

Wykorzystanie parametru jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) w diagnostyce stanu technicznego izolacji rurociągów o wysokiej szczelności dielektrycznej

Using the unit coating resistance (r_{co}) for evaluating the technical condition of high-integrity pipeline insulation

Krzysztof Wzorek^{1*} , Krzysztof Żakowski² , Aneta Korda-Burza³ 

¹ Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A., Oddział w Tarnowie, Szkoła Doktorska Wdrożeniowa, Politechnika Gdańska

² Wydział Chemiczny, Politechnika Gdańska

³ Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A, Pion Badawczy i Laboratoriów

*Kontakt / Correspondence: krzysztof.wzorek@gaz-system.pl

Streszczenie:

Artykuł prezentuje diagnostykę powłok izolacyjnych rurociągów przesyłowych o wysokiej szczelności. Celem badań była ocena integralności izolacji 28-kilometrowego odcinka gazociągu poprzez wyznaczenie jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}). Na podstawie modelu linii długiej o parametrach rozłożonych zebrano dane metodą Current Span w 12 punktach kontrolnych przy obniżonym potencjale ochrony. Wyniki pozwoliły zidentyfikować sekcje o różnej szczelności, wykryć lokalne anomalie oraz ocenić wpływ środowiska. Metodologia ta stanowi bezodkrywkowe narzędzie do obiektywnej oceny starzenia się powłok i wczesnego wykrywania uszkodzeń.

Słowa kluczowe: ochrona katodowa, jednostkowa rezystancja przejścia (r_{co}), rurociągi przesyłowe, powłoki izolacyjne, model linii długiej, metoda Current Span, diagnostyka bezodkrywkowa, korozja

Abstract:

This article presents the diagnostics of insulating coatings on high-integrity transmission pipelines. The study aimed to evaluate the insulation integrity of a 28-kilometer gas pipeline section by determining the unit coating resistance (r_{co}). Based on a distributed-parameter transmission line model, data was collected using the Current Span method at 12 test stations under a reduced protection potential. The results enabled the identification of sections with varying tightness, the detection of local anomalies, and the assessment of environmental impacts. This methodology serves as a non-invasive tool for the objective evaluation of coating aging and early defect detection.

Keywords: cathodic protection, unit coating resistance (r_{co}), transmission pipelines, insulation coatings, long line model, current span method, non-destructive testing, corrosion

1. Wprowadzenie

1.1. Reaktywność żelaza

Żelazo jest aktywnym chemicznie metalem o stosunkowo niskim potencjale standardowym (w odniesieniu do elektrody wodorowej (SHE) to $-0,44$ V [1]), co sprawia, że w środowisku naturalnym niezwykle łatwo wchodzi w reakcje z utleniaczami, dążąc do osiągnięcia trwałego energetycznie stanu utlenienia Fe^{2+} lub Fe^{3+} [1]. Kluczowym aspektem jego destrukcji jest fakt,

że w obecności wody i tlenu proces ten przybiera charakter elektrochemiczny, tworząc na powierzchni metalu mikroogniwa [2], w których żelazo pełni rolę anody i ulega nieustannemu roztwarzaniu. W przeciwieństwie do metali takich jak aluminium czy chrom, produkty utleniania żelaza, czyli uwodnione tlenki żelaza (III), nie wykazują właściwości pasywujących – ich struktura jest luźna, nietrwała i higroskopijna, co zamiast hamować korozję, wręcz ją stymuluje poprzez ułatwianie transportu reagentów w głąb struktury krystalicznej metalu. Ta chemiczna bezbronność produktów korozji powoduje, że raz zainicjowany

proces utleniania postępuje w sposób ciągły i destrukcyjny, aż do całkowitego naruszenia integralności mechanicznej elementu. To właśnie ta cecha czyni aktywność chemiczną żelaza głównym wyzwaniem dla trwałości współczesnej infrastruktury technicznej.

1.2. Przeciwdziałanie korozji

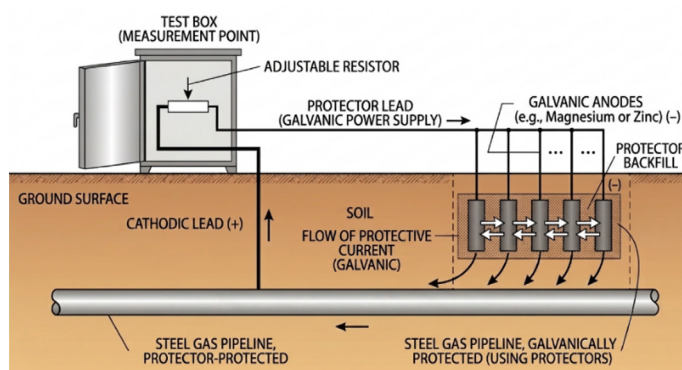
Ta wysoka reaktywność żelaza i nieszczelność jego warstwy tlenkowej generują ogromne wyzwania gospodarcze oraz techniczne, wymuszając na inżynierach prowadzenie nieustannych, kosztownych działań prewencyjnych. Zalicza się do nich systematyczną konserwację powłok malarskich, stosowanie zaawansowanych metod ochrony katodowej czy nakładanie warstw galwanicznych [3], gdyż bez ciągłego monitoringu i aktywnego przeciwdziałania naturalna dążność żelaza do powrotu do formy tlenkowej doprowadziłaby do degradacji kluczowej infrastruktury, od mostów i rurociągów po maszyny przemysłowe i konstrukcje budowlane.

1.3. Ochrona katodowa

W tym kontekście za jedno z kluczowych i najbardziej zaawansowanych rozwiązań uznaje się ochronę katodową, polegającą na celowym obniżeniu potencjału elektrochemicznego chronionej konstrukcji [4]. W praktyce realizuje się to za pomocą stacji ochrony katodowej (wymuszony przepływ prądu z zewnętrznego źródła) lub poprzez zastosowanie protektorów (anod galwanicznych). Takie działanie wymusza na żelazie rolę katody i niemal całkowicie hamuje proces jego utleniania. Obecnie metoda ta stanowi niezbędny element zabezpieczania infrastruktury podziemnej, kadłubów statków oraz zbiorników technicznych przed niszczącym wpływem środowiska.

1.3.1. Metoda protektorowa

Metoda protektorowa rodzaj elektrochemicznej ochrony katodowej, która polega na wykorzystaniu naturalnej różnicy potencjałów między metalami poprzez połączenie stali z metalem o znacznie wyższej aktywności chemicznej, takim jak cynk, magnez czy aluminium [4]. W tak utworzonym ogniwie galwanicznym (rys. 1) metal bardziej aktywny staje się anodą (protektorem) i to on przejmuje na siebie proces utleniania, ulegając stopniowemu rozpuszczaniu, podczas gdy chroniona konstrukcja stalowa staje się katodą i pozostaje nienaruszona. Jest to rozwiązanie skuteczne w środowiskach dobrze przewodzących, jak woda morska czy wilgotna gleba, ponieważ nie wymaga zewnętrznego źródła zasilania – protektor zużywa się elektrochemicznie, aż do momentu swojego całkowitego rozpuszczenia, co czyni tę metodę stosunkowo prostą w montażu, choć wymagającą okresowej wymiany elementów ochronnych.



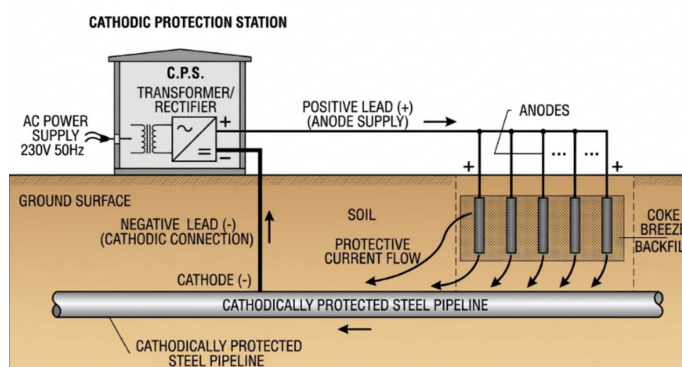
Rys. 1. Schemat działania ochrony galwanicznej (opracowanie własne na podstawie [4])

Fig. 1. Schematic of galvanic cathodic protection (adapted from [4])

1.3.2. Ochrona katodowa z zewnętrznym źródłem zasilania

Ochrona katodowa prądem zewnętrznym (rys. 2) to zaawansowana metoda polegająca na wymuszeniu przepływu prądu elektrycznego w kierunku chronionej konstrukcji za pomocą zewnętrznego zasilacza prądu stałego. W tym układzie ujemny biegun zasilacza łączy się z konstrukcją stalową, czyniąc ją katodą, natomiast biegun dodatni podpinają się do specjalnych, trudno rozpuszczalnych anod polaryzacyjnych (często wykonanych z żelaza wysokokrzemowego, tytanu pokrytego platyną lub grafitu) umieszczonych w tym samym środowisku elektrolitycznym.

W przeciwieństwie do metody protektorowej, to rozwiązanie pozwala na precyzyjną regulację natężenia prądu w zależności od agresywności korozyjnej otoczenia i powierzchni chronionego obiektu, co czyni ją idealną do zabezpieczania ogromnych struktur o dużym zapotrzebowaniu na prąd ochronny, takich jak długodystansowe rurociągi, rozbudowane portowe konstrukcje stalowe czy dna dużych zbiorników paliwowych. Choć wymaga ona stałego dostępu do energii elektrycznej i regularnego monitoringu sprawności urządzeń, oferuje znacznie dłuższą żywotność i wyższą skuteczność niż metoda z wykorzystaniem protektorów o niższym potencjale elektrochemicznym, szczególnie w środowiskach o zróżnicowanej rezystywności [5], gdzie naturalna różnica potencjałów byłaby niewystarczająca do powstrzymania korozji.



Rys. 2. Schemat działania ochrony katodowej z zewnętrznym źródłem zasilania (opracowanie własne na podstawie [4])

Fig. 2. Schematic of impressed current cathodic protection (adapted from [4])

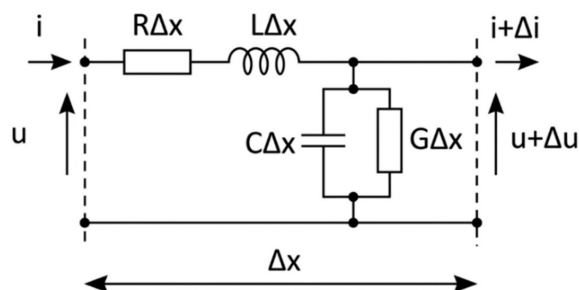
2. Model elektryczny rurociągu podziemnego z aktywną ochroną katodową

2.1. Gazociąg jako elektryczna linia długa

W ujęciu elektrotechnicznym rurociąg ze względu na swoją rozpiętość i ciągłość metaliczną modeluje się jako linię długą o parametrach rozłożonych [6]. W układzie tym potencjał ochronny i natężenie prądu ulegają stopniowemu tłumieniu, co wynika z podłużnej rezystancji metalu oraz poprzecznej przewodności upływu. Analiza linii długiej pozwala na dokładne obliczenie spadków napięć i optymalne rozmieszczenie stacji ochrony katodowej, gwarantując skuteczne hamowanie korozji w punktach najdalej oddalonych od zasilacza.

W modelu tym uwzględnia się również indukcyjność szeregową stali (istotną w stanach nieustalonych i przy oddziaływaniu pól linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia) oraz pojemność równoległą na styku metal-grunt, gdzie izolacja pełni rolę dielektryka [5]. Parametry te decydują o reaktancji układu, wpływając na rozchodzenie się prądu i reakcję systemu na zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne.

Elektryczny model segmentu rurociągu przedstawia się w formie klasycznego czwórnik (rys. 3). Połączone szeregowo rezystancja i indukcyjność metalu odpowiadają za spadki napięcia wzdłuż rury, natomiast równoległa pojemność i rezystancja przejścia izolacji obrazują upływ prądu do otoczenia. Taki schemat pozwala na matematyczną analizę rurociągu jako łańcucha powtarzalnych ogniw, kluczową dla wyznaczenia rozkładu potencjału.



Rys. 3. Pojedynczy segment rurociągu (opracowanie własne na podstawie [6])

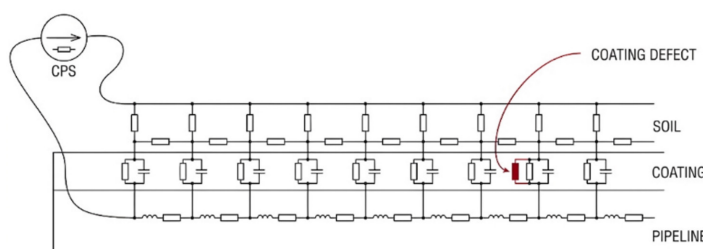
Fig. 3. Single pipeline segment (adapted from [6])

Opis parametrów modelu elektrycznego odcinka rurociągu:

- $R\Delta x$ – rezystancja liniowa rurociągu
- $L\Delta x$ – indukcyjność liniowa rurociągu
- $C\Delta x$ – pojemność powłoki izolacyjnej
- $G\Delta x$ – przewodność powłoki izolacyjnej
- Δx – odcinek rurociągu
- u – różnica potencjałów gleba-rurociąg
- i – prąd ochrony katodowej

Ten schemat zastępczy (typu czwórnik) pozwala na matematyczne modelowanie rozkładu potencjałów i prądów wzdłuż długich rurociągów przesyłowych. Ponadto, w pełnym modelu elektrycznym takiego obwodu należy uwzględnić złożoną strukturę oporności środowiska, w której kluczową rolę odgrywają

zarówno rezystancje gruntu wzdłuż rurociągu, jak i rezystancje przejścia do układu anodowego. Zmienna rezystywność gruntu na trasie przebiegu konstrukcji powoduje, że prąd ochronny napotyka na niejednorodny opór, co bezpośrednio wpływa na efektywność polaryzacji poszczególnych odcinków rury. Jednocześnie rezystancja doziemna układu anodowego określa sprawność, z jaką prąd z zasilacza jest w stanie „wypłynąć” z uziomu anodowego do gruntu i zamknąć obwód przez konstrukcję. Oba te parametry rezystancyjne muszą być precyzyjnie oszacowane, aby poprawnie zaprojektować moc zasilacza i zapewnić równomierny rozkład potencjału ochronnego na całej długości rurociągu, nawet w trudnych i zmiennych warunkach geologicznych. Ideę tą przedstawia rys. 4.

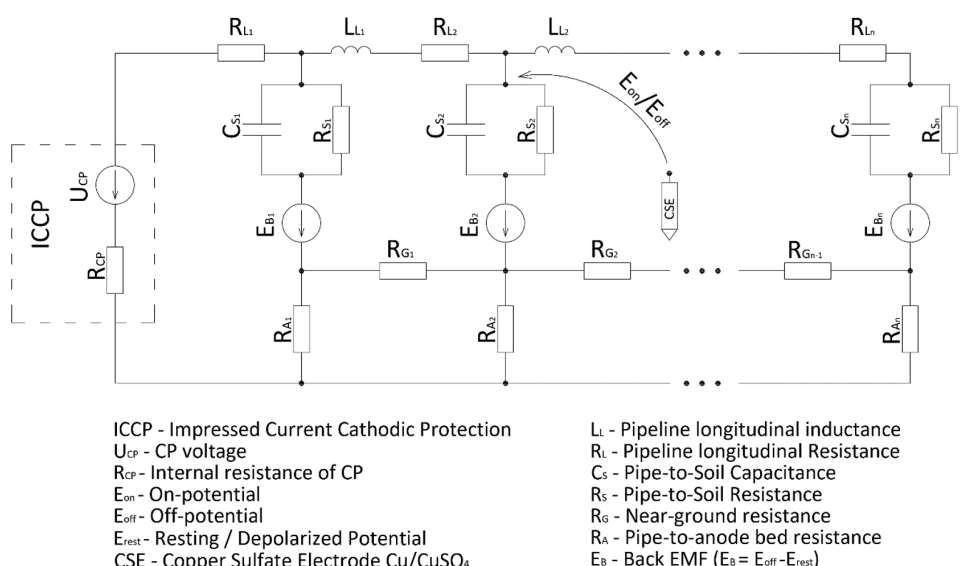


Rys. 4. Rurociąg jako linia długa (opracowanie własne)

Fig. 4. Pipeline as a long line (own elaboration)

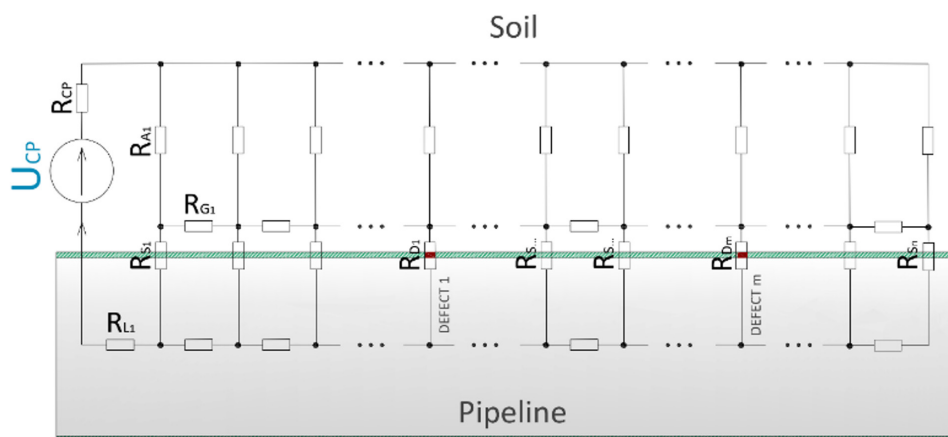
2.2. Elektryczny schemat zastępczy rurociągu chronionego katodowo

Na rys. 5 przedstawiono sformalizowany schemat zastępczy rurociągu podziemnego, który w stosunku do klasycznych modeli elektroizolacyjnych został rozbudowany o rzeczywiste parametry układu ochrony katodowej oraz charakterystykę elektrochemiczną granicy faz metal-grunt. Kluczowym elementem tej struktury jest wprowadzenie siły przeciwelektromotorycznej (E_b , ang. Back EMF) [7], wyznaczonej jako różnica pomiędzy potencjałem wyłączeniowym (E_{off}) a potencjałem stacjonarnym/depolaryzacji (E_{rest}). Siła ta bezpośrednio reprezentuje stan spolaryzowania elektrochemicznego rurociągu, odzwierciedlając procesy akumulacji ładunku na pojemności rura-ziemia (C_s) oraz kinetykę reakcji katodowych zachodzących w warstwie przypowierzchniowej. Zastosowanie takiego podejścia pozwala na kompleksową, wielokryterialną analizę pracy systemu ochrony prądem zewnętrznym (ICCP). Prezentowany model w sposób sformalizowany integruje parametry własne konstrukcji (wzdłużną rezystancję R_L i indukcyjność L_L) z wielkościami opisującymi zewnętrzną stację ochrony katodowej (napięcie U_{CP} , rezystancja wewnętrzna R_{CP}) oraz rezystancjami środowiskowymi, do których należą rezystancja uziemienia bliskiego (R_G) i rezystancja rura-grunt-anoda (R_A). Dzięki temu schemat stanowi podstawę teoretyczną do precyzyjnego wyznaczania parametrów diagnostycznych powłoki, w tym rezystancji przejścia (R_s , tożsamej z kluczowym parametrem R_{CO}), umożliwiając m.in. eliminację składowej omowej (spadku napięcia I_R) z pomiarów potencjału załączeniowego (E_{ON}).



Rys. 5. Elektryczny schemat zastępczy rurociągu podziemnego (opracowanie własne)

Fig. 5. Electrical equivalent circuit of a buried pipeline (own elaboration)



Rys. 6. Komponent rezystancyjny rurociągu podziemnego (opracowanie własne)

Fig. 6. Resistive component of a buried pipeline (own elaboration)

2.3. Redukcja modelu linii długiej do aspektu rezystancyjnego

W dalszej części opracowania uwaga zostanie skupiona na analizie kontekstu rezystancyjnego oraz spadków zadanego prądu ochrony katodowej w odniesieniu do lokalizacji i identyfikacji defektów izolacji rurociągu. Rozpatrywane będą mechanizmy przepływu prądu w obwodzie oraz zmiany rozkładu potencjału, które stanowią podstawę diagnostyki szczelności powłok ochronnych. Poprzez badanie anomalii w rezystancji przejścia oraz zmian natężenia prądu wzdłuż konstrukcji, możliwe będzie precyzyjne wskazanie miejsc uszkodzeń izolacji, w których dochodzi do nadmiarowego upływu prądu do gruntu – aspekt rezystancyjny tego procesu na schemacie zastępczym rurociągu podziemnego zilustrowano na rys. 6.

Przyjęcie podejścia rezystancyjnego oraz analiza rurociągu jako układu o parametrach rozłożonych prowadzi do sformułowa-

nia powyższego schematu zastępczego, gdzie:

- R_L – odpowiadają rezystancji podłużnej samej rury stalowej
- R_S – reprezentują rezystancję przejścia sprawnej izolacji
- R_D – (zaznaczona kolorem czerwonym) obrazuje gwałtowny spadek rezystancji w miejscu wystąpienia defektu powłoki
- R_G oraz R_A – modelują rezystancję gruntu oraz rezystancję rura-grunt-anoda
- U_{CP} wraz z R_{CP} – stanowią układ zasilania ochrony katodowej

Taki model pozwala na precyzyjne śledzenie rozprywu prądów ochronnych i identyfikację miejsc, w których pojawienie się defektu (R_D) powoduje lokalne zaburzenia potencjału, co jest kluczowe dla diagnostyki stanu technicznego izolacji bez konieczności odkopywania rurociągu.

2.4. Rezystancja przejścia odcinka rurociągu

Prezentowany model rurociągu to sieć rezystancyjna (model drabinkowy), w której kluczowym parametrem diagnostycznym jest całkowita rezystancja przejścia rurociąg-ziemia, oznaczona jako R_{co} [5]. Wartość tę wylicza się jako odwrotność sumy konduktancji wszystkich równoległych ścieżek upływu prądu. Taki sposób obliczeń wynika bezpośrednio z praw elektrotechniki dotyczących połączeń równoległych: prąd ochrony katodowej może wydostawać się z rury do otoczenia albo przez naturalną porowatość „zdrowej” izolacji (R_S), albo przez punktowe uszkodzenia mechaniczne, czyli defekty (R_D). W analizie tej celowo pomija się inne składowe widoczne na schemacie, takie jak rezystancja metalu rury (R_L) czy rezystancja podłużna gruntu (R_G). Rezystancja stali jest o wiele rzędów wielkości mniejsza od rezystancji izolacji, przez co rura w danym przekroju traktowana jest jako punkt o stałym potencjale, natomiast rezystancja gruntu jest parametrem zewnętrznym, zależnym od warunków atmosferycznych, a nie od stanu technicznego samej powłoki. W analizie skupionej na diagnostyce izolacji rurociągu, rezystancja przejścia do układu anodowego (R_A) jest pomijana, ponieważ z punktu widzenia lokalizacji defektów stanowi ona stały parametr zewnętrzny całego układu. Dzięki takiemu podejściu parametr R_{co} staje się precyzyjnym wskaźnikiem jakości izolacji, w którym nawet pojedynczy defekt o niskiej rezystancji drastycznie obniża wartość całkowitą, alarmując o konieczności naprawy. W konsekwencji, relację tę opisuje zaproponowane na potrzeby niniejszego badania równanie (1):

$$R_{co} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Si}} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{Dj}} \right)^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- R_{co} – rezystancja przejścia odcinka rurociągu, Ω
- R_{Si} – cząstkowa rezystancja izolacji rurociągu, Ω
- R_{Dj} – rezystancja pojedynczego defektu rurociągu, Ω

Człon pierwszy $\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Si}}$ reprezentuje rezystancję izolacji na n odcinakach, natomiast człon drugi $\sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{Dj}}$ reprezentuje m

zidentyfikowanych defektów izolacji, które zazwyczaj charakteryzują się znacznie mniejszą rezystancją, a tym samym dominują w końcowej wartości R_{co} .

2.5. Jednostkowa rezystancja przejścia odcinka rurociągu

Jednostkowa rezystancja przejścia (r_{co}) [5], jest to rezystancja przejścia dla powierzchni $S = 1 \text{ m}^2$ co opisuje zależność (2):

$$r_{co} = R_{co} \cdot S \quad (2)$$

gdzie:

- (r_{co}) – jednostkowa rezystancja przejścia odcinka rurociągu, Ω
- R_{co} – rezystancja przejścia odcinka rurociągu, Ω
- S – pole powierzchni zewnętrznej rurociągu, m^2

Wprowadzenie tego parametru jest niezbędne dla celów porównawczych, gdyż pozwala na obiektywną ocenę stanu powłoki izolacyjnej niezależnie od średnicy rury czy długości rozpatrywanego odcinka. Podczas gdy rezystancja całkowita R_{co} maleje wraz ze wzrostem długości gazociągu (zgodnie z zasadą łączenia równoległego), wartość jednostkowa r_{co} powinna pozostawać relatywnie stała dla danego typu izolacji ułożonej w jednorodnych warunkach gruntowych. W praktyce inżynierskiej parametr ten stanowi fundament klasyfikacji jakościowej izolacji. Wysokie wartości r_{co} , rzędu $10^8 \div 10^9 \Omega \cdot \text{m}^2$, świadczą o doskonałym stanie powłok syntetycznych (np. polietylenowych), natomiast spadki poniżej wartości krytycznych określonych w normach [8] sygnalizują postępującą degradację materiałową lub obecność rozproszonych wad mikroskopijnych. Dzięki przeliczeniu rezystancji na jednostkę powierzchni, możliwe jest zestawienie wyników z różnych sekcji rurociągu i precyzyjne wytypowanie tych fragmentów, które wymagają intensyfikacji ochrony katodowej lub bezpośredniej naprawy izolacji.

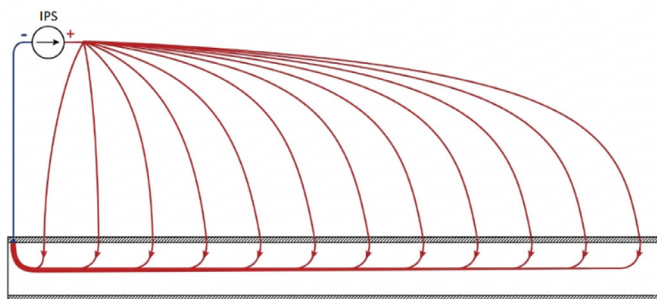
2.6. Rozpływ prądów ochrony katodowej

Analiza jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) jest kluczowa dla zrozumienia zjawiska rozptyłu prądów ochrony katodowej wzdłuż rurociągu, którego ogólny mechanizm zilustrowano na rys. 7. Zgodnie z modelem drabinkowym, prąd wprowadzany do konstrukcji z uziomu anodowego nie rozkłada się równomiernie, lecz ulega tłumieniu wraz ze wzrostem odległości od punktu drenażu. Skala tego tłumienia zależy bezpośrednio od relacji między rezystancją metalu rury a jednostkową rezystancją przejścia izolacji.

W przypadku wysokiej wartości r_{co} , izolacja stanowi skuteczną barierę dla prądu, co wymusza jego przepływ na znaczne odległości wzdłuż osi rurociągu. Dzięki temu pojedyncza stacja ochrony katodowej jest w stanie spolaryzować bardzo długi odcinek konstrukcji. Jeśli jednak jednostkowa rezystancja przejścia ulega obniżeniu – czy to na skutek starzenia się powłoki, czy obecności defektów, powoduje to:

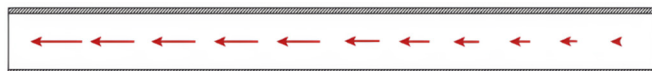
- Skrócenie zasięgu ochrony. Większość prądu wypływa w pobliżu źródła, pozostawiając dalsze odcinki rurociągu niedostatecznie spolaryzowane (niedochronione).
- Niejednorodność potencjału. W miejscach o niskim r_{co} dochodzi do gwałtownego wzrostu gęstości prądu, co może prowadzić do zjawiska nadpolaryzacji i uszkodzeń powłoki, takich jak jej odspojenie na skutek pęcherzenia katodowego [9].
- Ekranowanie elektryczne. Lokalne anomalie w rozptywie prądu mogą maskować mniejsze uszkodzenia izolacji znajdujące się w sąsiedztwie dużych defektów.

Zależność tę opisuje stała propagacji rurociągu, która wskazuje, że im wyższa jednostkowa rezystancja przejścia (r_{co}), tym bardziej ekonomiczny i stabilny staje się system ochrony katodowej, zapewniając bezpieczny rozkład potencjałów na całej długości obiektu.



Rys. 7. Rozpływ prądów ochrony katodowej (opracowanie własne)
Fig. 7. Cathodic protection current distribution (own elaboration)

Kluczowym elementem wyznaczania rezystancji przejścia analizowanej powłoki jest gradient prądu powrotnego do stacji ochrony katodowej (SOK/CPS). Analiza spadku natężenia prądu pozwala na precyzyjne określenie rezystancji badanego odcinka rurociągu, co jest niezbędne do rzetelnej oceny stanu technicznego izolacji. Wartości prądu powracającego do SOK przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Przyrost prądów ochrony katodowej powracających do stacji SOK (opracowanie własne)
Fig. 8. Increase in cathodic protection currents returning to the CP Station (own elaboration)

2.7. Pomiary prądu metodą Current Span w badanym odcinku rurociągu

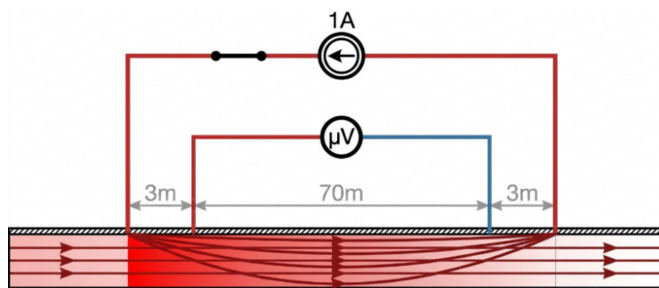
W technice ochrony katodowej pomiar natężenia prądu płynącego wzdłuż rurociągu jest kluczowy dla lokalizacji uszkodzeń izolacji oraz oceny efektywności systemu. Jedną z najdokładniejszych metod jest wykorzystanie samego odcinka gazociągu jako bocznika (rezystora pomiarowego), co określa się mianem odcinka pomiarowego spadku napięcia, tzw. PIs (ang. *Current Span* – CS).

Metoda ta opiera się na prawie Ohma. Stalowy rurociąg posiada określoną, choć bardzo niską, rezystancję wzdłużną (R_L). Jeśli przez rurociąg płynie prąd ochrony katodowej (I), to na mierzonym odcinku o długości (L) powstaje niewielki spadek napięcia (ΔU) [10]. Stosujemy wzór (3):

$$I = \frac{\Delta U}{R_L} \quad (3)$$

2.7.1. Układ pomiarowy

Aby wykonać pomiar, niezbędne są cztery wyprowadzenia kablowe zainstalowane na gazociągu w dwóch punktach oddalonych od siebie o określoną odległość. Konfigurację tego układu czteropunktowego, służącego do wyznaczania stałej kalibracji, przedstawiono na rys. 9. Para wewnętrzna służy do pomiaru spadku napięcia (ΔU). Para zewnętrzna służy do kalibracji odcinka poprzez zadanie prądu kalibracji.



Rys. 9. Wyznaczenie stałej kalibracji (opracowanie własne na podstawie [10])
Fig. 9. Determination of the calibration constant (adapted from [10])

2.7.2. Procedura pomiarowa

Pomiar natężenia prądu ochrony katodowej odbywa się w dwóch etapach:

- **Kalibracja** (wyznaczenie rezystancji odcinka). Ponieważ rezystancja stali zależy od gatunku rury, grubości ścianki i temperatury, nie wylicza się jej tylko teoretycznie. Przez kable zewnętrzne wymusza się przepływ znanego prądu z zewnętrznego źródła i mierzy zmianę spadku napięcia na kablach wewnętrznych. Dzięki temu wyznacza się współczynnik kalibracji (stała kalibracji K) (np. ile Amperów odpowiada 1 μV spadku).
- **Pomiar** prądu naturalnego. Po skalibrowaniu odcinka, mierzy się rzeczywisty spadek napięcia wywołany wyłącznie przez system ochrony katodowej. Korzystając z wyznaczonego wcześniej współczynnika, przelicza się μV na rzeczywiste natężenie prądu płynącego w rurze.

2.7.3. Stała kalibracyjna (K)

W metodzie spadku napięcia na odcinku rurociągu (ang. *Current Span*), kluczowym parametrem jest stała kalibracji (K). Określa ona relację między mierzonym spadkiem napięcia a rzeczywistym natężeniem prądu płynącego w rurze. Warto zauważyć, że stała ta jest w istocie przewodnością elektryczną danego odcinka gazociągu. Natomiast wzór na jej wyznaczenie to:

$$I = K \cdot \Delta U \quad (4)$$

gdzie:

- I – natężenie prądu, A
- K – stała kalibracji, S
- ΔU – zmierzony spadek napięcia, V

Wyznaczenie stałej w Siemensach pozwala na proste i szybkie przeliczanie wyników pomiarowych: wystarczy pomnożyć odczyt z woltomierza przez stałą kalibracji, aby uzyskać dokładną wartość prądu ochrony katodowej. Metodę wyznaczania stałej kalibracji K przedstawioną na rys. 9 i opisuje wzór (5). Czerwony gradient na schemacie ilustruje relację między prądem ochrony a prądem kalibracyjnym, pozwalając na wizualne porównanie ich wielkości.

$$K = \frac{I_{SKAL}}{U_{SKAL}} \quad (5)$$

gdzie:

- K – stała kalibracji, przewodność mierzonego odcinka gazociągu, S
 I_{SKAL} – zadawany prąd skalowania o znanej wartości (np. 1 A), A
 U_{SKAL} – zmierzony spadek napięcia dla odcinka rurociągu, V

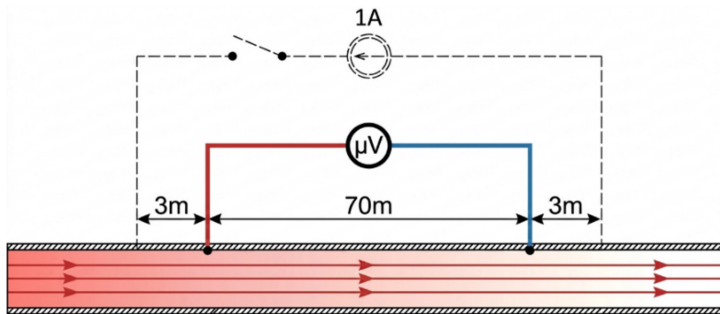
2.7.4. Pomiar natężenia prądu ochrony katodowej

Pomiar natężenia prądu ochrony katodowej (I_{PIs}) metodą spadku napięcia na odcinku rurociągu (PIs) opiera się na wykorzystaniu stałej kalibracji. Jest to parametr indywidualny dla każdego punktu pomiarowego, który uwzględnia geometrię rury oraz właściwości fizyczne stali. Sposób wyznaczania prądu ochrony dla danego odcinka gazociągu, wraz z odpowiednim wzorem matematycznym (6), przedstawiono na rys. 10.

$$I_{PIs} = U_{PIs} \cdot K \quad (6)$$

gdzie:

- I_{PIs} – prąd mierzony w punkcie pomiarowym PIs , A
 U_{PIs} – napięcie mierzone w punkcie pomiarowym PIs , V
 K – stała kalibracji, S



Rys. 10. Pomiar spadku napięcia (opracowania własne na podstawie [10])

Fig. 10. Voltage drop measurement (adapted from [10])

2.8. Obliczenie rezystancji przejścia

2.8.1. Pomiar prądu ochrony katodowej pobieranego przez odcinek rurociągu pomiędzy punktami PIs

W celu określenia ubytku prądu ochrony katodowej na wybranym odcinku rurociągu, ograniczonym punktami pomiarowymi PIs (ang. CS), stosuje się dwukierunkową metodę pomiarową. Polega ona na jednoczesnej analizie natężenia prądu płynącego od stacji ochrony katodowej (kierunek malejący) oraz prądu powracającego (kierunek rosnący). Wyznaczona różnica reprezentuje całkowity prąd pobierany przez analizowany odcinek i stanowi bezpośredni wskaźnik kondycji powłoki izolacyjnej oraz jej ewentualnych defektów. Obliczenia wykonuje się według zależności (7):

$$\Delta I = I_{PIs_i}^{mal} - I_{PIs_{i-1}}^{ros} \quad (7)$$

gdzie:

- ΔI – zmiana (różnica) natężenia prądu, A
 $I_{PIs_i}^{mal}$ – natężenie prądu zmierzone w punkcie PIs w kierunku malejącym, A

I_{PIs}^{ros} – natężenie prądu zmierzone w punkcie PIs w kierunku rosnącym, A

i – nr punktu pomiarowego

W celu uzyskania rzeczywistych wartości prądu ochrony katodowej, kluczowe jest wyeliminowanie składowych tła pomiarowego. Aby skompensować zjawisko Seebecka [11] (powstawanie sił termoelektrycznych na złączach różnych metali przy różnicy temperatur gruntu i otoczenia), a także wpływ zewnętrznych prądów błądzących [12], indukcji od równoległych linii elektroenergetycznych AC oraz naturalnych prądów ogni w korozyjnych [2], należy wyznaczyć czystą składową prądu ochrony. W tym celu od prądu mierzonego w stanie włączonym odejmuje się prąd spoczynkowy, rejestrowany przy wyłączonej stacji ochrony katodowej, zgodnie z zależnością (8):

$$I_{PIs} = I_{ON} - I_{OFF} \quad (8)$$

gdzie:

- I_{PIs} – natężenie prądu zmierzone w punkcie PIs , A
 I_{ON} – natężenie prądu zmierzone przy włączonym prądzie ochrony katodowej, A
 I_{OFF} – natężenie prądu zmierzone po wyłączeniu prądu ochrony katodowej, A

2.8.2. Wyznaczenie różnicy potencjałów ΔE

W celu pełnej oceny parametrów ochrony konieczne jest również określenie skoku potencjału. Definiuje się go jako wartość bezwzględną różnicy potencjałów załączeniowego i wyłączeniowego, co opisuje zależność (9):

$$\Delta E = |E_{ON(sr)} - E_{OFF(sr)}| \quad (9)$$

gdzie:

- ΔE – różnica potencjałów załączeniowy/wyłączeniowy, V
 $E_{ON(sr)}$ – średni potencjał załączeniowy dla mierzonego odcinka, V
 $E_{OFF(sr)}$ – średni potencjał wyłączeniowy dla mierzonego odcinka, V

2.8.3. Obliczenie rezystancji przejścia R_{CO}

Aby wyznaczyć wartość rezystancji przejścia R_{CO} skorzystano ze zależności prawa Ohma wg wzoru (10):

$$R_{CO} = \Delta E / \Delta I \quad (10)$$

gdzie:

- R_{CO} – rezystancja przejścia, Ω
 ΔE – różnica potencjałów załączeniowy/wyłączeniowy, V
 ΔI – zmiana (różnica) natężenia prądu, A

2.8.4. Wynik końcowy – obliczenie jednostkowej rezystancji przejścia r_{co}

Kolejnym etapem jest wyznaczenie rezystancji przejścia w przeliczeniu na $1 m^2$. W tym celu należy wyznaczyć pole powierzchni zewnętrznej rurociągu:

$$S = \pi \cdot d \cdot l \quad (11)$$

gdzie:

- S – pole powierzchni zewnętrznej rurociągu, m^2
- d – średnica zewnętrzna rurociągu, m
- l – długość odcinka rurociągu, m

Rezystancja przejścia r_{co} dla $1 m^2$ jest to iloczyn rezystancji przejścia R_{co} i pola powierzchni zewnętrznej rurociągu, dla przypomnienia, obliczenia bazują na wzorze (2). Tak obliczona rezystancja jednostkowa r_{co} wyrażona jest w Ohmach (Ω).

3. Metodyka wykonania pomiarów

3.1. Punkt pomiaru natężenia prądu (PIs)

Na rys. 11 przedstawiono rzeczywisty punkt pomiarowy typu PIs zainstalowany na gazociągu wysokiego ciśnienia DN1000. Punkt umożliwia pomiar metodą czteropunktową (układ Kelvina) [13], co eliminuje wpływ rezystancji przewodów pomiarowych. GD-1 oraz GD₇₀-4 (czerwone) to zaciski prądowe (zewnętrzne). Służą do podłączenia zewnętrznego źródła prądu podczas kalibracji odcinka pomiarowego (wyznaczania stałej K). GP-2 oraz GP₇₀-3 (czarne) to zaciski napięciowe (wewnętrzne). Służą do pomiaru spadku napięcia ΔU wywołanego przepływem prądu ochrony lub prądu kalibracyjnego. Indeks „70” oznacza odległość 70 metrów między punktami pomiarowymi. Eo-5 to punkt podłączenia elektrody odniesienia ($Cu/CuSO_4$), służący do pomiaru potencjału rurociągu względem ziemi.

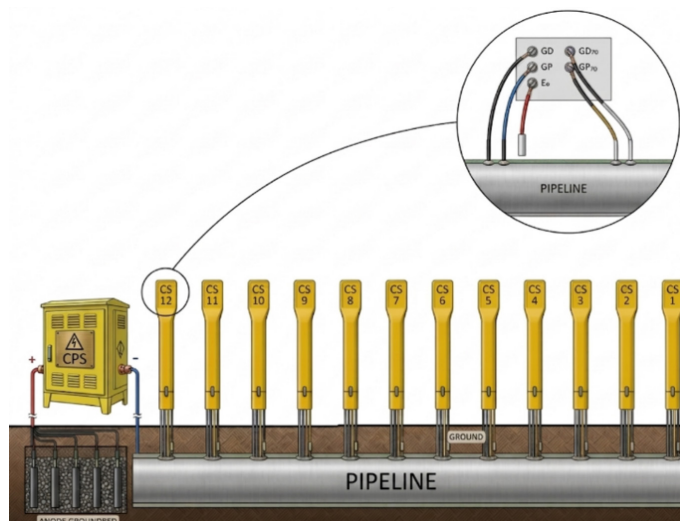


Rys. 11. Pomiar spadku napięcia (materiały GAZ-SYSTEM)

Fig. 11. Voltage drop measurement (GAZ-SYSTEM materials)

3.2. Organizacja punktów PIs

Schemat (rys. 12) ilustruje system monitoringu ochrony katodowej rurociągu, oparty na 12 punktach pomiarowych typu PIs (CS). Zastosowanie odpowiednio gęstej sieci punktów pozwala na stworzenie pełnego profilu prądowego rurociągu, co umożliwia precyzyjne monitorowanie efektywności ochrony oraz szybkie reagowanie na pojawiające się ogniska korozji.



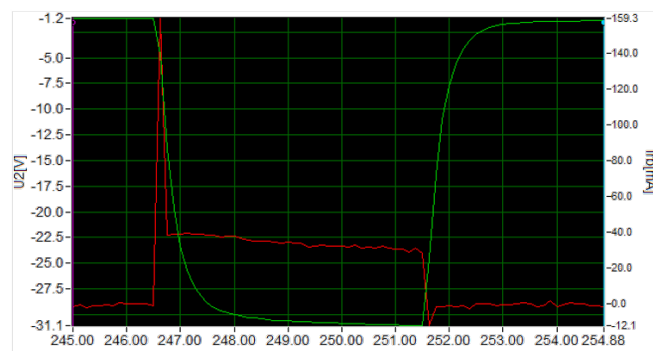
Rys. 12. Organizacja punktów PIs (opracowanie własne)

Fig. 12. Arrangement of CS measurement points (own elaboration)

3.3. Aparatura pomiarowa dla punktów PIs (CS)

Do precyzyjnego wyznaczania natężenia prądu ochrony katodowej oraz kalibracji polowej stosuje się wielokanałowe rejestratory współpracujące z przystawkami wymuszającymi stabilny prąd testowy. Kluczowe dla dokładności pomiaru tak niskich spadków napięcia jest zastosowanie aparatury o bardzo wysokiej impedancji wejściowej, co minimalizuje obciążenie mierzonego obwodu, oraz przetworników analogowo-cyfrowych (A/C) o wysokiej rozdzielczości. Zapewnia to stabilną rejestrację danych w środowisku o silnych zakłóceniach, w tym w obecności zewnętrznych prądów błądzących. Na podstawie wygenerowanego impulsu prądowego i zmierzonej zmiany potencjału układu, wyznaczana jest rzeczywista przewodność mierzonego odcinka gazociągu, stanowiąca jego stałą kalibracji.

Proces ten wspiera dedykowane oprogramowanie inżynierskie, służące do komputerowej analizy i automatyzacji obliczeń. Aplikacja wyznacza stałą kalibracji w Siemensach [S] poprzez zaawansowaną analizę regresji, korelując wymuszony prąd testowy ze zmierzonym spadkiem napięcia na rurociągu. Wbudowane algorytmy skutecznie eliminują szumy tła, a na podstawie wbudowanych wzorów przeliczają wartości miliwoltowe na rzeczywiste natężenie prądu płynącego w rurze. System zarządza bazą punktów PIs i archiwizuje dane, ułatwiając monitorowanie trendów i ocenę stabilności parametrów elektrycznych, co jest niezbędne do rzetelnej oceny stanu technicznego powłok wysokiej szczelności (*high-integrity coatings*). Zaprezentowana analiza opiera się na danych z punktu PIs (CS) i ilustruje korelację między natężeniem prądu ochrony katodowej a spadkiem napięcia na mierzonej odcinku (rys. 13). Wykorzystując wyznaczoną wcześniej stałą kalibracji, program automatycznie przelicza zarejestrowane wartości napięciowe na rzeczywisty prąd płynący w konstrukcji.



Rys. 13. Związek między natężeniem prądu ochrony katodowej (kolor czerwony) i spadkiem napięcia (kolor zielony) - zrzut z ekranu
Fig. 13. Relationship between cathodic protection current (red) and voltage drop (green) – screenshot

4. Wyniki pomiarów

W tabeli 1 zestawiono dane pomiarowe z 2025 roku oraz wyniki obliczeń dla badanego odcinka gazociągu o długości ponad 28 km. Dane te służą do oceny stanu powłoki izolacyjnej oraz efektywności ochrony katodowej. **Parametry wejściowe:** potencjały i prądy w trybie załączeniowym (E_{ON} , I_{ON}) oraz wyłączeniowym (E_{OFF} , I_{OFF}). Wartości obliczone: różnice (ΔE , ΔI), stała skalowania (K) oraz jednostkowa rezystancja powłoki (r_{CO}). Warunki pomiaru: badanie zrealizowano przy celowo obniżonym poten-

cjale ochrony. Pozwoliło to uzyskać wyższe gęstości prądowe, co zwiększyło precyzję obliczeń i ułatwiło wykrywanie drobnych uszkodzeń izolacji.

5. Analiza wyników

5.1. Ocena parametrów ochrony i ciągłości powłoki izolacyjnej

Analiza trasy rurociągu Pls (CS) 1–12 wykazuje stabilne profile potencjałów (E_{ON} , E_{OFF}) oraz wysoką szczelność powłok wysokiej szczelności (*high-integrity coatings*) na większości badanych sekcji (r_{CO} rzędu $10^8 \Omega \cdot m^2$). Zidentyfikowano jednak trzy istotne odchylenia:

- Krytyczny defekt Pls (CS) 4–5: skokowy, gwałtowny pik poboru prądu ($\Delta I = 92,89 \text{ mA}$) oraz drastyczny spadek rezystancji przejścia ($r_{CO} = 2,60 \cdot 10^6 \Omega \cdot m^2$). Krytyczny stan izolacji w tym miejscu bezsprzecznie potwierdzają dane z tabeli oraz wykres na rys. 14.
- Potencjalna usterka Pls (CS) 1–2: niewielka anomalia ($\Delta I = 10,90 \text{ mA}$, $r_{CO} = 3,36 \cdot 10^7 \Omega \cdot m^2$), która może sugerować drobne uszkodzenie lub problem z monoblokiem (wymagana dodatkowa diagnostyka).
- Wpływ prądów błądzących: zjawisko to jest prawdopodobną przyczyną ujemnych wartości spadku natężenia prądu na odcinkach Pls (CS) 8–9 oraz Pls (CS) 3–4.

Tabela 1. Wyniki pomiarów w roku 2025 (opracowanie własne na podstawie danych GAZ-SYSTEM)
Table 1. Measurement results in 2025 (own elaboration based on GAZ-SYSTEM data)

Punkt pomiarowy	Kilometr [m]	Kierunek	Stała skalowania K [S]	E_{on} [V]	I_{on} [mA]	E_{off} [V]	I_{off} [mA]	ΔE [V]	ΔI [mA]	R_{co} [Ω]	S [m^2]	r_{co} [Ωm^2]
Pls (CS) 12	28117	malejąco	4459,36	-30,87	91,96	-1,24	-1,33					
Pls (CS) 11	26205	rosnąco	4138,73	-30,93	92,08	-1,23	-1,19	29,67	0,02	1483250,00	6099,74	9,05E+09
Pls (CS) 11	26205	malejąco	4138,73	-30,88	98,85	-1,19	6,15	29,69	1,30	22834,62	9267,65	2,12E+08
Pls (CS) 10	23300	rosnąco	4102,47	-30,92	79,29	-1,24	-12,11					
Pls (CS) 10	23300	malejąco	4102,47	-30,94	74,75	-1,27	-16,76	29,65	1,45	20444,83	9057,09	1,85E+08
Pls (CS) 9	20461	rosnąco	3980,97	-30,86	110,61	-1,24	20,55					
Pls (CS) 9	20461	malejąco	3985,20	-30,73	142,81	-1,25	14,40	29,49	-1,23	23975,61	8173,39	1,96E+08
Pls (CS) 8	17899	rosnąco	4371,50	-30,75	102,99	-1,25	-26,65					
Pls (CS) 8	17899	malejąco	4371,50	-30,73	111,53	-1,24	-16,84	29,49	4,10	7192,68	8505,18	6,12E+07
Pls (CS) 7	15233	rosnąco	2790,77	-30,73	115,18	-1,24	-9,09					
Pls (CS) 7	15233	malejąco	2790,77	-30,89	115,99	-1,24	-8,21	29,65	0,43	68941,86	7158,90	4,94E+08
Pls (CS) 6	12989	rosnąco	3074,61	-30,96	112,98	-1,32	-10,79					
Pls (CS) 6	12989	malejąco	3074,61	-30,92	122,88	-1,32	-1,15	29,51	1,28	23050,78	2612,81	6,02E+07
Pls (CS) 5	12170	rosnąco	4169,94	-30,67	121,42	-1,26	-1,33					
Pls (CS) 5	12170	malejąco	4171,78	-30,83	86,16	-1,23	-28,23	29,50	92,89	317,58	8176,59	2,60E+06
Pls (CS) 4	9607	rosnąco	4160,07	-30,66	21,30	-1,26	-0,20					
Pls (CS) 4	9607	malejąco	4160,07	-30,49	19,47	-1,26	-1,47	29,24	-0,52	56221,15	8690,21	4,89E+08
Pls (CS) 3	6883	rosnąco	4110,38	-30,48	21,17	-1,24	-0,29					
Pls (CS) 3	6883	malejąco	4110,38	-30,40	19,32	-1,24	-1,37	29,03	0,17	170764,71	8307,38	1,42E+09
Pls (CS) 2	4279	rosnąco	3128,81	-30,33	17,98	-1,43	-2,54					
Pls (CS) 2	4279	malejąco	3128,81	-30,53	15,27	-1,24	1,64	29,34	11,90	2465,55	13619,13	3,36E+07
Pls (CS) 1	10	rosnąco	4295,46	-30,60	0,85	-1,21	-0,88					

Tabela 2. Zestawienie wartości natężenia prądu ochrony katodowej (ΔI) (opracowanie własne na podstawie danych GAZ-SYSTEM)

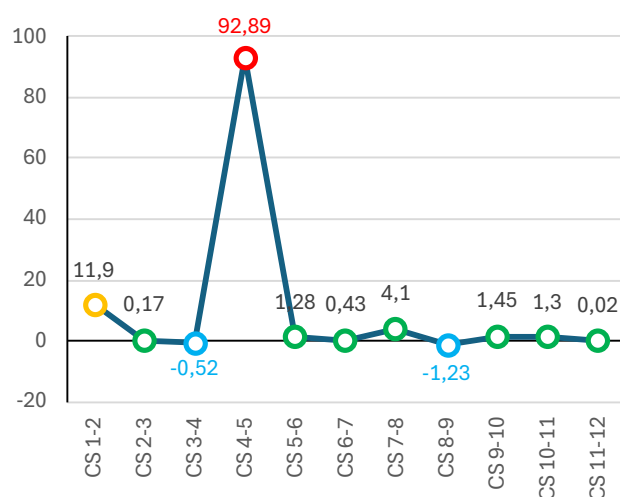
Table 2. Cathodic protection current intensity (ΔI) (own elaboration based on GAZ-SYSTEM data)

Odcinek	ΔI [mA]	Obserwacja
CS 1-2	11,9	drobne uszkodzenie
CS 2-3	0,17	
CS 3-4	-0,52	wpływ prądów błądzących (?)
CS 4-5	92,89	krytyczny stan izolacji
CS 5-6	1,28	
CS 6-7	0,43	
CS 7-8	4,1	
CS 8-9	-1,23	wpływ prądów błądzących (?)
CS 9-10	1,45	
CS 10-11	1,3	
CS 11-12	0,02	



Rys. 15. Defekt izolacji gazociągu (materiały GAZ-SYSTEM)

Fig. 15. Defect in a gas pipeline coating (GAZ-SYSTEM materials)



Rys. 14. Rozkład natężenia prądu ochrony katodowej pobieranego na poszczególnych odcinkach rurociągu (opracowanie własne na podstawie danych GAZ-SYSTEM)

Fig. 14. Distribution of cathodic protection current drawn along individual pipeline sections (own elaboration based on GAZ-SYSTEM data)

5.2. Potwierdzenia uszkodzenia powłoki izolacyjnej

W celu weryfikacji anomalii na odcinku Pls 4–5 (wzrost prądu do 92,89 mA), wykonano odkrywkę kontrolną. Potwierdziła ona poważne uszkodzenie mechaniczne powłoki, w postaci śladu po świdrze, odsłaniające stalowy korpus rury, rysunek 15. Defekt powstał na skutek bezwypokowego odwiertu horyzontalnego, zrealizowanego przez stronę trzecią. Rozległy kontakt stali z gruntem wytworzył ognisko korozyjne o bardzo niskiej rezystancji przejścia ($r_{co} = 2,60 \Omega \cdot m^2$), co przełożyło się na intensywny pobór prądu. Sprawna lokalizacja usterki dowodzi wysokiej czułości zastosowanej metody, która skutecznie zapobiegła rozwojowi głębokiej korozji wżerowej. Przed zasypaniem wykopu wykonano renowację powłoki, a jej pełną szczelność zweryfikowano pomiarem DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*).

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania na 28-kilometrowym odcinku gazociągu przesyłowego udowadniają, że analiza jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) jest skutecznym i precyzyjnym narzędziem w diagnostyce stanu technicznego powłok o wysokiej szczelności (*high-integrity coatings*). Implementacja modelu elektrycznego rurociągu jako linii długiej o parametrach rozłożonych, w połączeniu z empirycznymi pomiarami spadków napięcia metodą Current Span (Pls/CS), umożliwiła rzetelną ocenę rozkładu potencjałów i natężenia prądu ochrony katodowej bez konieczności masowej ingerencji w strukturę gruntu.

Na podstawie zgromadzonych danych potwierdzono wysoką szczelność dielektryczną izolacji na większości analizowanej trasy, gdzie wartości r_{co} utrzymywały się na bezpiecznym poziomie powyżej projektowanego $5,9 \cdot 10^7 \Omega \cdot m^2$ [14]. Najważniejszym osiągnięciem weryfikującym opisaną metodę było wytypowanie anomalii na odcinku pomiarowym Pls (CS) 4–5. Rejestracja gwałtownego wzrostu poboru prądu ochrony (ΔI) oraz drastyczny spadek jednostkowej rezystancji przejścia (r_{co}) bezsprzecznie wskazywały na powstanie defektu izolacji. Wykonana odkrywka kontrolna w pełni potwierdziła wskazania analityczne, ujawniając rozległe uszkodzenie mechaniczne powłoki wywołane przewiertem horyzontalnym zrealizowanym przez podmiot trzeci.

Zastosowane podejście, opierające się na korelacyjnej analizie natężenia prądu ochrony katodowej płynącego ścianką rurociągu oraz jednostkowej rezystancji powłoki wykazuje bardzo wysoką czułość diagnostyczną. Metoda ta pozwala nie tylko na obiektywną ocenę równomiernego starzenia się izolacji, ale przede wszystkim na natychmiastową detekcję krytycznych defektów strukturalnych. Wdrożenie wyznaczania parametru r_{co} do zaawansowanych procedur monitoringu pozwala na lokalizację ognisk korozyjnych z dużą dokładnością, co umożliwia podjęcie prewencyjnych działań naprawczych, zanim dojdzie do uszkodzenia infrastruktury.

7. Perspektywy rozwoju modeli diagnostycznych i analizy dynamiczne

Obiecującym kierunkiem dalszego rozwoju przedstawionego modelu drabinkowo-różniczkowego jest przejście od statycznej analizy rezystancyjnej do badania dynamicznej odpowiedzi rurociągu, traktowanego jako pełna linia długa o charakterze *RLC*. Uwzględnienie parametrów reaktywnych – wzdlużnej indukcyjności stali (*L*) oraz poprzecznej pojemności granicy faz metal-grunt i samej powłoki (*C*) – otwiera zupełnie nowe możliwości diagnostyczne w stanach nieustalonych. Analiza dynamiczna, bazująca na odpowiedzi impulsowej układu lub metodach spektroskopii impedancyjnej w szerokim zakresie częstotliwości, pozwoliłaby na precyzyjne odseparowanie czysto omowych spadków napięcia od procesów relaksacji ładunku na pojemności rura-ziemia.

Rozwój modeli w tym kierunku ma kluczowe znaczenie dla eliminacji zakłóceń wywoływanych przez prądy błędzące oraz indukowane fale elektromagnetyczne, generowane przez sąsiadujące linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Ponadto, wyznaczenie dynamicznej charakterystyki częstotliwościowej gazociągu umożliwiłoby opracowanie zaawansowanych algorytmów numerycznych zdolnych do identyfikacji mikrouszkodzeń izolacji 3LPE/3LPP na podstawie analizy odbicia fali sygnałowej (metoda reflektometrii czasowej TDR). Implementacja pełnego modelu *RLC* w systemach monitoringu pozwoliłaby na bezprecedensowy wzrost dokładności lokalizacji defektów bez konieczności fizycznego próbkowania potencjałów w tak wielu punktach terenowych.

8. Literatura

- [1] Pourbaix, M. (1974). *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions* (2nd ed.). National Association of Corrosion Engineers.
- [2] Číp, J., Dědina, T., & Míčko, F. (2020). *Ochrona katodowa w teorii i praktyce*. Materiały ze szkolenia dla personelu ochrony katodowej zorganizowanego przez firmę ATEKO, Chałupki, 9–13 grudnia 2024 r.
- [3] Miszczyk, A., Szociński, M., & Darowicki, K. (2022). *Powłoki malarskie w ochronie przeciwkorozyjnej. Zasady stosowania i kontrola jakości*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
- [4] Żakowski, K., & Darowicki, K. (2011). *Ochrona katodowa*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [5] International Organization for Standardization. (2015). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Cathodic protection of pipeline systems—Part 1: On-land pipelines* (ISO Standard No. 15589-1:2015). International Organization for Standardization
- [6] Bolkowski, S. (2017). *Teoria obwodów elektrycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN
- [7] PKN. (2005). PN-EN 13509:2005. Metody pomiarowe w ochronie katodowej. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- [8] International Organization for Standardization. (2016). ISO 21809-3:2016. Petroleum and natural gas industries—External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems—Part 3: Field joint coatings. International Organization for Standardization
- [9] Stochaj, P. (2012). Zastosowanie korozymetrii rezystancyjnej w odniesieniu do kryteriów ochrony katodowej gazociągów. *Nafta-Gaz*, 68(5), 298-305
- [10] Hanasz, M. (2009). POMIAR PRĄDU w ocenie powłoki rurociągu. *Ochrona przed Korozją*, (8), 308-313
- [11] Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
- [12] Stochaj, P. (2013). Prądy błędzące jako źródło zagrożenia korozyjnego gazociągów stalowych. *Nafta-Gaz*, 69(9), 683-689
- [13] Schroder, D. K. (2006). *Semiconductor material and device characterization* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.
- [14] GAZ-SYSTEM S.A. (2021). *Standard bezpieczeństwa technicznego* [Dokument wewnętrzny, niepublikowany].