

XVI Krajowa Konferencja POMIARY KOROZYJNE
W OCHRONIE ELEKTROCHEMICZNEJ
Jastarnia, 17–19. 10. 2022

**OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU
W PRZEWIERCIE KIEROWANYM**

Maciej Markiewicz, Hanna Matus



OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Metoda przewiertu kierowanego (HDD) stała się, obok metody Direct Pipe i mikrotunelingu, standardem przy przekraczaniu rurociągami przeszkód terenowych, takich jak rzeki, kanały, tereny bagienne, drogi kołowe, linie kolejowe. W Polsce jest stosowana od początku lat 90 tych. Długości odcinków wykonanych przewiertem wynoszą zwykle kilkaset metrów, ale zdarzają się przewierty o długości przekraczającej 2000 m.
- ▶ Podczas wykonywania otworu pilotażowego, rozwiercania otworu oraz przeciągania rurociągu stosowana jest płuczka wiertnicza. Największym zagrożeniem dla stabilności otworu jest ucieczka płuczki w warstwy gruntu o dużej chłonności, np. skupiska luźnych otoczków. Ucieczka płuczki poza nieszczelny otwór powoduje jego zapadanie się, przez co kamienie mają bezpośredni kontakt z wciągany rurociągiem. Ostre krawędzie kamieni pokruszonych podczas rozwiercania otworu powodują uszkodzenia powłoki rurociągu.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Powłoka izolacyjna odcinka rurociągu przeznaczonego do przewiertu powinna być szczególnie odporna na uszkodzenia. Powinna mieć dużą wytrzymałość na ścinanie, odporność na wgniatanie, obniżony współczynnik tarcia. Cechy te generalnie posiadają fabryczne powłoki trzywarstwowe z zewnętrzną warstwą polietylenu lub polipropylenu.
- ▶ W przypadku powłok 3LPE najczęściej stosuje się wykonanie specjalne tj. z warstwą zewnętrzną z polietylenu średniej gęstości (MDPE). Do tego stosuje się dodatkowe zabezpieczenie mechaniczne powłoki w postaci laminatu o grubości do 5 mm. Jest to wielowarstwowa powłoka np. ze sztucznego jedwabiu nasyconego epoksydem.
- ▶ W przewiertach rurociągów, gdy wymagana jest izolacja bezdefektowa, stosuje się izolacje 3LPP o grubości powłoki 8-11 mm. Powłoki te nie wymagają dodatkowego zabezpieczenia w postaci materiałów nasączanych żywicą epoksydową. Na spoiny stosuje się wówczas opaski termokurczliwe kompatybilne z izolacją rury przewodowej lub opaski PUPP, pozwalające na uzyskanie jednolitej powierzchni z rurą przewodową.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Zgodnie z wymaganiami ST-IGG 0602:2013, dla odcinków wykonanych metodą przewiertu kierowanego HDD, natężenie prądu polaryzacji katodowej przy potencjale załączeniowym rurociągu $E_{on} = -1,3$ V wzgl. CSE powinno być mniejsze od 0,5 mA. Kryterium to dopuszcza występowanie defektów izolacji, które mogą być skutecznie chronione prądem polaryzacji katodowej rurociągu.
- ▶ Kryterium nie może być stosowane w przypadku rurociągów narażonych na nadmierne oddziaływanie prądu przemiennego oraz negatywne oddziaływanie prądów błędnych, gdzie wymagana jest izolacja bezdefektowa lub bliska bezdefektowej. Bezdefektowość izolacji można ocenić na podstawie pomiarów jednostkowej rezystancji przejścia powłoki rurociągu. Przyjmuje się, że o braku defektów izolacji świadczy jednostkowa rezystancja przejścia $r_{co} \geq 10^9 \Omega m^2$.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Jednostkowa rezystancja powłoki odcinka rurociągu r_{co} względem ziemi, odniesiona do 1 m² powierzchni rurociągu jest definiowana jako:

$$r_{co} = \frac{|E_{on} - E_{off}|_{\acute{s}r}}{I} \cdot \pi DL \quad [\Omega m^2]$$

gdzie:

E_{on} – potencjał załączeniowy rurociągu zmierzony przy włączonym źródle prądu polaryzacji, V

E_{off} – potencjał wyłączeniowy rurociągu zmierzony przy wyłączonym źródle prądu polaryzacji, V

$|E_{on} - E_{off}|_{\acute{s}r}$ – średnia składowa omowa potencjału załączeniowego rurociągu na badanym odcinku, V

I – prąd polaryzacji rurociągu, A

D – zewnętrzna średnica rurociągu, m

L – długość odcinka, m

- ▶ Rezystancja przejścia rurociągu względem ziemi zależy od powłoki rurociągu (rodzaju materiału i jego grubości), od rezystywności otaczającego rurociąg środowiska, ale przede wszystkim zależy od liczby i kształtu defektów (uszkodzeń powłoki) oraz ich rozmieszczenia.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Powłoka izolacyjna odcinka rurociągu wykonanego metodą przewiertu kierowanego powinna spełniać wymagania stawiane powłoce pozostałych odcinków rurociągu wykonanych metodą wykopową. Jeżeli tak jest, to wartości jednostkowej rezystancja przejścia wszystkich odcinków rurociągu są tego samego rzędu. Odcinek wykonany przewiertem może być wówczas chroniony katodowo razem z całym rurociągiem.
- ▶ Jeżeli powłoka izolacyjna rurociągu uległa uszkodzeniu podczas przeciągania, i jednostkowa rezystancja przejścia odcinka rurociągu wykonanego przewiertem jest o rząd lub kilka rzędów wielkości mniejsza od jednostkowej rezystancji przejścia pozostałego rurociągu, to odcinek w przewiercie powinien być odrębnie chroniony katodowo. Realizacja takiego rozwiązania wymaga wydzielenia złączami izolującymi odcinka rurociągu zawierającego przewiert. Dotyczy to szczególnie nowych rurociągów, których powłoki mają jednostkowe rezystancje przejścia rzędu $10^8 \Omega m^2$.
- ▶ Odcinek rurociągu wyodrębniony przy pomocy złączy izolujących może być indywidualnie chroniony katodowo przy użyciu anod galwanicznych lub może być objęty ochroną katodową realizowaną prądem z zewnętrznego źródła.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Rezystancję przejścia odcinka rurociągu wykonanego techniką przewiertu HDD można obliczyć korzystając z wyników pomiarów próbnej polaryzacji katodowej tego odcinka.
- ▶ Jeżeli obliczona wartość jednostkowej rezystancji przejścia nie spełnia postawionych wymagań, to określa się wymiary uszkodzenia drogą uproszczonych obliczeń przy pewnych koniecznych założeniach. Następnie sprawdza się, również drogą obliczeniową, czy powierzchnia uszkodzenia może być skutecznie chroniona katodowo.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

AUTONOMICZNA OCHRONA KATODOWA ODCINKA RUROCIĄGU WYKONANEGO PRZEWIERTEM

- ▶ Przykładowy przewiert znajduje się na trasie wybudowanego rurociągu DN800. Długość rurociągu w przewiercie wynosi 450 m. Powłoka izolacyjna jest typu 3LPE. Dodatkowe zabezpieczenie powłoki izolacyjnej stanowi laminat z tkaniny nasyconej epoksydem. Projektowa grubość laminatu wynosząca 4 mm, została zmniejszona w fazie wykonawstwa do 2 mm.
- ▶ Dla oceny stanu izolacji odcinka rurociągu przeprowadzono jego próbną polaryzację wykorzystując zasilacz prądu stałego, który pracował w cyklu przerywanym 12 s on/ 3 s off. Natężenie prądu polaryzacji wynosiło $I = 13,12 \text{ mA}$ przy średnim potencjale załączeniowym $E_{\text{on } \text{śr}} = -1,408 \text{ V}$ i średnim potencjale wyłączeniowym $E_{\text{off } \text{śr}} = -1,067 \text{ V}$ wzgl. CSE .
- ▶ Do określenia średnich wartości potencjałów, na odcinku długości 280 m wykonano pomiary potencjałów załączeniowych E_{on} i wyłączeniowych E_{off} rurociągu względem przenośnej elektrody odniesienia Cu/CuSO₄ (CSE) przemieszczanej nad rurociągiem w warunkach polaryzacji katodowej.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

nr pomiaru	lokalizacja	E_{on}	E_{off}	$ E_{on} - E_{off} $
		mV	mV	mV
1	50m od początku przewiertu	-1472	-1096	376
2	100m od początku przewiertu	-1455	-1105	350
3	150m od początku przewiertu	-1435	-1082	353
	epicentrum gradientu 1			
4	170m od początku przewiertu	-1342	-1014	328
5	190m od początku przewiertu	-1343	-1015	328
6	210m od początku przewiertu	-1291	-965	326
7	260m od początku przewiertu	-1345	-1016	329
	epicentrum gradientu 2			
8	310m od początku przewiertu	-1480	-1140	340
9	330m od początku przewiertu	-1512	-1171	341
	Średnia:	-1408	-1067	341

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Jednostkowa rezystancja powłoki r_{co} odcinka przewiertu HDD rurą DN800 o długości 450 m obliczona na podstawie przytoczonego wzoru wyniosła
$$r_{co} = 29\ 873 \approx 3 \cdot 10^4 \Omega m^2$$
- ▶ Powyższa wartość rezystancji świadczy o tym, że powłoka izolacyjna rurociągu i warstwa laminatu uległy uszkodzeniu. Najmniej ujemne potencjały rurociągu występują na odcinku pomiędzy zlokalizowanymi epicentrami gradientu napięcia. Rozkład potencjałów potwierdza, że mamy do czynienia z długim defektem w postaci rysy.
- ▶ Miejsca określone jako epicentra defektu zostały zlokalizowane metodą pomiaru wzdłużnego gradientu różnicowego napięcia nad rurociągiem (DCVG) w warunkach próbnej polaryzacji rurociągu prądem około 100 mA. Źródło prądu polaryzacji pracowało w cyklu przerywanym 0,3 s on /0,6 s off. Epicentra te nie są pojedynczymi defektami, lecz znajdują się na długości powstałej rysy, najpewniej na jej końcach.
- ▶ Zmierzone wartości potencjałów dowodzą, że prąd polaryzacji o natężeniu 13 mA zapewnia istotne przesunięcie potencjałów rurociągu w kierunku elektroujemnym.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Określenie wielkości defektów (długości i szerokości rysy) nie jest możliwe na podstawie pomiarów elektrycznych wykonywanych z powierzchni gruntu. Wymiary defektu można jedynie oszacować w następujący sposób:

- powierzchnia zewnętrzna odcinka rurociągu wykonanego przewierciem
 $S = 1149 \text{ m}^2$

- rezystancja powłoki odcinka wykonanego przewierciem

$$R_{co} = \frac{r_{co}}{S} = \frac{29873}{1149} = 26 \Omega$$

- ▶ Jeżeli w miejsce płuczki bentonitowej wpłynęła woda, na co wskazują wyniki pomiarów potencjałów rurociągu, to rezystywność gruntu przy defekcie może wynosić $20 \div 30 \Omega\text{m}$. Można przyjąć, że wymagana gęstość prądu ochrony katodowej na powierzchni defektu stykającego się ze środowiskiem o takiej rezystywności wynosi około $0,1 \text{ A/m}^2$. Obliczona powierzchnia defektu przy prądzie polaryzacji $I = 13 \text{ mA}$ wyniesie około $0,13 \text{ m}^2$.
- ▶ Zakładając, że mamy do czynienia z pojedynczym defektem w kształcie koła, to rezystancja powłoki odcinka rurociągu R_{co} będzie równa rezystancji przejścia defektu o średnicy $0,407 \text{ m}$.
- ▶ Rezystancję defektu o średnicy D można obliczyć ze wzoru:

$$R_D = \frac{\rho}{2D} + \frac{4\rho d}{\pi D^2} \quad [\Omega]$$

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Z przytoczonej zależności wyliczono rezystywność gruntu, z którym styka się rurociąg w przewiercie: $\rho = 20,4 \Omega\text{m}$. Wartość rezystywności gruntu stanowi potwierdzenie przypuszczenia, że do otworu napłynęła woda.
- ▶ Jeżeli defekt ma kształt rysy, to przy założeniu, że długość rysy wynosi około 140 m, szerokość rysy wyniesie:

$$a = \frac{0,13}{140} = 0,0009\text{m} = 0,9 \text{ mm}$$

- ▶ W jednorodnym niskoomowym środowisku przy powierzchni rurociągu, można przyjąć, że potencjał ochrony $E_p = E_{IRfree}$ jest równy potencjałowi wyłączeniowemu rurociągu E_{off} . Prąd polaryzacji o natężeniu 13 mA zapewni ochronę tej rysy przy potencjale załączeniowym:

$$E_{on} = -0,95 - 0,013 \cdot 26 = -1,29 \text{ V}, \text{ co wynika z zależności: } E_{on} = E_{off} - IR$$

- ▶ Przy określonym potencjale E_{on} stal polaryzuje się silniej w małych defektach izolacji niż w dużych, w gruntach niskooporowych silniej niż w gruntach o wyższej rezystywności, a w defektach w kształcie rysy silniej niż w kształcie koła.
- ▶ Z uwagi na niską wartość rezystancji przejścia odcinek rurociągu wykonany przewiertem HDD wydzielono za pomocą monobloków. Ochrona katodowa odcinka rurociągu pomiędzy monoblokami została zaprojektowana z wykorzystaniem 5 anod galwanicznych magnezowych.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

ODCINEK WYKONANY PRZEWIERTEM HDD WŁĄCZONY DO OCHRONY KATODOWEJ RUROCIĄGU

- ▶ Metodą przewiertu kierowanego wykonano przejście pod kanałem dwoma równoległymi rurociągami DN500 i DN200 długości 670 m. Głębokość przewiertów sięgała 19 m. Rurociągi posiadają powłoki izolacyjne typu 3LPE, przy czym na odcinkach w przewiercie są to powłoki tzw. wzmocnione o zwiększonej grubości. Na powłoki izolacyjne został nałożony laminat o średniej grubości 2,5 mm.
- ▶ Dla oceny powłoki izolacyjnej odcinków rurociągów wykonano pomiary potencjałów załączeniowych E_{on} i wyłączeniowych E_{off} w warunkach polaryzacji katodowej prądem I dostarczanym z akumulatora za pośrednictwem prowizorycznego uziomu o rezystancji 160 Ω .
- ▶ Prąd polaryzacji, który wynosił 72 mA, przerywano w cyklu 12 s on / 3 s off. Pomiary wykonano w 34 miejscach w odstępach co 20 m wzdłuż trasy rurociągu, względem przenośnej elektrody odniesienia CSE, którą ustawiano na powierzchni gruntu w osi rurociągu.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Ocena powłoki rurociągu D500

- ▶ Średnie arytmetyczne potencjały rurociągu wykonane w 34 miejscach pomiarowych:

$$E_{on \text{ } \acute{s}r} = -1550 \text{ mV (od -1550 do -1570 mV)}$$

$$E_{off \text{ } \acute{s}r} = -1244 \text{ mV (od -1221 do -1279 mV)}$$

$$\text{składowa IR potencjału } IR_{\acute{s}r} = 306 \text{ mV (od 288 do 325 mV)}$$

- ▶ Jednostkowa rezystancja powłoki odcinka rurociągu DN500 o długości $L = 670\text{m}$ wyniosła

$$r_{co} = 4544 \approx 4,5 \cdot 10^3 \Omega\text{m}^2$$

- ▶ Rezystancja przejścia powłoki rurociągu:

$$R_{co} = \frac{4544}{\pi \cdot 0,508 \cdot 670} = 4,25 \Omega$$

- ▶ Prąd 72 mA polaryzuje katodowo odcinek rurociągu DN500 do nadmiernie elektroujemnych potencjałów. Jak wynika z zależności $E_{on} = E_{off} - IR$, dla najbardziej wymagającego kryterium ochrony katodowej $-0,95 \text{ V}$ według PN-EN 12954, przy ekstrapolowanym prądzie polaryzacji katodowej $I = 55 \text{ mA}$, potencjał załączeniowy osiągnie wartość:

$$E_{on} = -0,95 - 0,055 \cdot 4,25 = -1,18 \text{ V}$$

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Z dużym prawdopodobieństwem można założyć, że uszkodzenie powłoki rurociągu, mające zapewne postać rysy, nastąpiło w konsekwencji ucieczki płuczki w warstwy chłonne wokół przewiertu. Doszło przez to do zapadnięcia się przewiertu i nacisku na rurociąg ostrych pokruszonych otoczków.
- ▶ Zakładając gęstość prądu na powierzchni defektu $0,1 \text{ A/m}^2$ prądowi polaryzacji 55 mA odpowiada powierzchnia $0,55 \text{ m}^2$. Gdyby była to powierzchnia hipotetycznego kołowego defektu, to jego średnica wynosiłaby $0,837 \text{ m}$, a rezystywność gruntu, nie przekraczałaby $7 \text{ }\Omega\text{m}$.
- ▶ Przewiert rurą DN500 został włączony do rurociągu posiadającego ochronę katodową pracującą przy prądach rzędu amperów. Zapotrzebowanie prądu na poziomie 55 mA mogło być zrealizowane z istniejących źródeł polaryzacji katodowej. Nie było zatem potrzeby wydzielenia tego odcinka od części liniowej za pomocą złączy izolujących.
- ▶ Ochrona katodowa rurociągu DN500 jest monitorowana w punktach pomiarowych zainstalowanych na początku i na końcu odcinka wykonanego przewiertem. Monitoring obejmuje potencjały załączeniowe i wyłączeniowe rurociągu mierzone podczas synchronicznej pracy przerywanej sąsiednich stacji ochrony katodowej, a także prąd pobierany przez ten odcinek.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Ocena powłoki rurociągu DN200

- ▶ Analogicznie do próbnej polaryzacji odcinka rurociągu DN500, przeprowadzono próbną polaryzację równoległego odcinka rurociągu DN200.
- ▶ Wyniki pomiarów przy polaryzacji prądem z akumulatora o wartości $I = 1,5 \mu\text{A}$
 - napięcie rurociąg - elektroda odniesienia CSE umieszczona na powierzchni ziemi w punkcie wyjścia; pomiar przy włączonej ochronie katodowej $U_{\text{on}} = -12,67 \text{ V}$;
 - napięcie rurociąg - elektroda odniesienia CSE umieszczona na powierzchni ziemi w punkcie wyjścia; pomiar po 0,5 s od wyłączenia ochrony katodowej $U_{\text{off}} = -12,24 \text{ V}$;
- ▶ Po wyłączeniu prądu, napięcie rurociąg - ziemia szybko zmniejszało się: po 5 minutach osiągnęło wartość -34 mV .
- ▶ Zmierzone wartości potencjałów rurociągu względem ziemi około 12 V przy włączonej prowizorycznej ochronie katodowej, są praktycznie równe napięciu istniejącemu pomiędzy rurociągiem a uziomem anodowym. Stalowa powierzchnia rurociągu nie ma w zasadzie kontaktu ze środowiskiem elektrolitycznym, czego dowodem jest wartość napięcia -34 mV zmierzona 5 minut po wyłączeniu ochrony katodowej, nie będąca żadną miarą potencjału elektrochemicznego rurociągu.
- ▶ Wyniki pomiarów wskazują, że powłoka ochronna rurociągu DN 200 praktycznie pozostała nieuszkodzona i odcinek może być włączony bezpośrednio do części liniowej.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ WARUNKI POMIARÓW REZYSTANCJI PRZEJŚCIA ODCINKÓW PRZEWIERTOWYCH O POWŁOKACH IZOLACYJNYCH BLISKICH BEZDEFEKTOWYCH
- ▶ Pomiary odbiorowe jednostkowej rezystancji przejścia w przypadku bardzo dobrze izolowanych rurociągów, o wysokim poziomie szczelności, wymagają trochę innego podejścia niż pomiary w przypadku rurociągów o gorzej izolowanych.
- ▶ Podczas polaryzacji takiego odcinka rurociągu do potencjału $E_{on} = -1,3 \text{ V}$ wzgl. CSE odczyty natężenia prądu polaryzacji mogą być błędne z uwagi na pomiar bardzo małych wartości. W takim przypadku polaryzację przeprowadza się przy podwyższonych parametrach uzyskując na rurociągu napięcie gazociąg – elektroda odniesienia przy włączonym prądzie polaryzacji na poziomie $-10 \text{ V} \div -20 \text{ V}$.
- ▶ Podczas polaryzacji katodowej odcinka rurociągu w bardzo dobrej izolacji polietylenowej lub polipropylenowej występują zjawiska związane z efektem pojemnościowym. Odcinek rurociągu zachowuje się jak kondensator w kształcie walca, który ładuje się i rozładowuje w miarę przerywania prądu polaryzacji. W tym układzie okładkami kondensatora są stalowa rura oraz otaczający ją grunt, a izolacja rurociągu jest dielektrykiem wypełniającym przestrzeń kondensatora. Im grubsza izolacja (im większa pojemność elektryczna kondensatora) tym wolniej rośnie i maleje napięcie. Odczytanie wartości potencjału wyłączeniowego rurociągu może nastąpić dopiero po rozładowaniu kondensatora, tj. po wyeliminowaniu stanu nieustalonego.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Czas t potrzebny do rozładowania kondensatora po wyłączeniu prądu polaryzacji można obliczyć ze wzoru:

$$t = k \cdot T \quad [s]$$

gdzie

T – stała czasowa układu RC podczas rozładowania kondensatora,

k – współczynnik będący krotnością stałej czasowej pełnego rozładowania kondensatora, przyjmuje się z doświadczenia $k = 4,5 \div 5$

$$T = R_{co} \cdot C \quad [s]$$

gdzie:

R_{co} – rezystancja przejścia izolacji odcinka gazociągu, Ω

C – pojemność kondensatora, F

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [F]$$

gdzie:

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m]

ε_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka (izolatora), $\varepsilon_r = 2,25$

L – długość odcinka, m

r_1 – promień wewnętrznej okładki kondensatora, m

r_2 – promień zewnętrznej okładki kondensatora, m

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Do obliczenia stałej czasowej rozładowania kondensatora potrzebna jest znajomość rezystancji przejścia izolacji odcinka gazociągu R_{co} . Taki pomiar można zrealizować posługując się miernikiem rezystancji np. MPI525. Krótkotrwały pomiar rezystancji przejścia izolacji wykonuje się na najniższym zakresie pomiarowym 50V.
- ▶ Po obliczeniu czasu trwania stanu nieustalonego t można z zarejestrowanego wykresu potencjału odczytać potencjał E_{off} rurociągu.
- ▶ Pomiar rezystancji izolacji za pomocą miernika rezystancji jest pomiarem zgrubnym i nie zawsze udaje się go wykonać. W takim przypadku czas zaniku składowej pojemnościowej potencjału należy przyjąć doświadczalnie.
- ▶ Dla odczytu potencjału E_{off} należy przerywać prąd polaryzacji w określonym cyklu. W przypadku polaryzacji prądem pozwalającym uzyskać potencjał rurociągu na poziomie $-10\text{ V} \div -20\text{ V}$ stosuje się cykl dopasowany do obliczonego czasu rozładowania kondensatora. Im izolacja odcinka rurociągu ma wyższą rezystancję przejścia w stosunku do otaczającego środowiska, tym czas wyłączenia prądu polaryzacji powinien być dłuższy.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Przypadek 1.

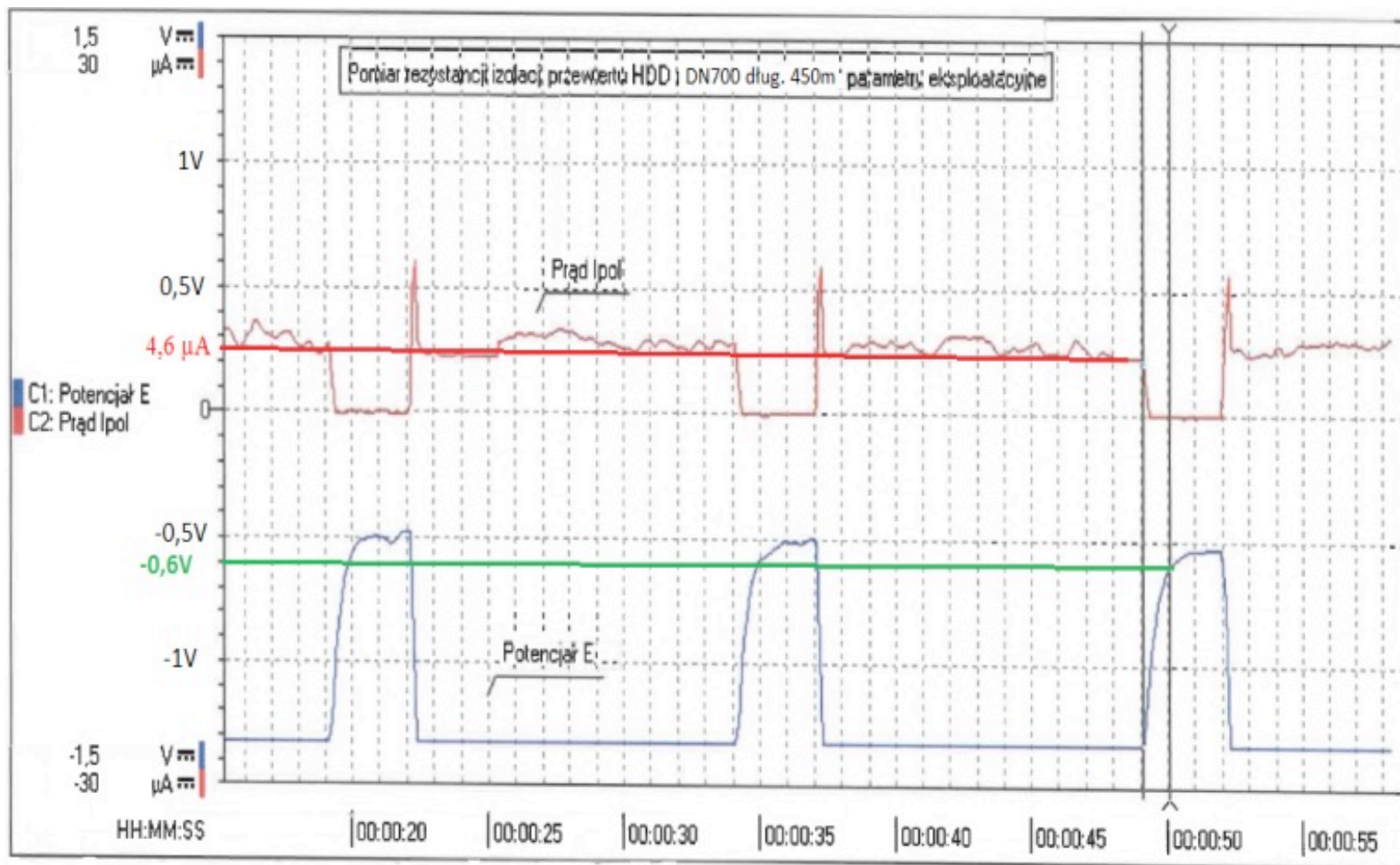
- ▶ Pomiar wykonano na przekroczeniu ciekłego wodnego gazociągiem w/c DN700, na odcinku długości $L = 450$ m. Pomiar odbiorowy rezystancji przejścia izolacji gazociągi wykonano przy parametrach eksploatacyjnych oraz z uwagi na bardzo mały pobór prądu polaryzacji, przy parametrach podwyższonych.
- ▶ Gazociąg polaryzowano z próbnej stacji ochrony katodowej. Potencjał mierzono względem elektrody odniesienia Cu/nas.CuSO₄ umiejscowionej w ziemi dalekiej.

Pomiar przy parametrach eksploatacyjnych

- ▶ Gazociąg polaryzowano do potencjału $E_{on} = -1,3$ V prądem o wartości $I = 4,6$ μ A. Polaryzację prowadzono w trybie galwanostatycznym, przerywając prąd polaryzacji w cyklu 12s on/ 3 s off.
- ▶ Wartości potencjału i prądu pokazano na wykresie. Odczytana z wykresu wartość potencjału $E_{off} = -0,6$ V wzgl. CSE.
- ▶ Obliczona jednostkowa rezystancja przejścia odcinka gazociągi DN700 długości $L = 450$ m wyniosła

$$r_{co} = 1,59 \cdot 10^8 \text{ } [\Omega\text{m}^2]$$

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 2. Polaryzacja odcinka gazociągu DN700 HDD przy parametrach eksploatacyjnych

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Pomiar przy parametrach podwyższonych

- ▶ Gazociąg polaryzowano do potencjału $E_{on} = -20,67$ V prądem o wartości $147,8$ μ A. Polaryzację prowadzono w trybie galwanostatycznym, przerywając prąd polaryzacji w cyklu 3s on/ 27 s off.
- ▶ Pomiar rezystancji izolacji R_{co} wykonano miernikiem MPI 525 przy napięciu 50V. Otrzymano wartość $R_{co} = 165$ k Ω .

Jednostkowa rezystancja przejścia odcinka gazociągu DN700 długości $L = 450$ m i powierzchni bocznej $S = 1004,6$ m² obliczona na podstawie pomiaru miernikiem rezystancji

$$r_{co} = R_{co} \cdot S = 1,66 \cdot 10^8 \Omega m^2$$

- ▶ Korzystając z wcześniej przytoczonych wzorów obliczono parametry potrzebne do odczytania z zarejestrowanego wykresu potencjału, wartości E_{off} po wyłączeniu polaryzacji i rozładowania składowej pojemnościowej.

C – pojemność kondensatora, $C = 5,03 \cdot 10^{-6}$ F

T – stała czasowa układu RC, $T = 0,83$ s

t – czas potrzebny do odczytu E_{off} $t = 4,6 \cdot 0,83 = 3,82$ s

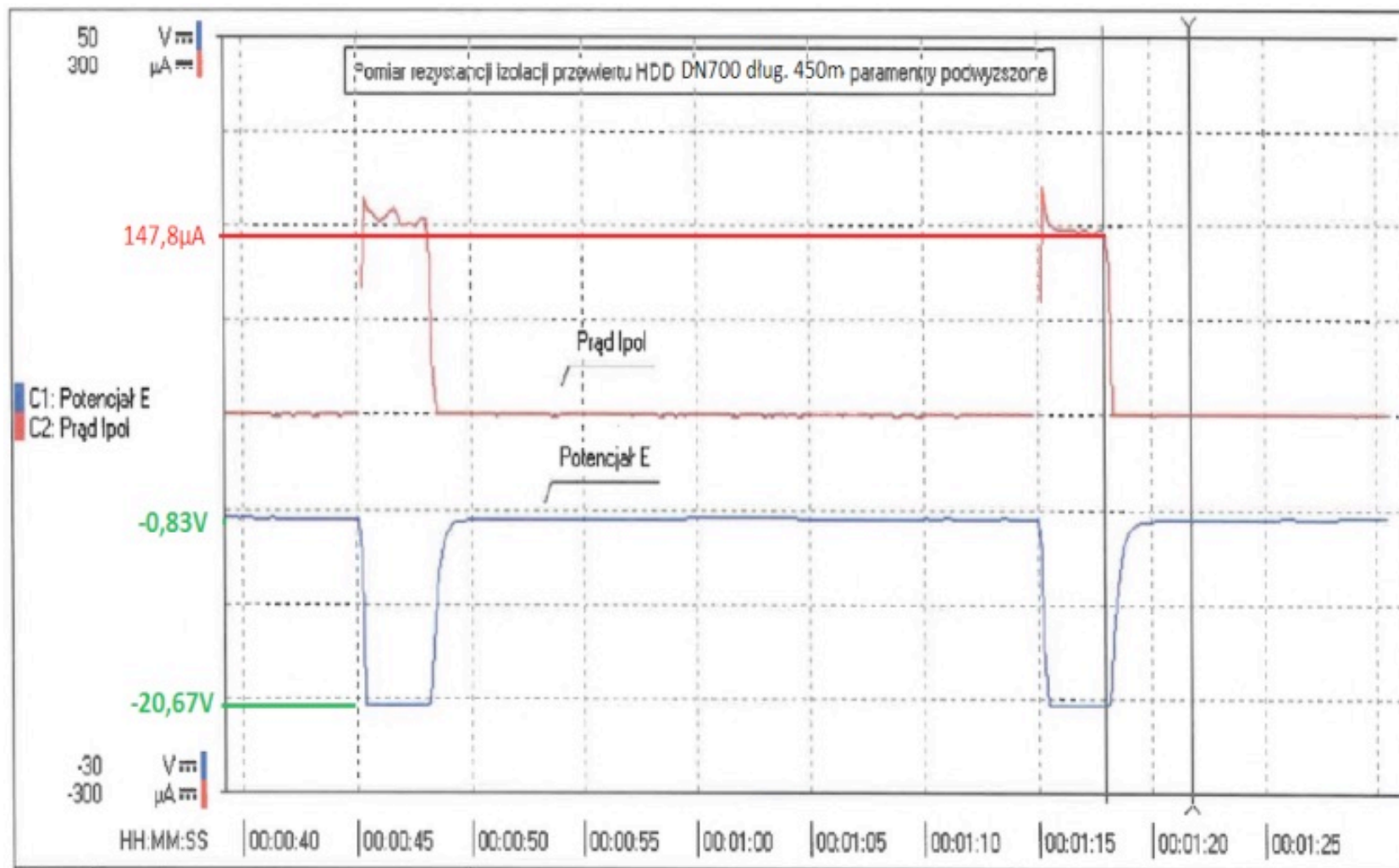
OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Odczytana z wykresu wartość potencjału gazociągu po czasie 3,82s od wyłączenia polaryzacji wyniosła $E_{\text{off}} = -0,83 \text{ V}$ wzgl. CSE. Na tej podstawie obliczono jednostkową rezystancję przejścia odcinka r_{co} :

$$r_{\text{co}} = 1,35 \cdot 10^8 \text{ } [\Omega\text{m}^2]$$

- ▶ Wartości jednostkowej rezystancji przejścia r_{co} uzyskane trzema metodami mają zbliżone wartości. Wyniki świadczą o wysokiej jakości powłoki, ale nie pozbawionej defektów.
- ▶ Izolacja odcinka wykonanego przewiertem spełnia kryterium odbiorowe natężenia prądu polaryzacji tj. $I < 0,5 \text{ mA}$ przy potencjale $-1,3\text{V}$ wzgl. CSE.
- ▶ Izolacji nie można zakwalifikować jako bezdefektowej z uwagi na zbyt małą wartość jednostkowej rezystancji przejścia.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 3. Polaryzacja odcinka gazociągu DN700 HDD przy parametrach podwyższonych

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Przypadek 2.

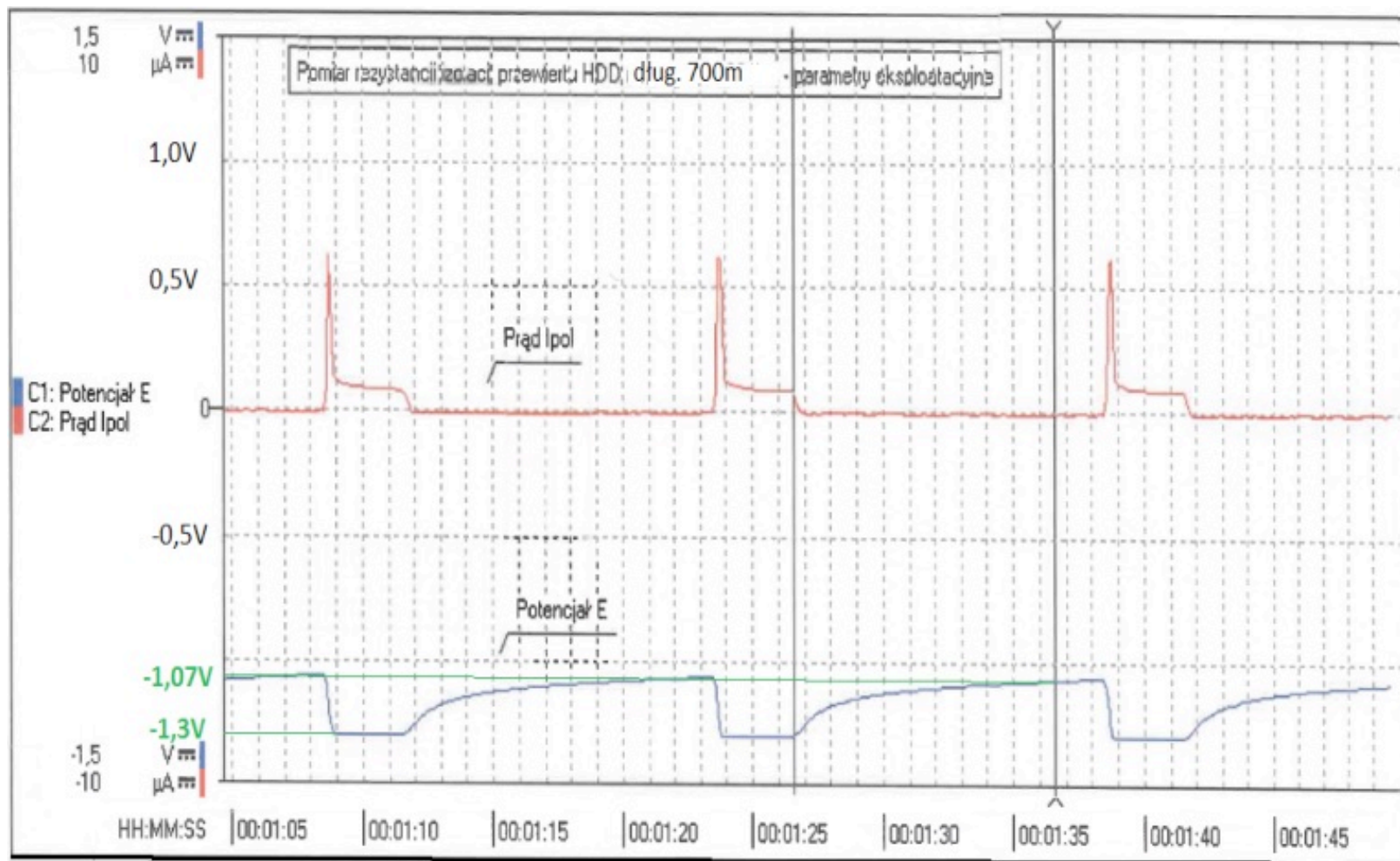
- ▶ Pomiar wykonano na przekroczeniu rzeki gazociągiem w/c DN700 o długości $L = 700$ m. Gazociąg polaryzowano z próbnej stacji ochrony katodowej. Potencjał gazociągu mierzono względem elektrody odniesienia umiejscowionej w ziemi dalekiej.

Pomiar przy parametrach eksploatacyjnych

- ▶ Gazociąg polaryzowano do potencjału $E_{on} = -1,3V$ prądem o wartości $0,56 \mu A$. Polaryzację prowadzono w trybie galwanostatycznym, przerywając prąd polaryzacji w cyklu 3s on/ 12 s off. Z wykresu odczytano potencjał wyłączeniowy $E_{off} = -1,07 V$. Korzystając ze wzoru obliczono jednostkową rezystancję przejścia odcinka gazociągu r_{co}

$$r_{co} = 6,42 \cdot 10^8 \text{ } [\Omega m^2]$$

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 4. Polaryzacja odcinka gazociągu DN700 HDD przy parametrach eksploatacyjnych

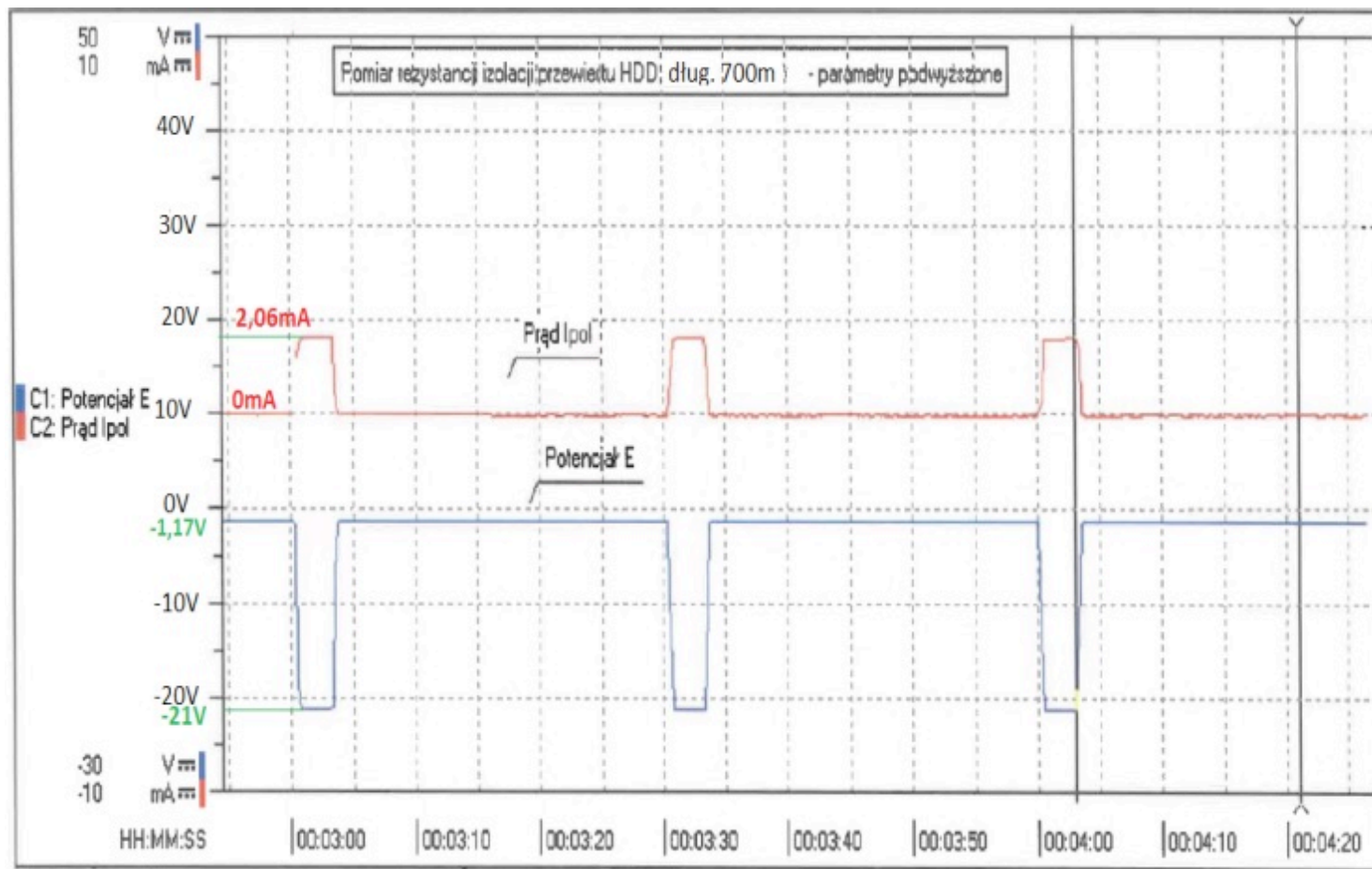
OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Pomiary przy parametrach podwyższonych.

- ▶ Gazociąg polaryzowano do potencjału $E_{on} = -21V$ prądem o wartości 2,06 mA. Polaryzację prowadzono w trybie galwanostatycznym, przerywając prąd polaryzacji w cyklu 3s on/ 27 s off.
- ▶ W tym przypadku nie udało się wykonać badania przy pomocy miernika rezystancji izolacji, gdyż odczyty nie dawały jednoznacznej wartości - wahały się od 75k Ω do 50 M Ω .
- ▶ Z uwagi na nieliniowe zachowanie prądu polaryzacji nie można było obliczyć parametrów stałej czasowej T, pojemności C oraz czasu rozładowania składowej pojemnościowej napięcia. Wartość potencjału $E_{off} = -1,17V$ wzgl. CSE odczytano z zarejestrowanego wykresu po czasie 21s od wyłączenia polaryzacji. Czas przyjęto doświadczalnie.
- ▶ Korzystając ze wzoru obliczono jednostkową rezystancję przejścia odcinka gazociągu r_{co}

$$r_{co} = 1,51 \cdot 10^7 \text{ } [\Omega m^2]$$

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 5. Polaryzacja odcinka gazociągu DN700 HDD przy parametrach podwyższonych

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Wartość rezystancji przejścia obliczona przy parametrach podwyższonych jest o rząd wielkości mniejsza od wartości obliczonej przy parametrach eksploatacyjnych. Otrzymany wynik świadczy o braku szczelności izolacji odcinka gazociągu. Ponieważ gazociąg jest zagrożony oddziaływaniem prądów przemiennych i wymagana jest izolacja bezdefektowa, wykonano lokalizację defektów metodą DCVG przy podwyższonych parametrach.
- ▶ Defekt zlokalizowano w odległości około 90 m od końca odcinka wykonanego przewiertem HDD. Defekt znajdował się na głębokości 12,5 m od powierzchni gruntu. Przyczyną defektu było obwodowe uszkodzenie izolacji 3LPP. Defekt został odsłonięty i naprawiony.
- ▶ Przy parametrach eksploatacyjnych tj. przy małym prądzie polaryzacji defekt, który znajdował się na odcinku HDD, nie ujawnił się. Prawdopodobnie miał słaby kontakt z gruntem. Dopiero przy zwiększaniu prądu polaryzacji prąd mógł wpłynąć do defektu co skutkowało dużą zmianą potencjału E_{on} .

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 6. Widok defektu izolacji po odkryciu gazociągu DN700

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Przypadek 3.

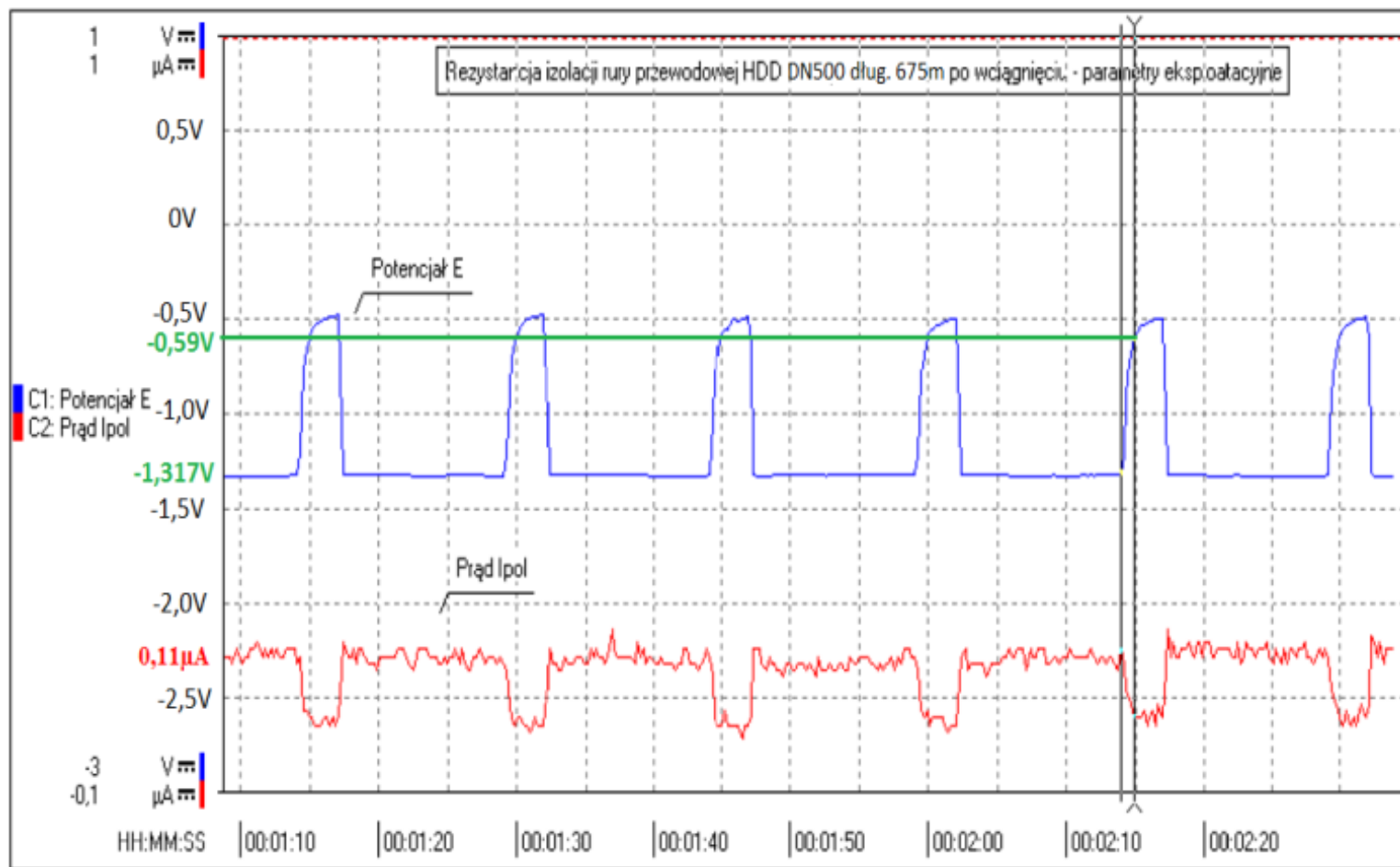
- ▶ Pomiar wykonano na przekroczeniu rzeki gazociągiem w/c DN500 na odcinku gazociągu o długości $L = 675$ m. Pomiar odbiorowy rezystancji przejścia izolacji gazociągu wykonano przy parametrach eksploatacyjnych oraz przy parametrach podwyższonych.
- ▶ Gazociąg polaryzowano z próbnej stacji ochrony katodowej. Potencjał mierzono względem elektrody odniesienia $\text{Cu}/\text{nas.CuSO}_4$ umiejscowionej w ziemi dalekiej.

Pomiar przy parametrach eksploatacyjnych

- ▶ Gazociąg polaryzowano do potencjału $E_{\text{on}} = -1,3\text{V}$ prądem o wartości $I = 0,11 \mu\text{A}$. Polaryzację prowadzono w trybie galwanostatycznym, przerywając prąd polaryzacji w cyklu 12s on/ 3 s off. Do obliczeń przyjęto odcinek o długości $L = 650$ m.
- ▶ Zarejestrowane wartości potencjału i prądu pokazano na wykresie. Odczytana z wykresu wartość potencjału $E_{\text{off}} = -0,59 \text{ V}$ wzgl. CSE.
- ▶ Korzystając ze wzoru obliczono jednostkową rezystancję przejścia odcinka gazociągu r_{co}

$$r_{\text{co}} = 6,86 \cdot 10^9 \text{ } [\Omega\text{m}^2]$$

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 7. Polaryzacja odcinka gazociągu DN500 HDD przy parametrach eksploatacyjnych

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Pomiar przy parametrach podwyższonych

- ▶ Gazociąg polaryzowano do potencjału $E_{on} = -11,24V$ prądem o wartości $5,5 \mu A$. Polaryzację prowadzono w trybie galwanostatycznym, przerywając prąd polaryzacji w cyklu 3s on/ 120 s off.
- ▶ Pomiar rezystancji izolacji wykonano miernikiem MPI 525 przy napięciu 50V. Uzyskano wynik $R_{co} = 1,96 M\Omega$. Jednostkowa rezystancja przejścia odcinka gazociągu DN500 długości $L = 675$ m i powierzchni bocznej $S = 1077,3m^2$ obliczona na podstawie pomiaru miernikiem rezystancji

$$r_{co} = R_{co} \cdot S = 2,1 \cdot 10^9 \Omega m^2$$

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Pomiar przy parametrach podwyższonych

- ▶ Korzystając z wcześniej przytoczonych wzorów obliczono parametry potrzebne do odczytania z zarejestrowanego wykresu potencjału, wartości E_{off} po wyłączeniu polaryzacji i zaniku składowej pojemnościowej.

C – pojemność kondensatora, $C = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

T – stała czasowa układu RC, $T = 2,53 \text{ s}$

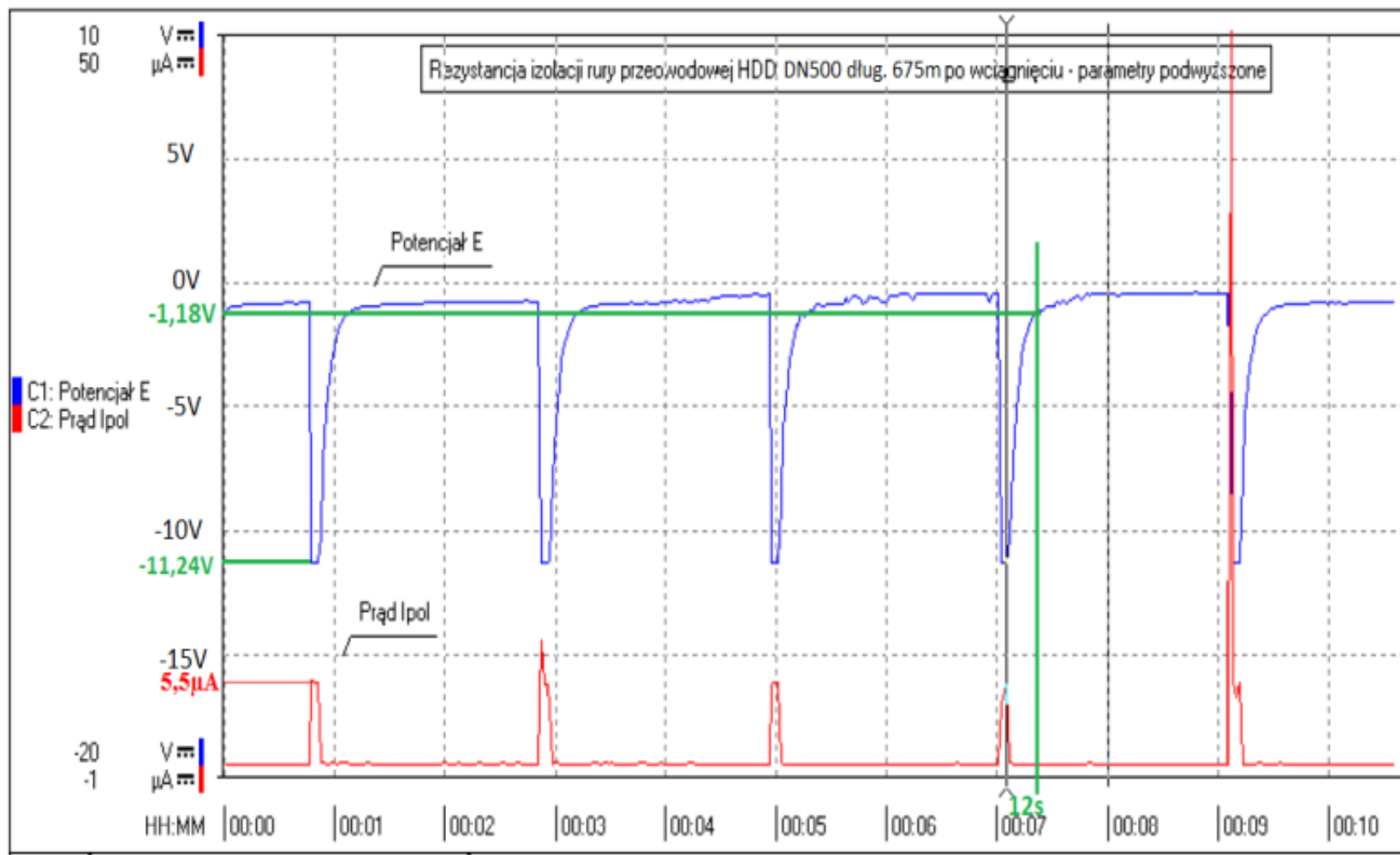
t – czas potrzebny do odczytu E_{off} , $t = 4,6 \cdot 2,53 = 11,64 \text{ s}$

- ▶ Odczytana z wykresu wartość potencjału gazociągu po czasie 12s od wyłączenia polaryzacji wyniosła $E_{\text{off}} = -1,18\text{V}$ wzgl. CSE. Korzystając ze wzoru obliczono jednostkową rezystancję przejścia odcinka gazociągu r_{co}

$$r_{\text{co}} = 1,9 \cdot 10^9 \text{ } [\Omega\text{m}^2]$$

- ▶ Wartości jednostkowej rezystancji przejścia r_{co} uzyskane przy podwyższonych parametrach oraz za pomocą miernika rezystancji MPI525 mają zbliżone wartości. Wyniki świadczą o wysokiej jakości powłoki, bliskiej powłoce bezdefektowej.
- ▶ Wartość jednostkowej rezystancji przejścia uzyskanej przy parametrach eksploatacyjnych jest ponad trzykrotnie wyższa niż dwie pozostałe wartości.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 8. Polaryzacja odcinka gazociągu DN500 HDD przy parametrach podwyższonych

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Przypadek 4.

- ▶ Pomiar wykonano na przekroczeniu cieku wodnego gazociągiem w/c DN500 na odcinku długości $L = 813$ m. Pomiar odbiorowy rezystancji przejścia izolacji gazociągu wykonano tylko przy parametrach podwyższonych, z uwagi na bardzo mały pobór prądu polaryzacji przy parametrach eksploatacyjnych ($I = 0,01\mu\text{A}$). Pobór prądu o wartości bliskiej zera świadczy o braku defektów izolacji.

Pomiar przy parametrach podwyższonych

- ▶ Dla potwierdzenia bezdefektowości izolacji polaryzowano gazociąg do potencjału $E_{\text{on}} = -10,11\text{V}$ prądem o wartości $0,59\mu\text{A}$. Polaryzację prowadzono w trybie galwanostatycznym, przerywając prąd polaryzacji w cyklu 3s on/ 240 s off.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Pomiar rezystancji izolacji wykonano miernikiem MPI 525 przy napięciu 50V. Uzyskano wartość 15,7 MΩ, co po pomnożeniu przez powierzchnię boczną odcinka gazociągu daje wynik

$$r_{co} = 2,0 \cdot 10^{10} \Omega m^2$$

- ▶ Obliczono parametry potrzebne do odczytania z wykresu wartości potencjału po wyłączeniu polaryzacji i zaniku składowej pojemnościowej.

$$C = 1,59 \cdot 10^{-6} \text{ F,}$$

$$T = 25 \text{ s,}$$

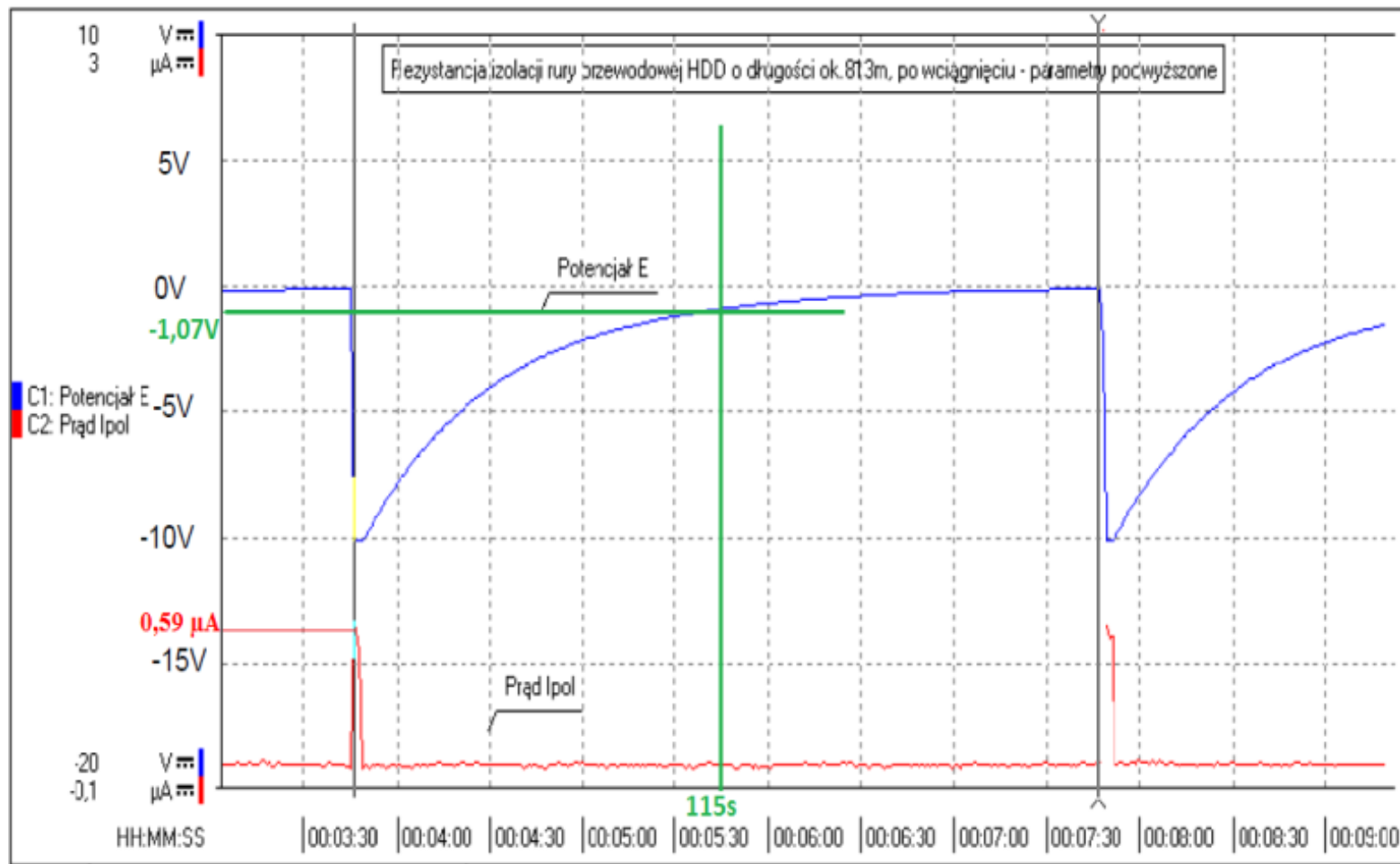
$$t = 4,6 \cdot 25 = 115 \text{ s}$$

- ▶ Odczytana z wykresu wartość potencjału gazociągu po czasie 115s od wyłączenia polaryzacji wyniosła $E_{off} = -1,07V$ wzgl. CSE. Jednostkowa rezystancja przejścia odcinka gazociągu r_{co} obliczona ze wzoru

$$r_{co} = 1,93 \cdot 10^{10} [\Omega m^2]$$

- ▶ Wartości jednostkowej rezystancji przejścia r_{co} uzyskane przy podwyższonych parametrach oraz za pomocą miernika rezystancji MPI525 mają zbliżone wartości. Wyniki świadczą o wysokiej jakości powłoki bezdefektowej.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM



Rys. 9. Polaryzacja odcinka gazociągu DN500 HDD przy parametrach podwyższonych

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Podsumowanie.

- ▶ Uszkodzenia powłok izolacyjnych odcinków przewiertowych rurociągów są zwykle spowodowane ostrymi krawędziami pokruszonych otoczków i mają najprawdopodobniej postać długich rys o szerokości do kilku milimetrów. Kontakt otoczków z rurociągiem następuje wskutek ucieczki płuczki w warstwy chłonne i w konsekwencji zawałania się otworu. Powierzchnia długiej rysy może wynosić 1 – 2 m², co prowadzi do obniżenia jednostkowej rezystancji przejścia odcinka rurociągu o kilka rzędów wielkości. Powierzchnię uszkodzenia można oszacować na podstawie wyników pomiarów próbnej polaryzacji katodowej oraz obliczeń.
- ▶ Wykonawca przewiertu, na którym kryterium wartości rezystancji przejścia nie zostało spełnione musi wykazać inwestorowi, że powierzchnia odsłoniętej ścianki rurociągu będzie skutecznie chroniona katodowo. Należy w tym celu wykorzystać wyniki pomiarów próbnej polaryzacji i wykonać obliczenia parametrów ochrony katodowej.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Ochronę katodową przewiertu można zapewnić w dwojaki sposób. Jeżeli rurociąg ma bardzo dobrą powłokę izolacyjną, dzięki czemu jest chroniony małym prądem rzędu najwyżej mA, a dla ochrony katodowej przewiertu potrzeba kilkudziesięciu mA, to ochrona katodowa przewiertu musi być odrębna, autonomiczna. Wymaga to złączy izolujących na końcach odcinka wykonanego przewiertem. Ochronę katodową odcinka realizuje się zwykle za pomocą anod galwanicznych. Jeżeli przewiert został wykonany w ciągu istniejącego rurociągu, który jest chroniony prądem rzędu 0,1 lub 1 A, to przewiert może być włączony do wspólnej ochrony z całym rurociągiem.
- ▶ Badanie jednostkowej rezystancji przejścia odcinka gazociągu w bardzo dobrej izolacji należy wykonywać przy podwyższonych parametrach polaryzacji katodowej. Pomiar jednostkowej rezystancji izolacji w warunkach eksploatacyjnych może być obarczony błędem pomiaru małej wartości prądu, dlatego nie powinien być podstawą do oceny jakości izolacji.
- ▶ Pomiar rezystancji przejścia izolacji odcinka gazociągu za pomocą miernika rezystancji jest pomiarem pomocniczym i nie zawsze można się nim posłużyć przy ocenie jakości izolacji.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

- ▶ Wykonując pomiary dla oceny jednostkowej rezystancji przejścia należy stosować cykle przerywania prądu polaryzacji katodowej adekwatne do jakości izolacji odcinka rurociągu. Im izolacja odcinka w przewiercie ma wyższą rezystancję przejścia w stosunku do otaczającego środowiska, tym czas wyłączenia prądu polaryzacji powinien być dłuższy. Pomiary potencjałów wyłączeniowych wykonywane w standardowym cyklu on / off stają się niemiernodajne i powinny być wykonywane po kilkudziesięciu lub nawet kilkuset sekundach od wyłączenia prądu polaryzacji

OCHRONA PRZED KOROZJĄ RUROCIĄGU W PRZEWIERCIE KIEROWANYM

Dziękuję za uwagę
Hanna Matus