

Rezystancja przejścia, gęstość prądu ochrony i potencjał załączeniowy – wzajemne relacje

Maciej Markiewicz

Rezystancja przejścia konstrukcji

- Parametrem charakteryzującym szczelność powłoki izolacyjnej jest rezystancja przejścia konstrukcji (rurociągu) R_{co} czyli opór elektryczny pomiędzy izolowaną konstrukcją a ziemią [Ω]
- Wartość jednostkowej rezystancji przejścia r_{co} jest parametrem projektowym dla danego projektowanego rurociągu, wyrażonym w Ωm^2 . Jest to rezystancja przejścia $1 m^2$ powierzchni rurociągu pokrytego daną powłoką izolacyjną

$$r_{co} = \rho \cdot l / S$$

gdzie:

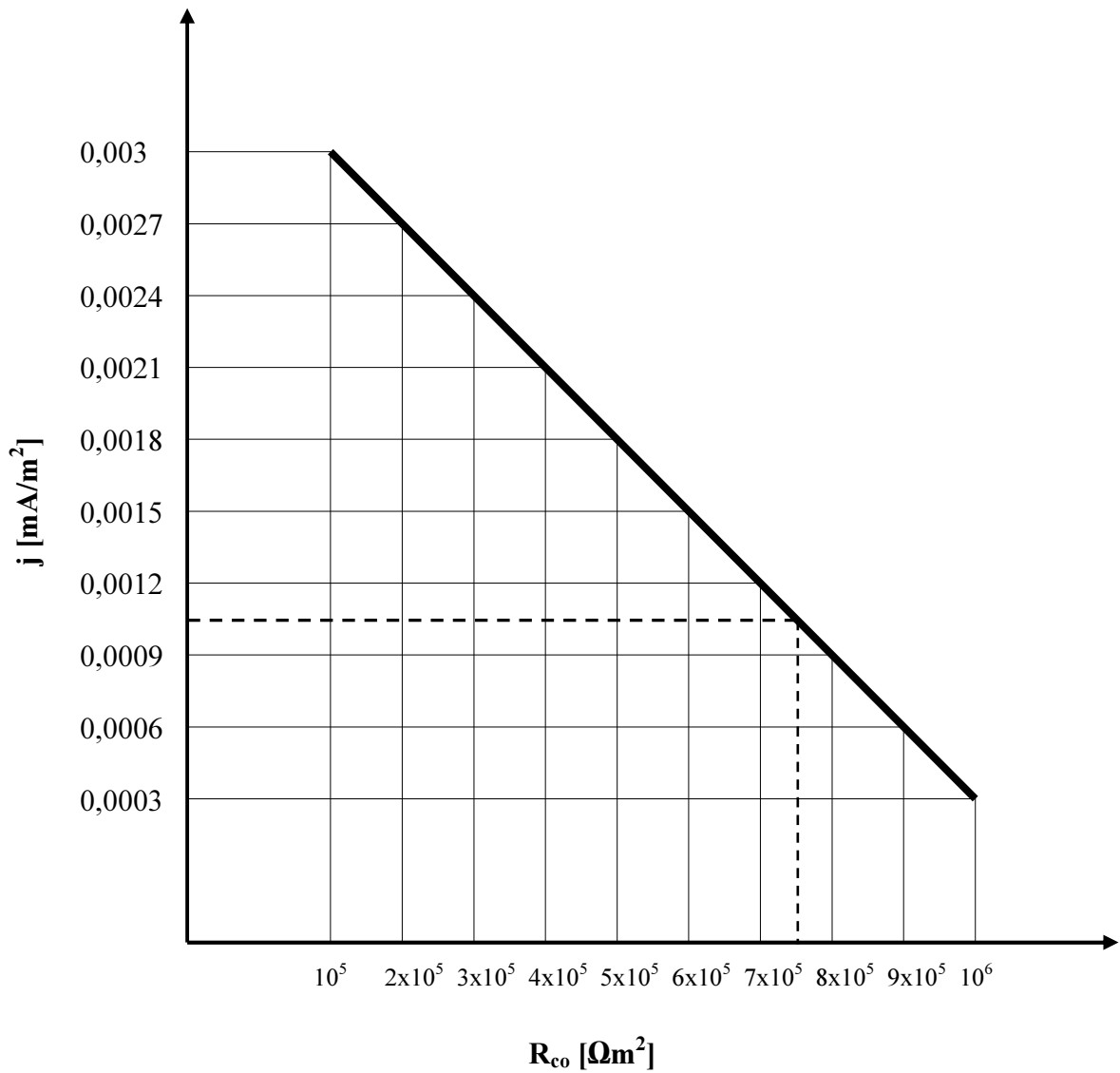
ρ – rezystywność materiału powłoki, Ωm

l – grubość powłoki, m

S – powierzchnia powłoki w $m^2 = 1$

Rezystancja przejścia i średnia gęstość prądu ochrony katodowej

- Średniej jednostkowej rezystancji przejścia r_{co} [Ωm^2] odpowiada średnia gęstość potrzebnego prądu ochrony katodowej j_{sr} [mA/m^2]. Jest ona, podobnie jak jednostkowa rezystancja przejścia powłoki izolacyjnej parametrem wskaźnikowym stosowanym w obliczeniach ochrony katodowej projektowanych rurociągów. Obliczenia przeprowadza się zwykle dla $r_{co} = 10^6 \Omega m^2$ i odpowiadającej jej średniej gęstości prądu ochrony katodowej $0,0003 mA/m^2$
- Określając wartość r_{co} decydujemy o zbiorczej powierzchni defektów powłoki izolacyjnej i równocześnie określamy **wskaźnikowo** wartość natężenia prądu ochrony katodowej ($I_{ok} = j_{sr} \times S$) potrzebną do spolaryzowania katodowego tej powierzchni
- Średnia gęstość wymaganego prądu ochrony katodowej j_{sr} [mA/m^2] jest odwrotnie proporcjonalna do średniej jednostkowej rezystancji przejścia r_{co} [Ωm^2]. Załączony wykres przedstawia przykładową zależność j_{sr} od r_{co} dla przedziału jednostkowej rezystancji przejścia od 10^5 do $10^6 \Omega m^2$.



Zależność średniej gęstości prądu ochrony katodowej od średniej jednostkowej rezystancji przejścia

- W warunkach eksploatacyjnych jednostkową rezystancję przejścia powłoki izolacyjnej wyznacza się dla celów kontrolnych. Obniżenie rezystancji przejścia odcinka rurociągu jest wynikiem pojawienia się defektów powłoki izolacyjnej lub doziemienia rurociągu. Zjawiska te można dostrzec na rurociągu o bardzo dobrej powłoce izolacyjnej, natomiast pozostaną one niezauważone na rurociągu o starej bitumicznej powłoce izolacyjnej o jednostkowej rezystancji przejścia r_{co} rzędu 10^4 lub $10^3 \Omega m^2$.
- Na podstawie wartości r_{co} lub j_{sr} nie można sądzić o skuteczności ochrony katodowej rurociągu. Skuteczność ochrony odnosi się do poszczególnych defektów powłoki. Wartość rezystancji przejścia może być zgodna z wymaganiem, a równocześnie w konkretnych miejscach defektów powłoki może być nie spełnione kryterium ochrony katodowej.

Ochrona rurociągu przed korozją za pomocą powłoki izolacyjnej i ochrony katodowej

- Przykład: rurociąg DN500, L = 10 km, powierzchnia zewnętrzna dla Dz = 508 mm
S = 15960 m²
- powłoka izolacyjna 3LPE
- r_{co} powłoki pozbawionej defektów = $10^8 \Omega m^2$

(taką jednostkową rezystancję przejścia ma powłoka 3LPE po 100 dniach przebywania w roztworze NaCl)

- gdyby powłoka izolacyjna rurociągu była bezdefektowa. to:

$$R_{codb} = 10^8 / 15960 = 6266 \Omega$$

- założmy, że wymagamy aby średnia jednostkowa rezystancja przejścia powłoki r_{co} wynosiła $10^6 \Omega m^2$
- Co oznacza to wymaganie?

$$R_{co} = 10^6 / 15960 = 62,66 \Omega$$

$$R_{co} = R_{codb} * R_{def} / (R_{codb} + R_{def})$$

stąd:

$$R_{def} = 6266 * 62,66 / (6266 - 62,66) = 63,29 \Omega$$

- zakładamy, że:
- powłoka „defektowa” R_{def} jest sprowadzona do jednego defektu oraz, że jest to defekt kołowy, a rezystancja elektrolitu w defekcie jest do pominięcia
- wówczas:

$$R_{def} = \rho / 2D$$

stąd dla $R_{\text{def}} = 63,29 \Omega$ i ρ np. $100 \Omega\text{m}$:

$$D = 0,79 \text{ m} = 79 \text{ cm}$$

$$S_{\text{def}} = 4902 \text{ cm}^2$$

Powyższy sposób wyznaczenia wartości R_{def} jest prawidłowy, ale gdyby pominąć równoległe połączenie rezystancji przejścia bezdefektowej i rezystancji przejścia defektu, to skutkowałoby to tylko niewielkim błędem prowadzącym do obliczenia większej o 2 % powierzchni defektu:

- gdyby przyjąć, że $R_{\text{def}} = R_{\text{co}} = 62,66 \Omega$, to:

$$D = 0,798 \text{ m} = 79,8 \text{ cm}$$

$$S_{\text{def}} = 5001 \text{ cm}^2$$

Uwzględnienie rezystancji elektrolitu w defekcie

- Rezystancja przejścia defektu z uwzględnieniem rezystancji elektrolitu w defekcie wynosi:

$$R_{\text{def}} = \frac{\rho}{2D} + \frac{4\rho t}{\pi D^2}$$

gdzie t – grubość powłoki = $0,006 \text{ m}$

$$\pi R_{\text{def}} D^2 - \pi \rho D / 2 - 4 \rho t = 0$$

- Z rozwiązania powyższego równania kwadratowego względem D , dla $R_{\text{def}} = 62,66 \Omega$ otrzymuje się $D = 81,2 \text{ cm}$ i $S_{\text{def}} = 5181 \text{ cm}^2$

Powierzchnia zbiorczego defektu jest więc większa o 3,6% od powierzchni wyliczonej z pominięciem rezystancji elektrolitu w defekcie

- Dla małych defektów rezystancja elektrolitu w defekcie staje się znacząca. Np. dla defektu o powierzchni 10 cm^2 stanowi ona 30 % wypadkowej rezystancji przejścia defektu, a w przypadku bardzo małego defektu 1 cm^2 jest o 35 % większa od rezystancji uziemienia defektu.

Określenie potrzebnego natężenia prądu ochrony katodowej na powierzchni zbiorczego defektu

- Dla $r_{\text{co}} 10^6 \Omega\text{m}^2$ i $j_{\text{sr}} = 0,0003 \text{ mA/m}^2$

szacunkowa wartość natężenia potrzebnego prądu ochrony katodowej:

$$I = 0,0003 * 15960 = 4,79 \text{ mA}$$

- Gęstość prądu ochrony katodowej na powierzchni jednego dużego zbiorczego defektu:

$$j_d = \frac{4,79 * 10^{-3}}{5001 * 10^{-4}} = 9,58 * 10^{-3} = 0,00958 \text{ A/m}^2$$

Zamiana zbiorczego defektu na 100 defektów

- Załóżmy, że na zbiorczy defekt o powierzchni 5001 cm^2 i rezystancji przejścia $R_{\text{co}} = 62,66 \Omega$ składa się 100 jednakowych defektów o $R_{\text{def100}} = 6266 \Omega$ każdy
- Powierzchnie defektów będą małe, należy więc uwzględnić rezystancje elektrolitów w defektach

$$R_{\text{def}} = \frac{\rho}{2D} + \frac{4\rho t}{\pi D^2}$$

z rozwiązania powyższego równania względem D , dla $\rho = 100 \Omega\text{m}$, $t = 0,006 \text{ m}$, otrzymuje się:

$$D_{\text{def100}} = 1,57 \text{ cm}$$

$$S_{\text{def100}} = 1,94 \text{ cm}^2$$

$$j_{\text{def100}} = \frac{4,79 * 10^{-3} * 10^{-2}}{1,94 * 10^{-4}} = 0,247 \text{ A/m}^2$$

Jaki Eon na powierzchni defektu ?

- Na powierzchni każdego ze 100 defektów w powłoce izolacyjnej rurociągu potencjał ochrony E_p wiarygodnie zmierzony ma wynosić $-0,95 \text{ V}$ względem elektrody Cu/nas.CuSO_4 (przyjmujemy najbardziej ujemną wartość potencjału ochrony jak wymienia norma *PN-EN 12954*).
- Jaki ma być potencjał załączeniowy E_{on} na powierzchni każdego ze 100 defektów?

$$I_{\text{def100}} = 0,247 * 1,94 * 10^{-4} = 4,8 * 10^{-5} \text{ A} = 48 \mu\text{A}$$

$$E_{\text{on}} = -I_{\text{def100}} * R_{\text{def100}} + E_p$$

$$E_{\text{on}} = -4,8 * 10^{-5} * 6266 - 0,95 = -1,25 \text{ V}$$

- Ten sam przykład: rurociąg DN500, $L = 10 \text{ km}$, $S = 15960 \text{ m}^2$ ale: $r_{\text{co}} = 3 * 10^5 \Omega\text{m}^2$ (niewygórowane wymaganie), $\rho = 50 \Omega\text{m}$

$$R_{\text{co}} = 3 * 10^5 / 15960 = 18,8 \Omega$$

- 100 defektów; $R_{\text{def100}} = 1880 \Omega$ każdy
- Szacunkowa wartość natężenia potrzebnego prądu ochrony katodowej dla $r_{\text{co}} 3 * 10^5 \Omega\text{m}^2$ z wykresu:

$$j_{\text{sr}} = 0,0027 \text{ mA/m}^2$$

$$I = 0,0027 * 15960 = 43,1 \text{ mA}$$

$$R_{\text{def}} = \frac{\rho}{2D} + \frac{4\rho t}{\pi D^2}$$

z rozwiązania powyższego równania względem D, dla $\rho = 50 \Omega\text{m}$, $t = 0,006 \text{ m}$, otrzymuje się:

$$D_{\text{def}100} = 2,24 \text{ cm}$$

$$S_{\text{def}100} = 3,93 \text{ cm}^2$$

Jaki Eon na powierzchni defektu ?

$$j_{\text{def}100} = \frac{43,1 * 10^{-3} * 10^{-2}}{3,93 * 10^{-4}} = 43,1 * 10^{-3} * 10^{-2} / 3,93 * 10^{-4} = 1,1 \text{ A/m}^2$$

$$I_{\text{def}100} = 1,1 * 3,93 * 10^{-4} = 4,32 * 10^{-4} \text{ A} = 432 \mu\text{A}$$

$$E_{\text{on}} = -I_{\text{def}100} * R_{\text{def}100} + E_p$$

$$E_{\text{on}} = -4,32 * 10^{-4} * 1880 - 0,95 = -0,81 - 0,95 = -1,76 \text{ V}$$

- gdyby rurociąg był ułożony w gruncie o $\rho = 100 \Omega\text{m}$:

$$D_{\text{def}100} = 3,74 \text{ cm}$$

$$S_{\text{def}100} = 11 \text{ cm}^2$$

$$j_{\text{def}100} = \frac{43,1 * 10^{-3} * 10^{-2}}{11 * 10^{-4}} = 0,39 \text{ A/m}^2$$

$$I_{\text{def}100} = 0,39 * 11 * 10^{-4} = 4,29 * 10^{-4} \text{ A} = 429 \mu\text{A}$$

Jak widać, takim samym prądem są teraz chronione większe defekty, co oznacza, że gęstości prądu na powierzchni tych defektów są odpowiednio mniejsze, a potencjały załączeniowe Eon są praktycznie jednakowe

Jaka musi być wartość rezystancji przejścia dla z góry narzuconych Eon i IOK ?

- Ten sam przykład: rurociąg DN500, L = 10 km, S = 15960 m²
- Zakładamy polaryzację defektów powłoki do potencjałów załączeniowych Eon nie bardziej ujemnych niż -1,3 V, prądem polaryzacji nie większym niż 0,5 mA

$$E_{\text{on}} = -I * R_{\text{co}} + E_p$$

stąd:

$$R_{\text{co}} = \frac{(1,3 - 0,95)}{0,5 * 10^{-3}} = 700 \Omega$$

$$r_{\text{co}} = 700 * 15960 = 1,12 * 10^7 \Omega\text{m}^2$$

- Ten sam przykład: rurociąg DN500, L = 10 km, S = 15960 m² $r_{\text{co}} = 10^5 \Omega\text{m}^2$

- Wymagając średniej jednostkowej rezystancji przejścia rurociągu $r_{co} = 10^5 \Omega m^2$, akceptujemy defekty o łącznej powierzchni $50 m^2$, stanowiącej około 0,3 % powierzchni rurociągu.
- Nawet jeden defekt o średnicy 1 mm, powierzchni $0.785 mm^2$ i rezystancji przejścia $44,3 k\Omega$ wpływa na jednostkową rezystancję przejścia rurociągu r_{co} , która wyniesie $8,75 \cdot 10^7 \Omega m^2$. Rezystancji tej, bliskiej rezystancji powłoki bezdefektowej, odpowiada $j_{sr} = 0,000003 mA/m^2 = 0,003 \mu A/m^2$
- Natężenie prądu ochrony katodowej rurociągu wyniesie:

$$I = 0,000003 * 15960 = 0,048 mA$$

stąd gęstość prądu na powierzchni defektu $0,785 mm^2$:

$$j_d = \frac{0,048 * 10^{-3}}{0,785 * 10^{-6}} = 61 A/m^2$$

Zagrożenie korozyjne prądem błędzącym lub przemiennym na powierzchni małych defektów powłoki

- Paradoksalnie, zagrożenie rurociągu korozją powodowaną przez prąd błędzący lub prąd przemienny może być większe w przypadku szczelnej powłoki polimerowej o niewielkiej liczbie defektów niż w przypadku porowatej powłoki bitumicznej o równomiernie rozmieszczonych defektach. Gęstości prądu wypływającego z rurociągu poprzez małe defekty powłoki będą znaczne, co może prowadzić do uszkodzeń korozyjnych. Jeżeli prąd ochrony katodowej jest w stanie skompensować prądy błędzące, to problem zagrożenia nie istnieje. Jeżeli ochrona katodowa nie neutralizuje działania prądów błędzących, to rozwiązaniem może być odprowadzenie prądu błędzącego do sieci powrotnej trakcji elektrycznej lub naprawa defektów powłoki.