



**OBLICZENIA OCHRONY KATODOWEJ RUROCIĄGU
POKRYTEGO POWŁOKĄ IZOLACYJNĄ O WYSOKIM
POZIOMIE SZCZELNOŚCI, REALIZOWANEJ
ZA POMOCĄ ANOD GALWANICZNYCH**

**CALCULATION OF GALVANIC ANODES CATHODIC
PROTECTION OF AN EXTRA TIGHT INSULATION
COATED PIPELINE**

Marek Fiedorowicz, Michał Jagiełło

Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A.
Oddział w Gdańsku

Słowa kluczowe: korozja, ochrona katodowa, anody galwaniczne, powłoka izolacyjna o wysokim
poziomie szczelności

Keywords: corrosion, cathodic protection, galvanic anodes, extra tight insulation coating

Streszczenie

Często obserwuje się błędy projektowe dotyczące obliczeń ochrony katodowej rurociągów pokrytych powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności, realizowanej za pomocą anod galwanicznych. Najczęstsze błędy to nieuwzględnianie w obliczeniach rezystancji przejścia rurociągu oraz obliczenia zbyt dużego natężenia prądu ochrony, niemożliwego do osiągnięcia w układzie ochrony. O zaletach stosowania powłok izolacyjnych o wysokim poziomie szczelności, w tym o możliwości stosowania anod galwanicznych do ochrony katodowej rurociągów dalekosiężnych, autorzy donosili we wcześniejszych publikacjach. Jednakże prawidłowe obliczenia takiej ochrony katodowej wymagają uwzględnienia specyfiki takiego układu.

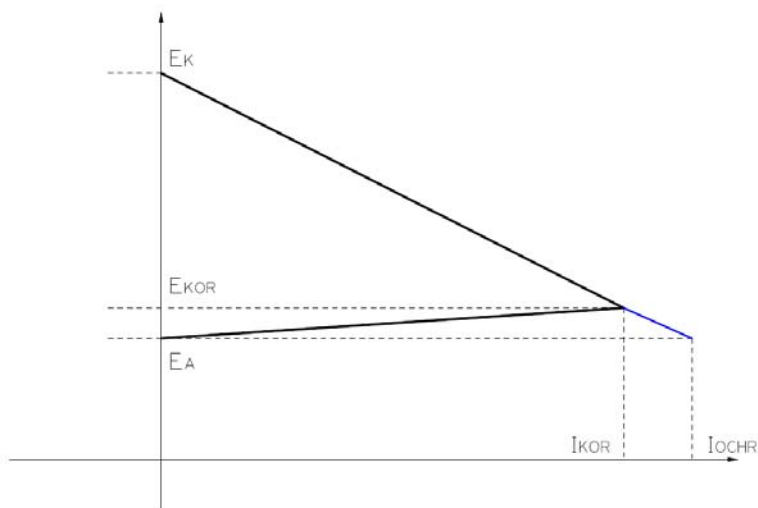
Summary

Design mistakes occur frequently in calculations of galvanic anodes cathodic protection of extra tight insulation coated pipelines. They can be mainly broken out as ignored coating resistance and overestimated protection current, not available in the protection system. The advantages of the extra tight insulation coating, including galvanic anodes in transmission pipelines cathodic protection, have been reported in the authors' previous papers. However, for the acceptable calculation the characteristic of the system should be taken into consideration.

1. Podstawy ochrony katodowej

Jak wiadomo, elektrochemiczna ochrona przed korozją to ochrona osiągana przez polaryzację elektrochemiczną metalowej konstrukcji; z kolei polaryzacja elektrochemiczna jest przesunięciem potencjału konstrukcji na skutek przepływu prądu przez granicę faz metal/elektrolit [1]. Polaryzacja katodowa jest spowodowanym przepływem prądu przesunięciem potencjału korozyjnego metalu w kierunku elektroujemnym. 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) [2]. Ochrona katodowa to ochrona przeciwkorozyjna metalowej konstrukcji osiągana przez polaryzację katodową powierzchni metalu [1], a wg [3] jest to ochrona elektrochemiczna uzyskana przez obniżenie potencjału korozyjnego do poziomu, przy którym szybkość korozji metalu ulega znacznemu zmniejszeniu.

Ochronę katodową stosuje się w przypadku metalowych konstrukcji umieszczonych w elektrolicie, korodujących z tzw. kontrolą katodową, np. do ochrony podziemnych konstrukcji stalowych (rys. 1). Gleba jest elektrolitem, w którym żelazo/stal korodują z kontrolą katodową.



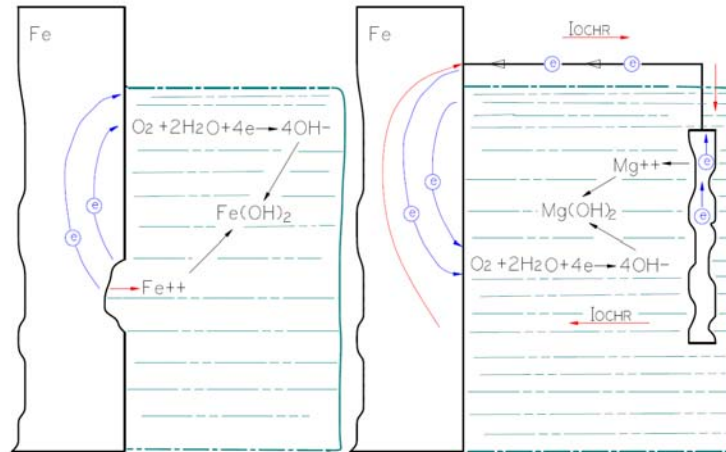
Rys. 1. Uproszczony wykres Evansa dla ogniw korozyjnego, obrazujący zasadę ochrony katodowej; I_{OCHR} – gęstość prądu polaryzacji katodowej, która powoduje obniżenie potencjału mieszanego E_{KOR} do/poniżej potencjału anody E_A jak w ogniwie otwartym

Ochronę/polaryzację katodową uzyskuje się wówczas, gdy doprowadza się do sytuacji, w której prąd elektryczny (stały) wpływa z elektrolitu do konstrukcji. Ideę ochrony katodowej przedstawiono na rys. 2.

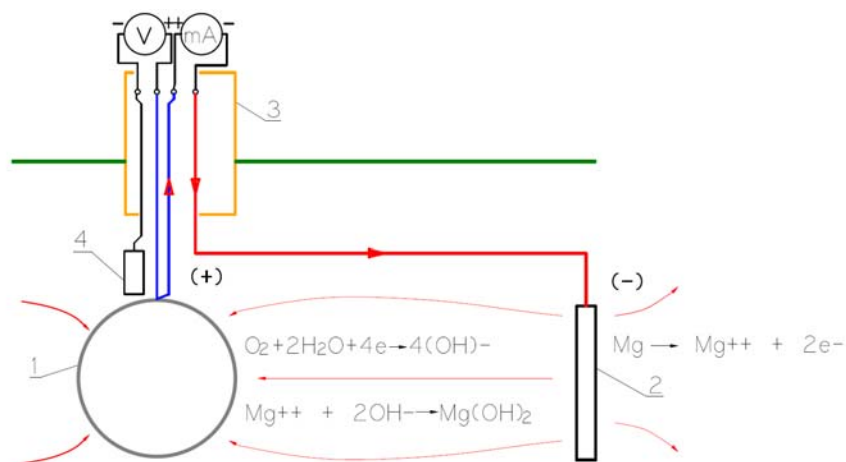
Ochronę katodową realizuje się:

- za pomocą anod galwanicznych (prądem wewnętrznym źródła, jakie stanowi ogniwo galwaniczne „anoda galwaniczna – chroniona konstrukcja”) (rys. 3);

- prądem z zewnętrznego źródła, wytwarzanym zwykle przez przekształtnik energoelektroniczny; w układzie występuje anoda polaryzacyjna (uziom anodowy z anod polaryzacyjnych) (rys. 4);
- w obydwóch sposobach reakcja anodowa przebiega na anodzie (galwanicznej lub polaryzacyjnej) – roztworzenie anody i/lub rozkład wody z wydzielaniem tlenu, natomiast na chronionej konstrukcji przebiegają jedynie reakcje redukcji (depolaryzacji) oraz rozkład wody z wydzielaniem wodoru.



Rys. 2. Idea ochrony katodowej; z lewej – brak ochrony katodowej, żelazo koroduje (na powierzchni zachodzi reakcja anodowa – roztworzenie), proces z depolaryzacją tlenową; z prawej – ochrona katodowa realizowana za pomocą magnezowej anody galwanicznej, żelazo nie koroduje, roztwarza się anoda galwaniczna (reakcja anodowa), na powierzchni żelaza przebiega jedynie reakcja redukcji (depolaryzacja tlenowa)



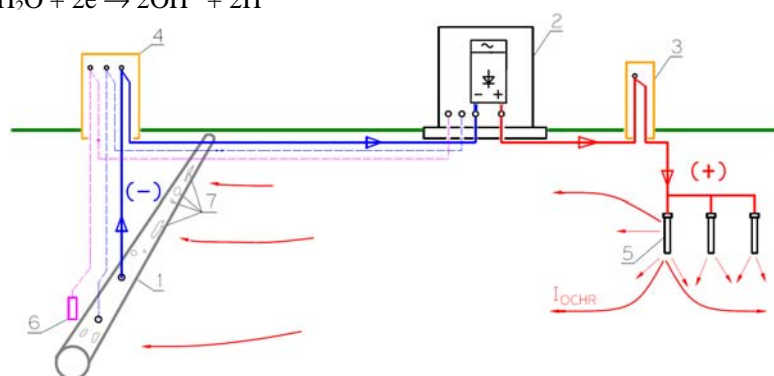
Rys. 3. Ochrona katodowa realizowana prądem wewnętrznym źródła - za pomocą magnezowej anody galwanicznej; 1 – chroniona (polaryzowana) konstrukcja, 2 – anoda galwaniczna, 3 – szlup/szafka pomiarowa, 4 – elektroda odniesienia, względem której wykonywany jest pomiar potencjału

Reakcje na anodzie:

- roztworzenie metalu:
 $\text{Me} \rightarrow \text{Me}^{z+} + z\text{e}$
- w przypadku anod trudno rozpuszczalnych, rozkład wody (wydzielanie tlenu):
 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}$
- oraz zazwyczaj wydzielanie chloru:
 $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}$

Reakcje na katodzie (konstrukcji chronionej):

- $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$ – redukcja rozpuszczonego tlenu w środowisku obojętnym (wody naturalne, gleby) lub zasadowym; niezbędna jest obecność w obojętnym środowisku elektrolitycznym tlenu, lub
- $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ – redukcja rozpuszczonego tlenu w środowisku kwaśnym (niezbędna obecność w środowisku jonów wodorowych i tlenu), lub
- $2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightarrow 2\text{H} \rightarrow \text{H}_2$ – redukcja jonów wodorowych w środowisku kwaśnym (konieczna obecność w elektrolicie jonów wodorowych),
- oraz rozkład wody z wydzielaniem wodoru:
 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow 2\text{OH}^- + 2\text{H}$



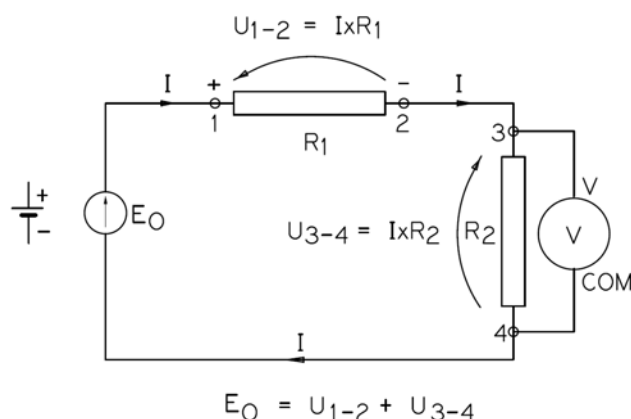
Rys. 4. Stacja ochrony katodowej realizująca ochronę prądem z zewnętrznego źródła; 1 – rurociąg chroniony w powłokę izolacyjnej, 2 – urządzenie polaryzujące, 3 – anodowy słupek połączeniowy, 4 – punkt drenażowo-pomiarowy, 5 – anody polaryzacyjne, 6 – stała elektroda odniesienia, 7 – defekty w powłokę izolacyjnej rurociągu

2. Specyficzne własności układu ochrony katodowej konstrukcji pokrytej powłoką izolacyjną o wysokim poziomie szczelności

W rozważaniach stosowane są podstawowe prawa obwodów elektrycznych – prawo Ohma oraz II prawo Kirchhoffa, oraz sposób strzałkowania napięć przedstawiony na rys. 5.

Strzałka spadku napięcia skierowana jest przeciwnie niż kierunek przepływu prądu, górną wskazuje punkt o wyższym potencjale elektrycznym. Z kolei jeśli woltomierz V zostanie włączony do obwodu tak, jak to pokazano na rys. 5, czyli zacisk woltomierza V (+) zostanie połączony z punktem 3 o wyższym potencjale, a zacisk COM (-) z punktem 4 o niższym potencjale, to wskazania woltomierza będą dodatnie.

Rozważania są przeprowadzane także przy założeniu, że jedynym prądem w układzie jest prąd ogniwa galwanicznego, jakie stanowią metalowa konstrukcja podziemna i anoda/uziom anod galwanicznych; żadne inne elektryczne pola przepływowe w ziemi nie występują.



Rys. 5. Przyjęty sposób strzałkowania napięć; E_0 – siła elektromotoryczna, R_1 , R_2 – rezystancje w obwodzie, U_{1-2} , U_{3-4} , – spadki napięć na rezystancjach

Specyficzne cechy układu „rurociąg pokryty powłoką o wysokim poziomie szczelności (WPS) – anoda galwaniczna” są następujące:

- anoda znajduje się na ziemi odniesienia względem odsłoniętych powierzchni metalowej konstrukcji,
- największą rezystancją w obwodzie jest rezystancja uziemiania (przejścia, rozplywu) konstrukcji,
- występuje ograniczenie minimalnego (maksymalnie ujemnego), możliwego do uzyskania potencjału załączeniowego konstrukcji,
- występuje ograniczenie maksymalnego, możliwego do uzyskania natężenia sumarycznego prądu polaryzacji „emitowanego” przez anody galwaniczne w takim układzie,
- rozkład potencjału załączeniowego rurociągu pokrytego powłoką WPS jest w praktyce ekwipotencjalny.

Schemat elektrycznego układu ochrony katodowej metalowej podziemnej konstrukcji, realizowanej za pomocą anody galwanicznej, przy ww. założeniach, przedstawiono na rys. 6.

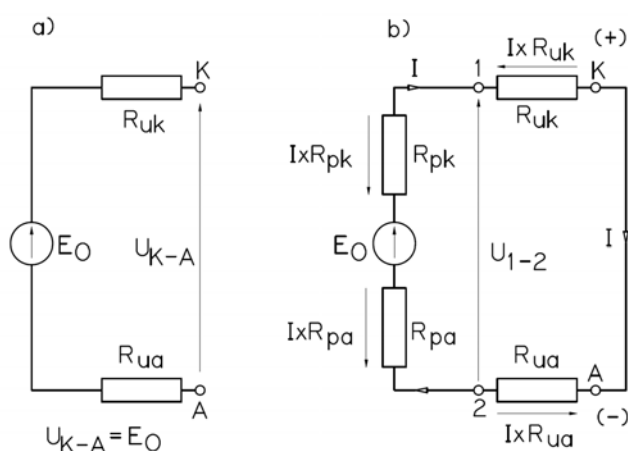
Jeśli anoda galwaniczna lub uziom z anod galwanicznych usytuowane są na ziemi odniesienia względem konstrukcji polaryzowanej, to w obwodzie zwartym (w warunkach przepływającego prądu) występują następujące rezystancje: rezystancja polaryzacji anody R_{pa} , pełna rezystancja uziemienia (rozplywu, przejścia) anody R_{ua} , pełna rezystancja uziemienia (rozplywu, przejścia) konstrukcji R_{uk} , rezystancja polaryzacji konstrukcji R_{pk} , rezystancja połączeń kablowych (pomijana w dalszych rozważaniach).

W tym ww. przypadku możliwy do uzyskania minimalny (maksymalnie ujemny) potencjał załączeniowy E_{on} konstrukcji mierzony względem elektrody odniesienia ustawionej na ziemi odniesienia jest potencjałem anody galwanicznej w układzie (ogniwie) otwartym E_a (rys. 6a) – tzn. potencjałem występującym w sytuacji braku połączenia galwanicznego

między anodą a konstrukcją. Występuje także ograniczenie maksymalnego, możliwego do uzyskania natężenia sumarycznego prądu polaryzacji „emitowanego” przez anody galwaniczne w takim układzie. Jest to takie natężenie, które spowoduje osiągnięcie potencjału załączeniowego konstrukcji mierzonego względem elektrody odniesienia ustawionej na ziemi odniesienia, równego potencjałowi E_a . Uzyskanie większego sumarycznego natężenia prądu i potencjału załączeniowego konstrukcji bardziej ujemnego niż E_a nie jest możliwe nawet w sytuacji, gdy w wyniku zastosowania bardzo dużej ilości anod rezystancja rozptyłu uziomu anodowego będzie pomijalna.

Układ „rurociąg pokryty powłoką o wysokim poziomie szczelności (WPS) – anoda galwaniczna” jest właśnie takim układem, w którym anoda galwaniczna usytuowana jest na ziemi odniesienia. Ma to miejsce także wówczas, gdy anoda jest zakopana w wykopie razem z rurociągiem, gdyż nieciągłości w powłoce WPS są niewielkie, nieliczne i rozmieszczone w dużych wzajemnych odległościach.

Z reguły w układzie ochrony konstrukcji pokrytej powłoką izolacyjną WPS największą rezystancją jest rezystancja uziemienia konstrukcji R_{uk} (R_{CO}), której to rezystancji nie należy pomijać w obliczeniach.



Rys. 6. Układ elektryczny uziom z anod galwanicznych – konstrukcja metalowa; a) obwód otwarty, b) – obwód zwarty; E_O – siła elektromotoryczna konstrukcja – anoda galwaniczna, R_{uk} – rezystancja uziemienia konstrukcji, R_{ua} – rezystancja uziemienia uziomu anodowego, R_{pk} – rezystancja polaryzacji konstrukcji, R_{pa} – rezystancja polaryzacji anody, I – prąd polaryzacji katodowej płynący po zwarciu uziomu anodowego z konstrukcją

W obwodzie otwartym napięcie U_{K-A} mierzone pomiędzy konstrukcją K a anodą A jest siłą elektromotoryczną E_O , przy czym:

$$E_O = E_n - E_a \quad (1)$$

gdzie:

E_n – spoczynkowy potencjał korozyjny konstrukcji, E_a – potencjał anody galwanicznej.

W obwodzie zamkniętym (rys. 6b) w wyniku przepływu prądu wystąpi polaryzacja katodowa konstrukcji (IR_{pk}) oraz polaryzacja anodowa anody (IR_{pa}). Polaryzacja anody w dalszych rozważaniach będzie pomijana ($IR_{pa}=0$); przy tym założeniu:

$$U_{1-2} = E_O - IR_{pk} \quad (2)$$

Uwzględniając zal. (1) otrzymuje się:

$$U_{1-2} = E_n - E_a - IR_{pk} \quad (3)$$

Z kolei uwzględniając, że

$$E_n - IR_{pk} = E_P \quad (4)$$

otrzymuje się

$$U_{1-2} = E_P - E_a \quad (5)$$

gdzie: E_P – potencjał polaryzacyjny konstrukcji (tzw. E_{IRfree}).

W dalszych rozważaniach

$$E_P - E_a = U_P \quad (6)$$

gdzie U_P – siła elektromotoryczna pomniejszona o polaryzację.

$$U_P = I(R_{ua} + R_{uk}) \quad (7)$$

czyli:

$$R_{ua} = \frac{U_P - IR_{uk}}{I} \quad (8)$$

Spadek napięcia IR_{uk} jest. tzw. składową omową (IR) potencjału załączeniowego E_{on} :

$$(IR) = IR_{uk} \quad (9)$$

a E_{on} :

$$E_{on} = E_n - IR_{pk} - IR_{uk} \quad (10)$$

czyli, po uwzględnieniu zal. (4):

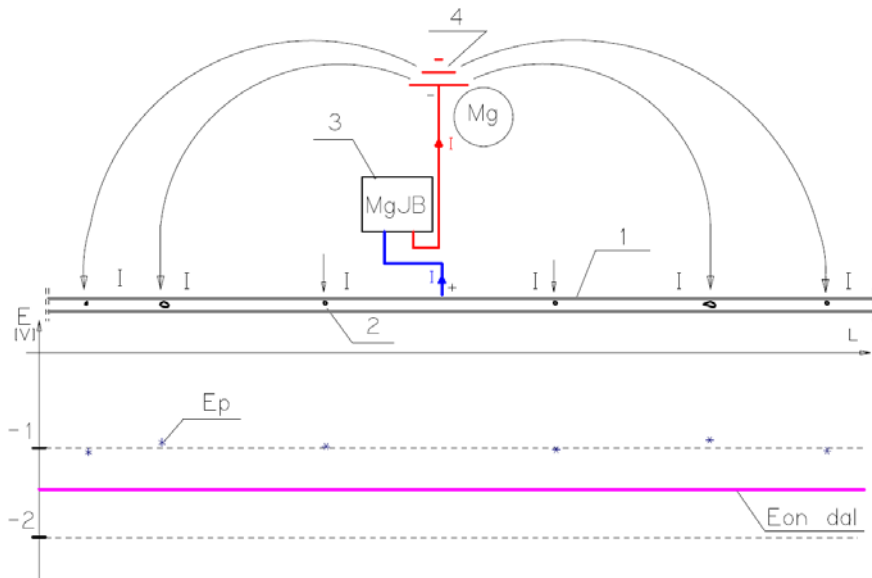
$$E_{on} = E_P - IR_{uk} \quad (11)$$

Rezystancja uziemienia konstrukcji R_{uk} jest w rozważanym przypadku tożsama z rezystancją przejścia konstrukcji – rezystancją przejścia powłoki (z defektami) R_{CO} .

Czy potencjał załączeniowy rurowości w wartości E_a , mierzony względem elektrody odniesienia ustawionej na ziemi odniesienia, spowoduje osiągnięcie w defektach izolacji rurowości potencjałów E_{IRfree} z zakresu potencjałów ochronnych? Zależy to od wielu czynników: wartości E_a , czyli od rodzaju anody, wielkości i kształtów defektów w powłoce, rezystywności gruntu. W przypadku anod magnezowych możliwe jest osiągnięcie potencjału załączeniowego rurowości $E_{on} \approx -1,5$ V względem CSE. Jest to potencjał, który w zdecydowanej większości przypadków zapewnia osiągnięcie potencjałowych kryteriów ochrony w defektach izolacji rurowości pokrytych powłokami WPS. Co więcej, nierzadko jest to potencjał zbyt ujemny, prowadzący do tzw. „przechronienia” takiej konstrukcji, wobec czego niezbędnie jest

zmniejszenie natężenia prądu polaryzacji, np. poprzez zastosowanie odpowiedniego rezystora w obwodzie. Z kolei anody cynkowe umożliwiają osiągnięcie potencjału załączeniowego o maksymalnie ujemnej wartości $E_{on} \approx -1,1$ V względem CSE. Taki potencjał E_{on} umożliwia uzyskanie potencjałów ochrony w defektach izolacji tylko w przypadku nielicznych rurociągów - ułożonych w gruntach o bardzo małych rezystywnościach.

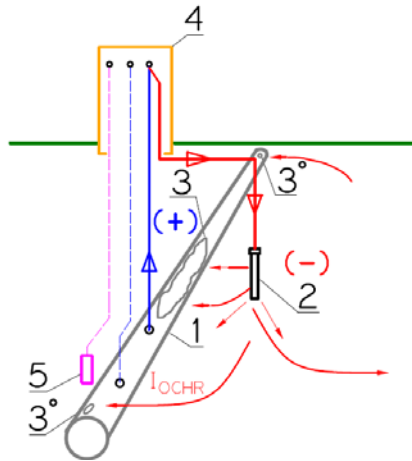
Rozkład potencjału załączeniowego rurociągu pokrytego powłoką WPS jest w praktyce ekwipotencjalny (rys. 7).



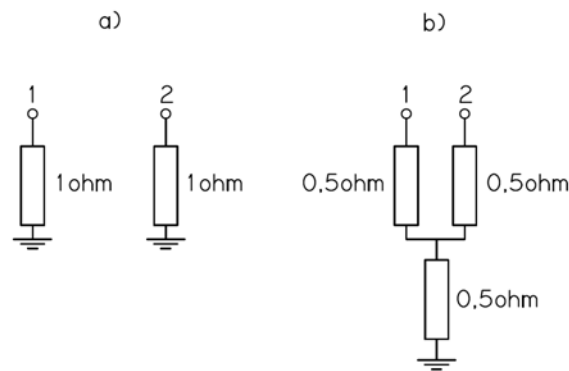
Rys. 7. Przykładowy rozkład potencjału załączeniowego mierzonego względem odległej elektrody odniesienia (E_{on} dal) rurociągu w powłoce izolacyjnej wysokiej jakości oraz potencjałów polaryzacyjnych (E_p) w defektach powłoki; 1 – rurociąg, 2 – defekty w powłoce izolacyjnej, 3 – szafka połączeniowa stacji anod galwanicznych, 4 – uziom anodowy z magnezowych anod galwanicznych

Inaczej układ zachowuje się, jeśli anoda/anody galwaniczne usytuowane są nie na ziemi odniesienia, a w pobliżu odsłoniętej powierzchni metalowej konstrukcji. Jeśli anoda galwaniczna jest przybliżana do konstrukcji, to zmniejsza się rezystancja elektrolitu pomiędzy anodą a konstrukcją, staje się ona zdecydowanie mniejsza, niż suma pełnych rezystancji przejścia anody i konstrukcji (rys. 8 i 9). Tym samym zwiększa się natężenie prądu „emitowanego” przez anodę. Konstrukcja osiąga potencjał załączeniowy o wartości E_a , ale w odległości od konstrukcji znacząco mniejszej. W rezultacie możliwe jest osiągnięcie potencjału ochronnego odsłoniętej powierzchni metalowej konstrukcji w układzie z anodą np. cynkową, ale tylko lokalnie (defekt 3 na rys. 8). Z kolei defekty w izolacji usytuowane w większych odległościach od anody znajdować się będą na ziemi odniesienia w stosunku do anody (defekty 3^o na rys. 8)

Powłoka cynkowa nałożona na stalową konstrukcję jest skrajnym przykładem takiego układu (rys. 10).

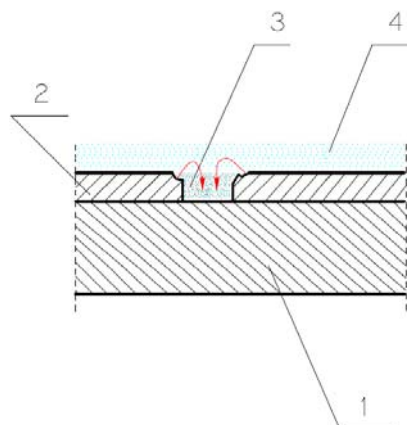


Rys. 8. Wpływ hipotetycznego zbliżenia anody do konstrukcji. Szczegóły w tekście; 1 – rurociąg pokryty powłoką izolacyjną ze zróżnicowanymi defektami, 2 – cynkowa anoda galwaniczna, 3, 3° – defekty w powłoce izolacyjnej, 4 – słupek połączeniowy, 5 – stała elektroda odniesienia



Rys. 9. Przykładowy wpływ odległości pomiędzy uziomami na rezystancję pomiędzy nimi i na rezystancję wypadkową; a) – uziomy usytuowane względem siebie na ziemi odniesienia, b) uziomy usytuowane w pobliżu siebie

Dla przykładu wg rys 8a) rezystancja pomiędzy zaciskami 1 i 2 wynosi 2Ω , natomiast rezystancja wypadkowa równoległego połączenia uziomów wynosi $0,5 \Omega$. W przykładzie wg rys. 8b) rezystancja pomiędzy zaciskami 1 i 2 wynosi 1Ω (dwa razy mniej, niż w przykładzie 8a), a rezystancja wypadkowa równoległego połączenia uziomów wynosi $0,75 \Omega$ (o $0,25 \Omega$ więcej, niż w przykładzie 8a). W miarę przybliżania się uziomów względem siebie, maleje rezystancja pomiędzy nimi i rośnie rezystancja wypadkowa równoległego połączenia tych uziomów.



Rys. 10. Mechanizm elektrochemicznego działania powłoki anodowej Zn na podłożu stalowym
 1 – stal, 2 – powłoka Zn, 3 – nieszczelność w powłoce cynkowej wypełniona elektrolitem i produktami korozji cynku, 4 – elektrolit pokrywający powierzchnię

3. Obliczenia ochrony katodowej konstrukcji pokrytej powłoką izolacyjną o wysokim poziomie szczelności

Najczęściej popełnianymi błędami są: określanie zapotrzebowania prądu ochrony o natężeniu większym od natężenia możliwego do uzyskania i nieuwzględnianie w obliczeniach rezystancji uziemienia konstrukcji.

Jak wcześniej zauważono, w układzie ochrony konstrukcji metalowej pokrytej powłoką izolacyjną o wysokim poziomie szczelności (WPS) występuje graniczne, maksymalne natężenie prądu możliwe do osiągnięcia. Jeśli przyjmie się, że rezystancja uziemienia (przejścia, rozplywu) anody wynosi 0 oraz pominię się polaryzacje: anodową anody i katodową konstrukcji, to na podst. rys. 6b) maksymalne natężenie prądu określa zależność:

$$I_{MAX} = \frac{E_O}{R_{uk}} \quad (12)$$

To natężenie oblicza się w celu kontroli dalszych obliczeń. Natomiast E_O oblicza się według zał. (1), a R_{uk} :

$$R_{uk} = \frac{r_{CO}}{S} \quad (13)$$

gdzie:

- r_{CO} – jednostkowa rezystancja przejścia konstrukcji (w powłoce z defektami) [Ωm^2],
- S – powierzchnia boczna konstrukcji [m^2].

Kolejnym krokiem jest oszacowanie zapotrzebowania prądu ochrony I_P konstrukcji. Tego obliczenia można dokonać kilkoma sposobami.

I sposób obliczenia zapotrzebowania prądu ochrony I_p

Zapotrzebowanie prądu ochrony można obliczyć na podstawie rezystancji przejścia konstrukcji R_{uk} oraz typowych składowych omowych (IR) potencjału załączeniowego, występujących w układach zapewniających spełnienie potencjałowych kryteriów ochrony, na podstawie zal. (9):

$$I_p = \frac{(IR)_p}{R_{uk}} \quad (14)$$

gdzie: $(IR)_p$ jest składową omową potencjału złączeniowego konstrukcji mierzonego względem elektrody odniesienia ustawionej na ziemi odniesienia, występującą w układach zapewniających spełnienie potencjałowych kryteriów ochrony, określaną na podstawie historycznych danych praktycznych.

W zależności od rodzaju anody (potencjału E_a), rezystywności gruntu ρ , stopnia szczelności powłoki izolacyjnej, czyli jednostkowej rezystancji przejścia r_{CO} , w typowych układach z rurociągami pokrytymi powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności $(IR)_p$ przyjmuje się w zakresie 0,3 – 0,6 V.

II sposób obliczenia zapotrzebowania prądu ochrony I_p

W tej metodzie oszacowuje się wielkość odsłoniętej powierzchni S_{def} metalowej podziemnej konstrukcji, a zapotrzebowanie prądu określa się jako iloczyn tej powierzchni i wymaganej gęstości prądu ochrony j_p odniesionej do odsłoniętej powierzchni.

Rezystancja uziemienia konstrukcji R_{uk} w rozważanym przypadku tożsama z rezystancją przejścia konstrukcji/powłoki R_{CO} jest wypadkową rezystancją równoległego połączenia rezystancji przejścia w defektach izolacji R_{def} i rezystancji przejścia powłoki bez defektów R_{CO0} :

$$\frac{1}{R_{uk}} = \frac{1}{R_{def}} + \frac{1}{R_{CO0}} \quad (15)$$

czyli

$$R_{def} = \frac{R_{CO0} \times R_{uk}}{R_{CO0} - R_{uk}} \quad (16)$$

przy czym

$$R_{CO0} = \frac{r_{CO0}}{S} \quad (17)$$

gdzie S jest powierzchnią zewnętrzną konstrukcji, a r_{CO0} jest jednostkową rezystancją powłoki bez defektów; dla powłok polietylenowych i polipropylenowych przyjmuje się na podstawie norm $r_{CO0} = 10^8 \Omega m^2$.

Uwzględniając także zal. (13) otrzymuje się

$$R_{def} = \frac{1}{S} \times \frac{r_{CO0} r_{CO}}{r_{CO0} - r_{CO}} \quad (18)$$

Przyjmuje się, że wszystkie nieszczelności powłoki skoncentrowane są w postaci jednego zastępczego defektu o kształcie koła o średnicy D_{def} :

$$R_{def} = \frac{\rho}{2D_{def}} \quad (19)$$

Na podst. zal. (18) i (19) otrzymuje się:

$$D_{def} = \frac{\rho \times S (r_{CO0} - r_{CO})}{2r_{CO0} r_{CO}} \quad (20)$$

Powierzchnię S_{def} tego zastępczego defektu oblicza się z zależności:

$$S_{def} = \frac{\pi D_{def}^2}{4} \quad (21)$$

zatem

$$S_{def} = \frac{\pi \rho^2 S^2 (r_{CO0} - r_{CO})^2}{16 r_{CO0}^2 r_{CO}^2} \quad (22)$$

a wymagane natężenie prądu polaryzacji konstrukcji:

$$I_p = j_p S_{def} \quad (23)$$

gdzie j_p jest wymaganą gęstością prądu polaryzacji odnoszoną do odsłoniętej powierzchni metalowej konstrukcji podziemnej; w zależności od rodzaju gruntu/środowiska; j_p przyjmuje się z zakresu $0,005 \text{ A/m}^2 - 0,2 \text{ A/m}^2$.

III sposób obliczenia zapotrzebowania prądu ochrony I_p

Przyjęte założenie w metodzie II, iż występuje jeden zastępczy defekt izolacji o kształcie koła, w przypadku konstrukcji o małych r_{CO} w gruntach wysokooporowych czasami prowadzi do obliczeń zbyt dużych powierzchni takich defektów S_{def} i zbyt dużego zapotrzebowania prądu ochrony I_p . W tych przypadkach zasadne jest przyjęcie założenia, iż występuje wiele defektów o założonej średnicy D_{def1} , których równoległe połączenie daje w wyniku rezystancję przejścia R_{def} i sumaryczną powierzchnię S_{def} .

Rezystancja przejścia w pojedynczym defekcie wynosi:

$$R_{def1} = \frac{\rho}{2D_{def1}} \quad (24)$$

Ilość N_{def} takich defektów oszacowuje się na podstawie zależności:

$$N_{def} = \frac{R_{def1}}{R_{def}} \quad (25)$$

Uwzględniając zał. (18) i (24) otrzymuje się:

$$N_{def} = \frac{\rho \times S(r_{CO0} - r_{CO})}{2D_{def1} r_{CO0} r_{CO}} \quad (26)$$

Łączną powierzchnię S_{def} defektów w ilości N_{def} oszacowuje się wg zależności:

$$S_{def} = \frac{\pi \rho D_{def1} S(r_{CO0} - r_{CO})}{8r_{CO0} r_{CO}} \quad (27)$$

a następnie oblicza się zapotrzebowanie prądu I_P – według zał. (23).

Bez względu na wybór metody obliczania wymaganego natężenia prądu I_P nie może ono być większe od natężenia I_{MAX} według zał. (12).

Po dokonaniu obliczeń R_{uk} i I_P wymaganą rezystancję uziomu anodowego R_{ua} oblicza się według zał.:

$$R_{ua} < \frac{U_P - I_P R_{uk}}{I_P} \quad (28)$$

gdzie: U_P jest siłą elektromotoryczną pomniejszoną o polaryzację, według zał. (6).

Kolejnym krokiem jest obliczenie rezystancji uziemienia R_{ua1} pojedynczej anody z wykorzystaniem powszechnie znanych zależności, np. dla pionowego posadowienia anody w aktywatorze:

$$R_{ua1} = \frac{\rho}{2\pi l_a} \ln \left(\frac{2l_a}{D_a} \sqrt{\frac{4h+l_a}{4h-l_a}} \right) + \frac{\rho_a}{2\pi l_a} \ln \frac{D_a}{D_p} \quad (29)$$

gdzie: ρ – rezystywność gruntu, ρ_a – rezystywność aktywatora, h – głębokość posadowienia anody, l_a – długość bloku aktywatora, D_a – średnica bloku aktywatora, D_p – średnica odlewu anody galwanicznej.

Niezbędną ilość N_a anod wylicza się ze znanej zależności:

$$N_a > \frac{kR_{ua1}}{\gamma R_a} \quad (30)$$

gdzie N_a – niezbędna ilość anod, R_{ua1} – rezystancja uziemienia pojedynczej anody, R_a – wymagana rezystancja uziomu anodowego, γ – współczynnik ekranowania anod w uziomie anodowym, k – współczynnik rezerwy.

Następnie celowe jest sprawdzenie, czy ilość i masa anod zapewnią wytwarzanie wymaganego natężenia prądu w zakładanym okresie eksploatacji.

4. Przykładowe obliczenia

Obliczenia autorzy przeprowadzili dla projektowanego, wydzielonego elektrycznie rurociągu w powłoce 3LPE, o średnicy zewnętrznej $D_z = 0,813$ m, długości $L = 700$ m, ułożonego na całej długości w gruncie o rezystywności $\rho = 2000 \Omega\text{m}$, dla trzech poziomów izolacji (z defektami): $r_{\text{CO1}} = 10^5 \Omega\text{m}^2$, $r_{\text{CO2}} = 10^6 \Omega\text{m}^2$ oraz $r_{\text{CO3}} = 10^7 \Omega\text{m}^2$. Uwzględniono anody magnezowe o potencjale $E_a = -1,5$ V wzgl. CSE, o wymiarach: długość $l_p = 1$ m, średnica $D_p = 0,07$ m, każda umieszczona w bloku aktywatora o średnicy $D_a = 0,25$ m i długości $l_a = 1,2$ m. Przyjęto pionowe posadowienie anod na głębokości 1,5 m. Rezystywność aktywatora $\rho_a = 2 \Omega\text{m}$. Zastosowano potencjałowe kryterium ochrony katodowej: $E_p \leq -0,65$ V wzgl. CSE.

Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Zbiorcze zestawienie wyników obliczeń

Lp.	Parametr/wielkość	Zależność	r_{CO1}	r_{CO2}	r_{CO3}
			$10^5 \Omega\text{m}^2$	$10^6 \Omega\text{m}^2$	$10^7 \Omega\text{m}^2$
1.	Powierzchnia boczna rurociągu S [m^2]		1787	1787	1787
2.	Potencjał anody E_a [V]		-1,5	-1,5	-1,5
3.	Potencjał korozyjny konstrukcji E_n [V]		-0,4	-0,45	-0,5
4.	Siła elektromotoryczna ogniwa otwartego E_O [V]	(1)	-1,1	-1,05	-1,0
5.	Rezystancja uziemienia (przejścia) konstrukcji R_{uk} [Ω]	(13)	56	560	5600
6.	Maksymalny prąd I_{MAX} [A]	(12)	0,020	0,0019	0,00018
7.	Przyjęta składowa $(IR)_p$ [V]		0,80	0,75	0,60
8.	Zapotrzebowanie prądu ochrony I_p [A] I sposób	(14)	0,014	0,0013	0,00011
9.	Jednostkowa rezystancja powłoki bez defektów r_{CO0} [Ωm^2]		10^8	10^8	10^8
10.	Rezystancja przejścia defektów R_{def} [Ω]	(18)	56,0	565,3	6218
11.	Oszacowana powierzchnia defektu zastępczego S_{def} [m^2] II sposób	(22)	250,2	2,46	0,02
12.	Zapotrzebowanie prądu ochrony I_p [A] dla gęstości $j_p = 0,005$ A/ m^2 II sposób	(23)	1,25	0,0123	0,0001
13.	Założona średnica pojedynczego defektu D_{def1} [m]		0,1	0,1	0,1
14.	Ilość N_{def} założonych defektów o średnicy D_{def1}	(26)	178,5	17,7	1,6
15.	Łączna powierzchnia N_{def} defektów [m^2]	(27)	1,40	0,139	0,0126
16.	Zapotrzebowanie prądu ochrony I_p [A] dla gęstości $j_p = 0,01$ A/ m^2 III sposób	(23)	0,014	0,0014	0,00013
17.	Siła elektromotoryczna bez polaryzacji U_p [V]	(6)	0,85	0,85	0,85

18.	Wymagana rezystancja uziomu anodowego R_{ua} [Ω] I sposób	(28)	3,48	74,7	2350
19.	Wymagana rezystancja uziomu anodowego R_{ua} [Ω] II sposób	(28)			2904
20.	Wymagana rezystancja uziomu anodowego R_{ua} [Ω] III sposób	(28)	4,75	51,9	942
21.	Rezystancja uziemienia pojedynczej anody R_{ua1} [Ω]	(29)	660	660	660
22.	Wymagana ilość anod N_a I sposób	(30)	190	9	1
23.	Wymagana ilość anod N_a II sposób	(30)			1
24.	Wymagana ilość anod N_a III sposób	(30)	139	13	1

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że dla założonego przypadku, w którym występuje jeden zastępczy defekt izolacji (II sposób), jakąś ochronę katodową można uzyskać jedynie w przypadku powłoki o $r_{CO} = 10^7 \Omega m^2$ i to przy założeniu, że gęstość prądu polaryzacji j_p odnośzona do odsłoniętej powierzchni metalowej nie będzie większa niż 5 mA/m^2 (większej gęstości nie uda się uzyskać).

Jeśli przyjmie się, że występuje wiele defektów izolacji, każdy o średnicy $D_{defl} = 10 \text{ cm}$, to skuteczną ochronę katodową (prowadzącą do potencjałów polaryzacji w defektach $E_p \leq -0,65$) uzyska się dla każdego z rozpatrywanych poziomów izolacji rurociągu, dla przyjętej gęstości prądu $j_p = 10 \text{ mA/m}^2$. Dla poziomu izolacji $r_{CO} = 10^5 \Omega m^2$ występować będzie 178 takich defektów, a w celu ochrony katodowej niezbędne będzie zainstalowanie ponad 139 anod. Dla poziomu izolacji $r_{CO} = 10^7 \Omega m^2$ występować będą 2 takie defekty, a w celu ochrony katodowej niezbędne będzie zainstalowanie 1 anody.

Tablica 2. Podsumowanie wyników uzyskanych metodą I

Lp.	Parametr/wielkość	Zależność	r_{CO1}	r_{CO2}	r_{CO3}
			$10^5 \Omega m^2$	$10^6 \Omega m^2$	$10^7 \Omega m^2$
1.	Rezystancja uziemienia (przejścia) konstrukcji R_{uk} [Ω]		56,0	560	5600
2.	Zapotrzebowanie prądu ochrony I_p [A] I sposób	(14)	0,014	0,0013	0,00011
3.	Wymagana rezystancja uziomu anodowego R_{ua} [Ω] I sposób	(28)	3,48	74,7	2348
4.	Wymagana ilość anod N_a I sposób	(30)	190	9	1

Tablica 3. Podsumowanie wyników uzyskanych metodą II, w której zakłada się występowanie jednego zastępczego defektu

Lp.	Parametr/wielkość	Zależność	r_{CO1}	r_{CO2}	r_{CO3}
			$10^5 \Omega m^2$	$10^6 \Omega m^2$	$10^7 \Omega m^2$
1.	Rezystancja uziemienia (przejścia) konstrukcji $R_{uk} [\Omega]$		56,0	560	5600
2.	Oszacowana powierzchnia zastępczego defektu $S_{def} [m^2]$ II sposób	(22)	250	2,46	0,02
3.	Zapotrzebowanie prądu ochrony $I_p [A]$ dla gęstości $j_p = 0,005 A/m^2$ II sposób	(23)	1,25	0,012	0,0001
4.	Wymagana rezystancja uziomu anodowego $R_{ua} [\Omega]$ II sposób	(28)	Brak możliwości ochrony		2904
5.	Wymagana ilość anod N_a II sposób	(30)	Brak możliwości ochrony		1

Tablica 4. Podsumowanie wyników uzyskanych metodą III, w której zakłada się występowanie wielu defektów izolacji o średnicy D_{def1}

Lp.	Parametr/wielkość	Zależność	r_{CO1}	r_{CO2}	r_{CO3}
			$10^5 \Omega m^2$	$10^6 \Omega m^2$	$10^7 \Omega m^2$
1.	Rezystancja uziemienia (przejścia) konstrukcji $R_{uk} [\Omega]$		55,96	559,6	5596
2.	Założona średnica pojedynczego defektu $D_{def1} [m]$		0,1	0,1	0,1
3.	Ilość N_{def} założonych defektów o średnicy D_{def1}	(26)	178,5	17,7	1,6
4.	Łączna powierzchnia N_{def} defektów $[m^2]$	(27)	1,40	0,139	0,0126
5.	Zapotrzebowanie prądu ochrony $I_p [A]$ dla gęstości $j_p = 0,01 A/m^2$ III sposób	(23)	0,014	0,0014	0,00013
6.	Wymagana rezystancja uziomu anodowego $R_{ua} [\Omega]$ III sposób	(28)	4,75	51,9	942
7.	Wymagana ilość anod N_a III sposób	(30)	139	13	1

Obliczenia projektowe

Dla rurociągu poprzednio omawianego projektant obliczył zapotrzebowanie prądu ochrony z iloczynu powierzchni bocznej rurociągu S i zakładanej gęstości prądu odnoszonej do tej powierzchni $j = 0,02 \text{ mA/m}^2$, otrzymując $I_p = 35,74 \text{ mA}$ ($0,03574 \text{ A}$). Tymczasem uzyskanie takiego prądu dla tego rurociągu nie jest możliwe w przypadku powłok o $r_{CO} \geq 10^5 \Omega m^2$. Wątpliwe jest przyjmowanie (w obliczeniach) gęstości prądu właściwej dla powłok o prawdopodobnie $r_{CO} \approx X \cdot 10^4 \Omega m^2$ w sytuacji, gdy rurociąg w powłoce 3LPE ułożony jest w gruncie o rezystywności $2000 \Omega m$, a inwestor określił następujące kryterium odbiorowe izolacji „po zasypaniu”: $r_{CO} \geq 10^6 \Omega m^2$.

Projektant obliczył prąd emitowany przez pojedynczą anodę z ilorazu różnicy przyjętego potencjału ochrony $E_p = -0,85 \text{ V}$ i potencjału anody $E_a = -1,5 \text{ V}$ oraz rezystancji przejścia pojedynczej anody $R_{ua1} = 660 \Omega$, otrzymując $I_{a1} = 0,98 \text{ mA}$. Następnie obliczył ilość anod N_a z ilorazu zapotrzebowania prądu I_p oraz tak obliczonego prądu pojedynczej anody I_{a1} , otrzy-

mując $N_a = 37$ anod. W obliczeniach prądu projektant pominął rezystancję przejścia konstrukcji. Ponadto wątpliwe jest przyjmowanie potencjałowego kryterium ochrony katodowej na poziomie $-0,85$ V w przypadku stalowego rurociągu ułożonego w gruncie o rezystywności $2000 \Omega\text{m}$.

Autorzy niniejszej pracy obliczyli dla tego rurociągu, iż, gdy $r_{CO} = 10^6 \Omega\text{m}^2$, niezbędna ilość anod wynosi, w zależności od metody: 9 lub 13, a więc kilkakrotnie mniej. W przypadku $r_{CO} = 10^7 \Omega\text{m}^2$ wg obliczeń autorów niezbędna ilość anod wynosi 1.

5. Podsumowanie

Projektant obliczył, przyjmując gęstość prądu ochrony wynikającą zapewne z poziomu izolacji rurociągu $r_{CO} \approx X \cdot 10^4 \Omega\text{m}^2$, iż w celu zapewnienia ochrony katodowej niezbędne będzie zamontowanie ok. 37 magnezowych anod galwanicznych. Autorzy niniejszej pracy z kolei obliczyli, iż w przypadku nawet wyższego poziomu izolacji $r_{CO} \approx 10^5 \Omega\text{m}^2$, w celu zapewnienia ochrony zapewniającej osiągnięcie potencjałowego kryterium ochrony tego rurociągu ułożonego w gruncie o rezystywności $2000 \Omega\text{m}$ niezbędne jest zamontowanie stu kilkudziesięciu anod.

Autorzy niniejszej pracy są przekonani o prawidłowości własnych obliczeń – na podstawie elementarnych praw obliczeń obwodów elektrycznych. Zdaniem autorów, podstawową przyczyną rozbieżności jest nieuwzględnienie przez projektanta w obliczeniach w odpowiedni sposób rezystancji przejścia konstrukcji. Sprawa sprowadza się od obliczenia zastępczego układu przedstawionego na rys. 11. Zależności (28) i (30) są rezultatem rozwiązania tego układu.

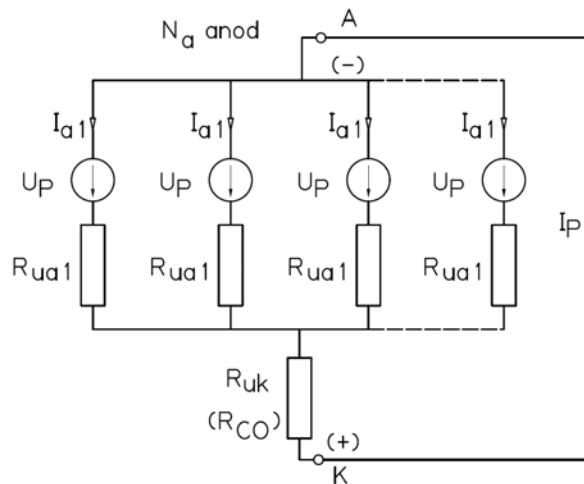
Jeśli przyjmie się założenie, że poszczególne anody nie oddziałują na siebie (są zakopane w odpowiednio dużych wzajemnych odległościach), to na podstawie rozwiązania układu otrzymuje się:

$$I_p = \frac{U_p}{\frac{R_{a1}}{N_a} + R_{uk}} \quad (31)$$

$$N_a = \frac{I_p}{\frac{U_p}{R_{a1}} + I_p \frac{R_{uk}}{R_{a1}}} \quad (32)$$

$$I_{a1} = \frac{U_p}{R_{a1}} - I_p \frac{R_{uk}}{R_{a1}} \quad (33)$$

Zatem prąd I_{a1} płynący w pojedynczej gałęzi anodowej nie jest, jak to liczył projektant, ilorazem U_p/R_{a1} – określa go zależność (33). Uwzględniając przyjętą przez projektanta gęstość prądu ochrony i wyliczone niezbędne natężenie prądu polaryzacji I_p (35,7 mA), zasadne jest przyjęcie, iż rezystancja przejścia konstrukcji R_{uk} wynosi 15Ω . Stosując I_p i R_{a1} obliczone przez projektanta oraz przyjęte przez niego założenia, na podst. zal. (32) otrzymana się $N_a = 207$ anod, a nie, jak wyliczył projektant, 37.



Rys. 11. Zastępczy schemat elektryczny układu N_a anod galwanicznych przyłączonych do konstrukcji K, przy założeniu, że poszczególne anody nie oddziałują na siebie; U_p – siła elektromotoryczna ogniwa otwartego, pomniejszona o polaryzację, R_{uk} – rezystancja przejścia konstrukcji (inaczej R_{CO}), R_{ua1} – rezystancja uziemienia pojedynczej anody, I_p – wymagany prąd polaryzacji konstrukcji

Autorzy pracy stwierdzają, iż ochrona katodowa zaprojektowana przez projektanta, realizowana za pomocą 37 anod, będzie skuteczna dopiero przy poziomach izolacji $r_{CO} \geq 10^6 \Omega m^2$.

Przykład pokazuje, iż co prawda możliwe jest zrealizowanie ochrony katodowej za pomocą anod galwanicznych, konstrukcji ułożonych w gruntach wysokooporowych, jednakże taka ochrona katodowa w takich gruntach ma uzasadnienie techniczno - ekonomiczne w przypadku konstrukcji pokrytych powłokami o $r_{CO} \geq 10^6 \Omega m^2$.

Zdaniem autorów, w przypadku przedmiotowego, projektowanego rurociągu, po uwzględnieniu rodzaju powłoki izolacyjnej (3LPE) oraz wysokiej rezystywności gruntu, kryterium odbiorowe izolacji „po zasypaniu” powinno być następujące: $r_{CO} \geq 10^7 \Omega m^2$, natomiast obliczenia ochrony katodowej powinny być przeprowadzone dla niższego poziomu izolacji $r_{CO} = 10^6 \Omega m^2$, w celu zapewnienia rezerwy na sytuacje awaryjne.

6. Wnioski

1. W przypadku konstrukcji metalowych pokrytych powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności, w tym ułożonych w gruntach o wysokiej rezystywności, możliwe jest stosowanie ochrony katodowej realizowanej za pomocą anod galwanicznych.
2. Ochrona katodowa za pomocą anod galwanicznych rurociągów ułożonych w gruntach wysokooporowych ma uzasadnienie techniczno-ekonomiczne w przypadku konstrukcji pokrytych powłokami o $r_{CO} \geq 10^6 \Omega m^2$.
3. W układach ochrony katodowej konstrukcji pokrytych powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności, w tym realizowanej za pomocą anod galwanicznych, z reguły największą rezystancją w obwodzie jest rezystancja przejścia (uziemienia) kon-

strukcji. Ta rezystancja powinna być uwzględniana w odpowiedni sposób w obliczeniach ochrony katodowej.

4. Dla układu ochrony katodowej konstrukcji pokrytej powłoką izolacyjną o wysokim poziomie szczelności, realizowanej za pomocą anod galwanicznych, określone są: minimalny (maksymalnie ujemny), możliwy do osiągnięcia, potencjał załączeniowy konstrukcji i maksymalny, graniczny, możliwy do osiągnięcia prąd polaryzacji.
5. Określając wymagane natężenie prądu polaryzacji należy mieć na uwadze, czy jest ono osiągalne w układzie ochrony. Zakładana gęstość prądu ochrony i sam prąd ochrony powinny być adekwatne do przyjętego poziomu izolacji konstrukcji.

Literatura

- [1] PN-E-05030-10:2004 Ochrona przed korozją – Elektrochemiczna ochrona katodowa i anodowa – Terminologia.
- [2] ST-IGG-0602: 2013 Ochrona przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych – Ochrona katodowa – Projektowanie, budowa i użytkowanie.
- [3] PN-EN ISO 8044:2002 Korozja metali i stopów – Podstawowe terminy i definicje.

Niniejsza praca jest pomyślana jako materiał szkoleniowy dla kursów certyfikacyjnych personelu ochrony katodowej drugiego stopnia wg PN-EN 15257.

This paper is meant as a basis for training courses for second grade staff certification.

