedza na temat oddziaływań AC na rurociągi rozwija się, a kryteria zagrożeń ulegają zmianom/korektom.

BIBLIOGRAFIA

1. Fiedorowicz M. 2012. *Ochrona katodowa – potencjały konstrukcji*. Ochrona przed Korozją 55, (8): 340-346
2. Fiedorowicz M., Jagiełło M. 2001, 2002. *Stopień szczelności powłoki a ochrona katodowa podziemnego rurociągu* cz. I i cz. II. Ochrona przed Korozją 44 (8): 329 – 333, 45 (8): 35 - 39
3. Standard Techniczny ST-IGG-0602:2022 Ochrona przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych- Ochrona katodowa - Projektowanie, budowa i użytkowanie
4. PN-EN ISO 21857:2022-03 Przemysł naftowy, petrochemiczny i gazowniczy -- Zapobieganie korozji systemów rurociągów spowodowanej występowaniem prądów błądzących
5. PN-EN 50162:2006 Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błądzące z układów prądu stałego
6. v Baeckmann W., Schwenk W., Prinz W. 1989. *Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes*. Verlag Chemie, Weinheim
7. Goidanich S., Lazzari L., Ormellese M. 2010. *AC corrosion. Part 2: Parameters influencing corrosion rate*. Corrosion Science 52
8. Gummow R.A., Wakelin R.G., Segall S.M. 1989. *AC corrosion—A new challenge to pipeline integrity*. Proceedings of the Corrosion/98; San Diego, CA, USA. 22–27 March 1998; p. 18
9. Yunovich, M., Thompson, N. 2004. *AC Corrosion: Corrosion Rate Risk for Cathodically Protected Pipelines*. NACE International, Corrosion, Paper # 208
10. Gummow R. A. 2014. *A/C Interference Guideline Final Report*. Canadian Energy Pipeline Association
11. Prinz W. 1992. *AC Induced Corrosion on Cathodically Protected Pipelines*. UK Corrosion 1992, Vol. 1

12. PN-EN ISO 18086:2021-06 Korozja metali i stopów -- Określenie korozji wywołanej przez prąd przemienny -- Kryteria ochrony
13. DVGW – Forschungsvorhaben G 2/01/08, Feldversuch Wechselstromkorrosion, 2010
14. DVGW – Forschungsvorhaben G 2-01-10, Feldversuch Wechselstromkorrosion – Validierung des Berechnungsmodells, 2015
15. Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW GW 28 (A) Beurteilung der Korrosionsgefährdung durch Wechselstrom bei katodisch geschützten Stahlrohleitungen und Schutzmassnahmen; textgleich mit AFK – Empfehlung Nr 11, 2014
16. Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW GW 28-B1 (A) Beurteilung der Korrosionsgefährdung durch Wechselstrom bei katodisch geschützten Stahlrohleitungen und Schutzmassnahmen; Beiblatt 1; Modifizierte Kriterien für Wechselspannung und Einschaltpotential, 2018
17. Büchler M., Schöneich H.G., Vimalanandan A. 2018. *Evaluating the AC corrosion risk of cathodically protected pipelines - A first experience with a new approach according to German standard GW28*, Materiały Dorocznej Konferencji CEOCOR, Straford
18. Büchler M., Joos D. 2018. *AC-corrosion on cathodically protected pipelines: A description of the involved processes, the risk assessment and a new normative approach*. Ochrona przed Korozją 61 (8): 204 - 212
19. Büchler M. 2020. *On the Mechanism of Cathodic Protection and Its Implications on Criteria Including AC and DC Interference Conditions*, CORROSION 76 (5): 451–463
20. Ormellese M., Brenna A., Lazzari L. 2015. *AC Corrosion of cathodically protected buried pipelines: Critical interference values and protection criteria*. NACE - International Corrosion Conference Series, Paper No.5753