

MAREK FIEDOROWICZ

ORCID: 0000-0002-1579-0944

Gdański ośrodek gazowniczy

DOI: 10.15199/40.2023.8.1

On-potential – a new perspective?

Potencjał załączeniowy – nowa odsłona?

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

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

1. Introduction

Potential measurements are the basic measurements performed in the practice of cathodic protection [1]. The potential criterion is the most widely used criterion (one that is specified in relevant standards) for evaluating the effectiveness of cathodic protection of underground metallic structures:

$$E_p \leq E_{O_r} \quad (1)$$

where: E_p – polarization potential of the structure in the defect of the insulation coating, E_{O_r} – protective potential.

According to the standards, protective potentials are defined as potentials at the interface between the metal surface of the structure and the electrolytic environment, at which the corrosion rate is not greater than 10 $\mu\text{m}/\text{year}$, and they are given without the so-called ohmic component. Adequate lowering of the potentials, at least to the protective potentials, of all (exposed) metal surfaces in contact with the soil electrolyte is necessary to achieve a state of effective cathodic protection of a steel underground structure (for example, a pipeline) covered with an insulation coating with discontinuities (cavities, defects). Measurements to assess the polarization of the structure in insulation defects and other areas without an insulation coating are necessary to infer the effectiveness of cathodic protection. It is extremely difficult under field conditions to measure or determine the potential at the metal/electrolyte phase boundaries of a cathodically polarized structure. Unfortunately, no method has yet been developed to satisfactorily determine such potentials in defects in the insulation coating of a structure by means of measurements made on the ground sur-

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

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

1. Wprowadzenie

Pomiary potencjałów są podstawowymi pomiarami wykonywanymi w praktyce ochrony katodowej [1]. Kryterium potencjałowe jest najpowszechniej stosowanym kryterium (określonym w stosownych normach) służącym do oceny skuteczności ochrony katodowej podziemnych konstrukcji metalowych:

$$E_p \leq E_{O_r} \quad (1)$$

gdzie: E_p – potencjał polaryzacyjny konstrukcji w defekcie powłoki izolacyjnej, E_{O_r} – potencjał ochrony.

Według norm potencjały ochrony są to potencjały na granicy faz pomiędzy metalową powierzchnią konstrukcji a środowiskiem elektrolitycznym, przy których szybkość korozji nie jest większa niż 10 $\mu\text{m}/\text{rok}$, i są one podawane bez tzw. składowej omowej. Odpowiednie obniżenie potencjałów, co najmniej do potencjałów ochronnych, wszystkich (odsłoniętych) powierzchni metalowych stykających się z elektrolitem glebowym jest niezbędne do osiągnięcia stanu skutecznej ochrony katodowej stalowej podziemnej konstrukcji (na przykład rurociągu) pokrytej powłoką izolacyjną z nieciągłościami (ubytkami, defektami). Pomiary pozwalające na ocenę spolaryzowania konstrukcji w defektach izolacji i innych miejscach bez powłoki izolacyjnej są konieczne, aby móc wnioskować o skuteczności ochrony katodowej. Jest niezmiernie trudno w warunkach terenowych zmierzyć lub wyznaczyć potencjał na granicach faz metal/elektrolit konstrukcji polaryzowanej katodowo. Niestety nie opracowano dotąd metody pozwalającej zadowalająco wyznaczać takie potencjały w defektach powłoki izolacyjnej konstrukcji za pomocą pomiarów wykonywanych na powierzchni ziemi. Rurociągi pokryte powłoka-

Marek Fiedorowicz – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej. Od 39 lat zajmuje się ochroną przeciwkorozyjną sieci gazowych – gazociągów i obiektów. Specjalizuje się m.in. w systemach ochrony przeciwkorozyjnej opartych na powłokach izolacyjnych o wysokim poziomie szczelności.

Marek Fiedorowicz – a graduate of the Faculty of Electrical Engineering at the Gdansk University of Technology. For 39 years involved in the corrosion protection of gas networks – gas pipelines and facilities. His areas of expertise include corrosion protection systems based on extra-tight insulation coatings.

■ Otrzymano / Received: 06.06.2023. Przyjęto / Accepted: 27.07.2023

face. Pipelines covered with coatings, whether bituminous or made of plastic (for example, polyethylene), have a natural tendency to be unevenly polarized, which complicates the performance of such measurements and the usage of cathodic protection.

Making measurements, as well as determining potentials at the phase boundary, is made difficult by:

- the inability to place the reference electrode, against which the potential measurement is made, as close as possible to the exposed metal surface in the defect of the insulation coating of the buried structure;
- the occurrence of voltage drops (so-called ohmic IR components) in the electrolytic environment, caused by various flowing electric currents, including the cathodic protection current of the structure [1].

What is the potential of a structure? Unfortunately, there is no consensus on this issue.

2. Definitions

In order to make the article easier to understand and to organize the basic information contained herein, the definitions of terms related to potentials have been listed. They are cited after the indicated standards:

- Electrode potential – the potential difference measured in an external circuit between an electrode and a reference electrode in contact in the same electrolyte (PN-EN ISO 8044:2002).
- Corrosion potential – the electrode potential in a given corrosion system (PN-EN ISO 8044:2002); the potential difference measured between the electrode and the reference electrode being in contact with the same electrolyte, in a given corrosion system (PN-EN ISO 8044:2002).
- Free corrosion potential, resting corrosion potential – the corrosion potential occurring in the absence of total (external) current flowing to or from the metal surface (PN-EN ISO 8044:2002).
- Potential of the structure – the potential difference between the surface of the metal structure and a specific reference electrode in contact with the electrolytic environment (for example ground, water). The electrode should be as close as possible to the surface of the structure, but without coming into contact with it (PN-E-05030-10:2004).
- Polarization potential – the existing potential of the polarized structure at the metal/environment interface, which is the sum of the corrosion potential and polarization potential (cathodic or anodic; PN-E-05030-10:2004). The term “corrosion potential” used in this definition is the free corrosion potential according to PN-EN ISO 8044:2002.
- Protective potential – the threshold value of the corrosion potential that must be reached to achieve a range of protective potentials (PN-EN ISO 8044:2002); the potential of a structure at which the progress of corrosion of a metal can be accepted (PN-EN 12954:2004).
- Cathodic polarization – a current flow-induced shift in the corrosion potential of a metal in the electro-negative direction (ST-IGG-0602:2009). The term polarization is also used to refer to any process in which an electric current flows between a metal and an electrolyte, resulting in a shift of the metal's potential in a negative (cathodic polarization) or positive (anodic polarization) direction.
- IR voltage drop (ohmic voltage drop) – the voltage in the electrolyte, such as in the ground, between the reference electrode and the metal of the structure, caused by the flow of any current, according to Ohm's law ($U = I \times R$; PN-EN 12954:2004).
- Potential without the IR component ($E_{IR \text{ free}}$) – the potential of a structure that does not contain an error due to the IR voltage

mi, czy to bitumicznymi, czy wykonanymi z tworzyw sztucznych (na przykład z polietylenu), charakteryzują się naturalną skłonnością do nierównomiernej polaryzacji, co komplikuje przeprowadzanie takich pomiarów oraz użytkowanie ochrony katodowej.

Wykonywanie pomiarów, jak również wyznaczanie potencjałów na granicy faz utrudniają:

- niemożność umieszczenia elektrody odniesienia, względem której wykonuje się pomiar potencjału, możliwie blisko odsoniętej metalowej powierzchni w defekcie powłoki izolacyjnej zakopanej konstrukcji;
- występowanie w środowisku elektrolitycznym spadków napięć (tzw. składowych omowych IR), wywołanych przez różne przepływające prądy elektryczne, w tym przez prąd ochrony katodowej konstrukcji [1].

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

2. Definicje

W celu ułatwienia odbioru treści artykułu oraz uporządkowania podstawowych informacji zestawiono definicje terminów dotyczących potencjałów. Przytoczono je za wskazanymi normami:

- Potencjał elektrodowy – różnica potencjałów mierzona w obwodzie zewnętrznym pomiędzy elektrodą i elektrodą odniesienia, będących w kontakcie w tym samym elektrolicie (PN-EN ISO 8044:2002).
- Potencjał korozyjny – potencjał elektrodowy w danym układzie korozyjnym (PN-EN ISO 8044:2002); różnica potencjałów mierzona pomiędzy elektrodą i elektrodą odniesienia, będącymi w kontakcie z tym samym elektrolitem, w danym układzie korozyjnym (PN-EN ISO 8044:2002).
- Swobodny potencjał korozyjny, spoczynkowy potencjał korozyjny – potencjał korozyjny występujący przy braku sumarycznego (zewnętrznego) prądu płynącego do lub od powierzchni metalu (PN-EN ISO 8044:2002).
- Potencjał konstrukcji – różnica potencjałów między powierzchnią metalowej konstrukcji a określoną elektrodą odniesienia stykającymi się ze środowiskiem elektrolitycznym (na przykład ziemią, wodą). Elektroda powinna być możliwie blisko powierzchni konstrukcji, ale bez styczności z nią (PN-E-05030-10:2004).
- Potencjał polaryzacyjny – istniejący na granicy faz metal/środowisko potencjał polaryzowanej konstrukcji stanowiący sumę potencjału korozyjnego i polaryzacji (katodowej lub anodowej; PN-E-05030-10:2004). Użyty w tej definicji termin „potencjał korozyjny” jest swobodnym potencjałem korozyjnym według PN-EN ISO 8044:2002.
- Potencjał ochrony – wartość progowa potencjału korozyjnego, którą należy osiągnąć, aby uzyskać zakres potencjałów ochronnych (PN-EN ISO 8044:2002); potencjał konstrukcji, przy którym postęp korozji metalu można zaakceptować (PN-EN 12954:2004).
- Polaryzacja katodowa – spowodowane przepływem prądu przesunięcie potencjału korozyjnego metalu w kierunku elektroujemnym (ST-IGG-0602:2009). Pojęcia polaryzacji używa się także w odniesieniu do każdego procesu, w którym prąd elektryczny przepływa pomiędzy metalem a elektrolitem, w wyniku czego następuje przesunięcie potencjału metalu w kierunku ujemnym (polaryzacja katodowa) lub dodatnim (polaryzacja anodowa).
- Spadek napięcia IR (omowy spadek napięcia) – napięcie w elektrolicie, na przykład w gruncie, pomiędzy elektrodą odniesienia a metalem konstrukcji, wywołane przepływem dowolnego prądu, zgodnie z prawem Ohma ($U = I \times R$; PN-EN 12954:2004).
- Potencjał bez składowej IR ($E_{IR \text{ free}}$) – potencjał konstrukcji niezawierający błędu wynikającego ze spadku napięcia IR , wywołanego przez prąd ochrony lub jakiś inny prąd (PN-EN 12954:2004).

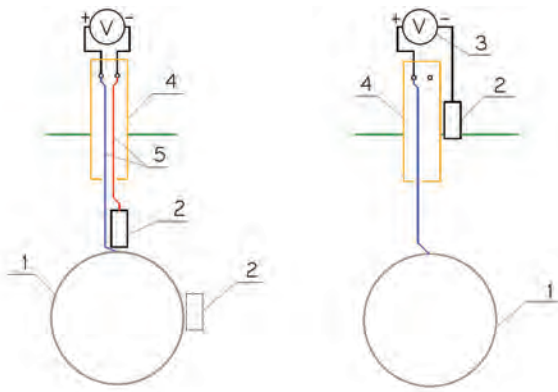


Fig. 1. Measurement of a potential (of an unknown type – the figure does not indicate which type of potential is measured): 1 – pipeline, 2 – reference electrode, buried permanently underground or a portable electrode on the surface, 3 – DC voltmeter, 4 – electrical measurement location post, 5 – electrical measurement point cables

Source: [1, p. 342].

Rys. 1. Pomiar potencjału (nieznanego rodzaju – z rysunku nie wynika, jaki typ potencjału jest mierzony) podziemnego rurociągu: 1 – rurociąg, 2 – elektroda odniesienia, stała zakopana lub przenośna ustawiona na powierzchni ziemi, 3 – woltmierz DC, 4 – słupki punktu pomiarów elektrycznych, 5 – kable punktu pomiarów elektrycznych

Źródło: [1, s. 342].

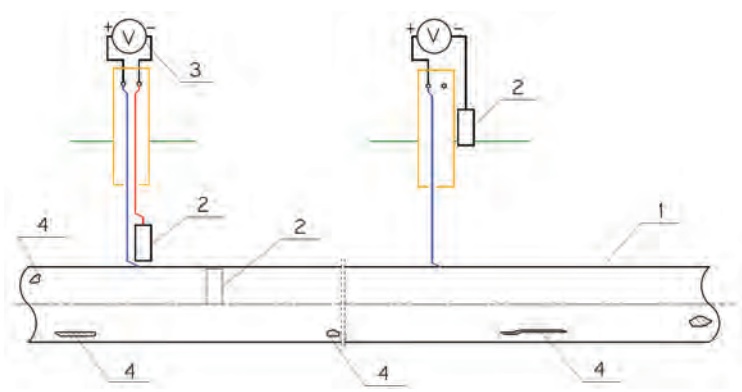


Fig. 2. Reference electrode buried in an insulated structure or a portable electrode positioned on the ground over the structure (away from defects in the insulation coating): 1 – pipeline, 2 – reference electrode, 3 – DC voltmeter, 4 – defects in the pipeline insulation coating

Source: [1, p. 342].

Rys. 2. Elektroda odniesienia, zakopana przy zaizolowanej konstrukcji lub przenośna ustawiona nad konstrukcją na powierzchni ziemi (prawie zawsze oddalona od defektów w powłoce izolacyjnej): 1 – rurociąg, 2 – elektroda odniesienia, 3 – woltmierz DC, 4 – defekty w powłoce izolacyjnej rurociągu

Źródło: [1, s. 342].

drop caused by the protective current or some other current (PN-EN 12954:2004).

- Instant off potential – the potential of the structure measured immediately after synchronous shutdown of all sources of cathodic protection current (PN-EN 12954:2004).
- On-potential – the potential of the structure measured when the cathodic protection current flows (PN-EN 12954:2004).
- Simulating electrode (sample) – a representative sample of metal used for quantitative evaluation of corrosion progress or effectiveness of applied cathodic protection (PN-EN 12954:2004).
- Coupon-off potential – the corrosion potential of the simulating electrode measured immediately after the interruption of the electrode's connection to the structure, or immediately after the synchronous interruption of the electrode's connection to the structure and the deactivation of the structure's cathodic polarization sources (ST-IGG-0602:2009).

In light of the above, potential is understood as the voltage between a metal structure and a reference electrode placed in an electrolytic environment. Depending on the condition of the structure, the location of the reference electrode, the conditions and the technique of performing the measurement, the measured voltage will indicate a different value (type of potential; Fig. 1).

3. On-potential

The electric current of cathodic polarization flowing into an underground metallic structure, for example through defects in the insulation coating, generates so-called flow electric fields in the space around the defects (in the ground). Around the structure (defects) in the ground, equipotential lines (spheres) can be distinguished. The closer they are to the structure (defect), the more negative the value of the electric potential they indicate. Under certain conditions, at a given location of the structure, the measured on-potential depends on the orientation of the reference electrode – i.e. on the electric potential of the ground where the reference electrode, namely on which equipotential line the reference electrode is located [1].

- Potencjał wyłączeniowy – potencjał konstrukcji zmierzony natychmiast po synchronicznym wyłączeniu wszystkich źródeł prądu ochrony katodowej (PN-EN 12954:2004).
- Potencjał załączeniowy – potencjał konstrukcji zmierzony, gdy płynie prąd ochrony katodowej (PN-EN 12954:2004).
- Elektroda symulująca (próbka) – reprezentatywna próbka metalu stosowana do ilościowej oceny postępu korozji lub skuteczności zastosowanej ochrony katodowej (PN-EN 12954:2004).
- Potencjał odłączeniowy – potencjał korozyjny elektrody symulującej mierzony natychmiast po przerwaniu połączenia elektrody z konstrukcją lub natychmiast po synchronicznym przerwaniu połączenia elektrody z konstrukcją i wyłączeniu źródeł polaryzacji katodowej konstrukcji (ST-IGG-0602:2009).

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

3. Potencjał załączeniowy

Wpływając do podziemnej metalowej konstrukcji, na przykład przez defekty w powłoce izolacyjnej, prąd elektryczny polaryzacji katodowej wytwarza w przestrzeni wokół defektów (w ziemi) tzw. przepływowo pola elektryczne. Wokół konstrukcji (defektów) w ziemi można wyodrębnić linie (sfery) ekwipotencjalne, przy czym im bliżej konstrukcji (defektu) się znajdują, tym bardziej ujemną wartość potencjału elektrycznego wyznaczają. W określonych warunkach, w danym miejscu konstrukcji, zmierzony potencjał załączeniowy zależy od ustawienia elektrody odniesienia – od potencjału elektrycznego ziemi w miejscu lokalizacji elektrody odniesienia, czyli od tego, na jakiej linii ekwipotencjalnej usytuowana jest elektroda odniesienia [1].

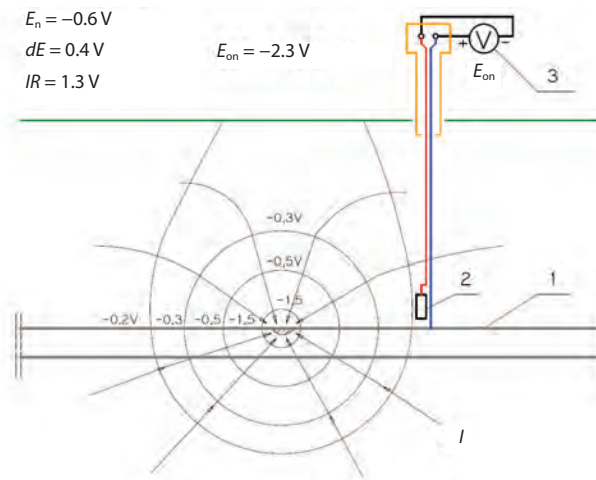


Fig. 3. Cathodic protection current flowing into the pipeline through a defect in the insulation coating: 1 – pipeline, 2 – reference electrode, 3 – DC voltmeter, I – cathodic polarization current, E_n – free corrosion potential, dE – cathodic polarization, E_{on} – on-potential in relation to a reference electrode 2

Source: [1, p. 342].

Rys. 3. Prąd ochrony katodowej wpływający do rurociągu przez defekt w powłoce izolacyjnej, wytwarzający przepływowo pole elektryczne: 1 – rurociąg, 2 – elektroda odniesienia, 3 – woltomierz DC, I – prąd polaryzacji katodowej, E_n – spoczynkowy potencjał korozyjny, dE – polaryzacja katodowa, E_{on} – potencjał załączeniowy mierzony względem elektrody odniesienia 2

Źródło: [1, s. 342].

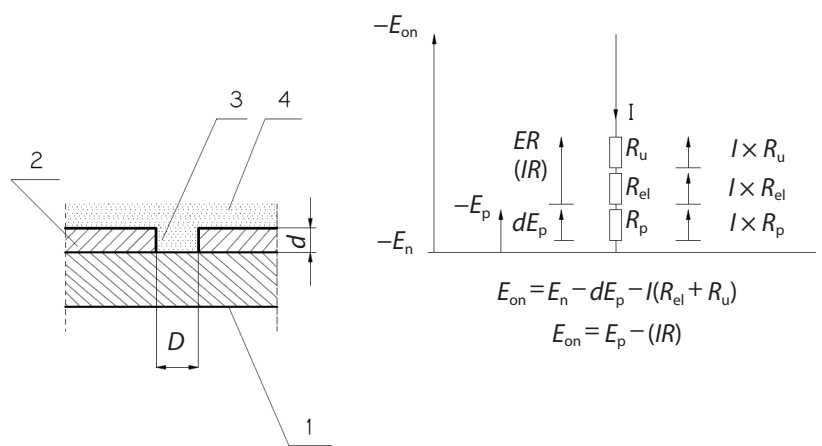


Fig. 4. Resistances and voltages associated with a defect in the insulation coating: 1 – metal wall of the structure, 2 – insulation coating of the structure, 3 – defect in a circle-shaped insulation coating, 4 – electrolyte, D – defect's diameter, d – thickness of the insulation coating, I – cathodic polarization current, E_n – free corrosion potential, R_p – polarization resistance, R_{el} – resistance of electrolyte in a defect, R_u – resistance of the structure's grounding through a defect, dE_p – cathodic polarization, E_p – polarized potential, E_{on} – on-potential in relation to a remote reference electrode, IR – ohmic potential drop IR (IR potential drop)

Source: [1, p. 342].

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

Źródło: [1, s. 342].

The voltage between two points in or on the ground caused by the flow of electric current is called the potential gradient in cathodic protection technology.

It does not follow from the definition of the on-potential that the IR component constitutes a characteristic feature thereof. In the case of insulated and cathodically polarized structures, the on-potential measured against a reference electrode, buried or positioned on the ground surface (in which case it is even stronger), always contains an ohmic IR voltage drop (Fig. 2–4). In some situations, however, the measured on-potential contains a negligibly small IR component. This is the case, for example, for structures without an insulation coating immersed in water with high electrical conductivity, when there are no extraneous electric fields and the reference electrode is located as close as possible to the surface of the structure – then $E_{on} \approx E_{IR\ free}$ [1].

The IR component will be smaller if, in the case of an insulated underground structure, the reference electrode is positioned over a defect in the insulation coating. However, even when the reference electrode is positioned at the ground surface exactly over the defect in the insulation coating, the measured value of the E_{on} potential can differ significantly from the E_p polarization potential, usually by several hundred millivolts [1].

The on-potential usually does not reflect the potential at the interface between the protected structure and the electrolyte (Fig. 2–4). This potential can be measured relative to a reference electrode situated at different locations [1].

The on-potential generally contains a significant value of the IR component, so it cannot be used directly without taking into account other parameters in assessments of the effectiveness of cathodic protection – it cannot be referred to protective potentials

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

Z definicji potencjału załączeniowego nie wynika, że charakterystyczna jest dla niego składowa IR . W wypadku konstrukcji pokrytych powłoką izolacyjną i polaryzowanych katodowo potencjał załączeniowy mierzony względem elektrody odniesienia, zakopanej lub ustawionej na powierzchni ziemi (wówczas jest to jeszcze bardziej wyraźne), zawsze zawiera omowy spadek napięcia IR (rys. 2–4). W niektórych sytuacjach zmierzony potencjał załączeniowy zawiera jednak pomijalnie małą składową IR . Dotyczy to na przykład konstrukcji bez powłoki izolacyjnej zanurzonych w wodzie o dużej przewodności elektrycznej, gdy nie występują obce pola elektryczne, a elektroda odniesienia usytuowana jest możliwie blisko powierzchni konstrukcji – wówczas $E_{on} \approx E_{IR\ free}$ [1].

Składowa IR będzie mniejsza, jeśli w wypadku zaizolowanej podziemnej konstrukcji elektroda odniesienia zostanie ustawiona nad defektem w powłoce izolacyjnej. Jednak nawet gdy elektroda odniesienia będzie ustawiona na powierzchni ziemi dokładnie nad defektem w powłoce izolacyjnej, mierzona wartość potencjału E_{on} może się znacznie różnić od potencjału polaryzacyjnego E_p , zwykle o kilkaset miliwoltów [1].

Potencjał załączeniowy zazwyczaj nie odzwierciedla potencjału na granicy faz pomiędzy konstrukcją chronioną a elektrolitem (rys. 2–4). Pomiar tego potencjału może być wykonywany względem elektrody odniesienia usytuowanej w różnych miejscach [1].

Potencjał załączeniowy zawiera na ogół znaczną wartość składowej IR , nie można go zatem bezpośrednio, nie uwzględniając innych parametrów, wykorzystywać w ocenach skuteczności ochrony katodowej – nie może być odnoszony do potencjałów ochrony,

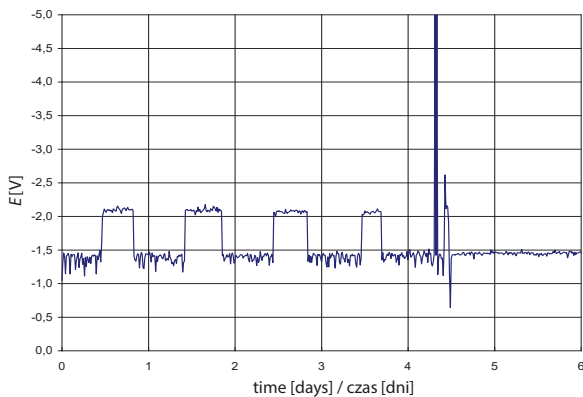


Fig. 5. Examples of changes of temporary/momentary E_{on} pipeline potentials caused by periodic groundings as a result of short-circuits in the spark gap located between the pipeline and grounding (pipeline in PE isolation of high quality; monitoring point placed 35 km away from the area of occurrence)

Source: [2, p. 304].

Rys. 5. Przykładowe zmiany chwilowych potencjałów E_{on} rurociągu spowodowane okresowymi doziemieniami wskutek zwarcia iskiernika włączonego pomiędzy rurociągiem a uziomem (gazociąg w izolacji PE dobrej jakości; punkt monitorowania oddalony o 35 km od miejsca zdarzenia)

Źródło: [2, s. 304].

that do not contain IR components. The IR component present in the on-potential, however, facilitates the monitoring of cathodic protection and the recognition of interference or emergency conditions.

The on-potential is used, among other things:

- as a determinant of the operation or non-operation of cathodic polarization;
- in the monitoring of cathodic protection;
- in indirect assessments of the effectiveness of cathodic protection, if detailed measurements have previously been made by a suitable method or an assessment of the effectiveness of protection in insulation defects has been carried out;
- in indirect assessments of the effectiveness of cathodic protection of pipelines with extra-tight insulation coatings;
- in studies of stray current impacts – corrosion hazards and protection effectiveness;
- in studies of the effects of AC currents – corrosion hazards and protection effectiveness.

On-potential measurements are carried out primarily to monitor the operation of cathodic protection, including via remote monitoring, and in areas of stray current influence. If, for example, the resting corrosion potential of a structure was -0.6 V relative to a sulfate-copper reference electrode, and the currently measured on-potential is -1.5 V, this means that the structure is cathodically polarized (assuming, of course, that no external anodic potential cone has appeared in the region where the measurement was made, for example).

If, over a number of years, the on-potential of a structure at a certain point was about -1.6 V, and during subsequent measurements a value of -1.1 V was measured in the field or remotely via a remote monitoring system, this may mean that a disruption of cathodic protection has occurred (for example, pipeline grounding due to an unknown cause, the formation of a large defect in the insulation coating, a failure of the cathodic polarization current source, a reduction in the polarization current due to an increase in the resistance of the anodic ground, etc.; Fig. 5).

If on-potential measurements are preceded by measurements of the effectiveness of cathodic protection carried out by a method appropriate to the conditions (interruption method, measurement and calculation method used in intensive measurements, or using

które nie zawierają składowych IR . składowa IR obecna w potencjale załączeniowym ułatwia jednak monitoring ochrony katodowej i rozpoznawanie stanów zakłóceń lub awaryjnych.

Potencjał załączeniowy wykorzystuje się m.in.:

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

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

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

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

W wypadku rurociągów w powłokach izolacyjnych o wysokim poziomie szczelności pomiary potencjałów E_{on} w połączeniu z pomiarami natężeń prądów pobieranych przez odcinki rurociągu lub rezystancji przejścia tych odcinków mogą (pośrednio) dostarczać informacji o spełnieniu bądź niespełnieniu kryteriów skutecznej ochrony katodowej rurociągu w defektach powłoki izolacyjnej na tych odcinkach. Zasady tej metody oceny skuteczności ochrony katodowej podano w załączniku F standardu ST-IGG-0602:2022 [3] oraz w publikacjach [4, 5]. Parametrem charakteryzującym jakość (stopień szczelności) powłoki izolacyjnej „po zasypianiu” jest m.in. rezystancja przejścia lub pobór prądu ochrony katodowej. W tabelach 1–3 przedstawiono dopuszczalne maksymalne pobory prądu i wymagane minimalne rezystancje przejścia dla pojedyn-

Table 1. Permissible (maximum) polarization / current draw and required minimum structure to soil resistance (coating resistance) R_{CO} provided that: required density of protection current $j_0 = 0.1 \text{ A/m}^2$, ground resistivity $\rho = 100 \Omega\text{m}$, anticorrosion coating thickness $d = 3 \text{ mm}$ for selected qualities of on-potentials E_{on} and protective potential E_0

Tabela 1. Dopuszczalne maksymalne pobory prądu polaryzacji / oraz wymagane minimalne rezystancje przejścia R_{CO} dla wybranych wartości potencjału załączeniowego E_{on} i potencjału ochrony E_0 przy założeniach, że: wymagane gęstości prądu polaryzacji $j_0 = 0,1 \text{ A/m}^2$, rezystywność gruntu $\rho = 100 \Omega\text{m}$, grubość powłoki antykorozyjnej $d = 3 \text{ mm}$

Parameter/ Wyszczególnienie	$E_0 = -0.85 \text{ V}$		$E_0 = -0.95 \text{ V}$	
	$E_{on} = -1.30 \text{ V}$	$E_{on} = -1.50 \text{ V}$	$E_{on} = -1.30 \text{ V}$	$E_{on} = -1.50 \text{ V}$
$I [\text{mA}]$	0.9	1.96	0.52	1.38
$R_{CO} [\Omega]$	500	332	671	399

simulating electrodes), during which measurements of the pipeline's on-potential were made, then on-potential measurements taken later can provide information about the fulfillment of the pipeline's cathodic protection criteria in defects in the insulation coating. If it was previously shown by appropriate methods that the criteria for cathodic protection in defects in the insulation coating were met and this condition was accompanied by an on-potential of E_{on} , and measurements taken later proved that the on-potential is not less negative than E_{on} , it can be assumed that the criteria for effective cathodic protection are still met in these insulation coating defects (and in smaller ones), assuming that they have not increased in size.

In the case of pipelines in extra-tight insulation coatings, measurements of E_{on} potentials in combination with measurements of the currents drawn through pipeline sections or the transition resistance of these sections can (indirectly) provide information on whether or not the criteria for effective cathodic protection of the pipeline are met in defects in the insulation coating on these sections. The principles of this method of assessing the effectiveness of cathodic protection are given in Appendix F of standard ST-IGG-0602:2022 [3] and in publications [4, 5]. The parameter characterizing the quality (degree of integrity) of the insulation coating "after backfilling" is, among other things, the transition resistance or current draw of the cathodic protection. Tables 1–3 show the permissible maximum current draws and required minimum transition resistances for a single insulation defect or an evaluated pipeline section and for different on-potentials needed to meet the conditions for effective cathodic protection (the E_0 protective potential was reached) in a single insulation defect or an evaluated pipeline section.

The use of the interruption method or other methods based on the interruption method for pipelines covered with extra-tight insulation coatings is generally not justified because of the excessive time constant of the cylindrical capacitor system that this type of pipeline and ground represent.

On-potential can be figuratively called the "driving force" of polarization. In order to obtain the protective potential of a metal structure in a defect in the insulation coating, it is necessary to provide a sufficiently electro-negative on-potential. The larger the defect, the more electro-negative should the on-potential (E_{on}) be:

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

where:

ρ – resistivity of the electrolytic environment [Ωm],

d – thickness of the insulation coating [m],

D – diameter of circular defect [m],

j_0 – required protective current density [A/m^2] resulting in the achievement of protective potential E_0 ,

E_0 – protection potential [V],

E_{on} – on-potential to ensure that the protective potential E_0 [V] is reached in a defect.

Table 2. Permissible (maximum) polarisation / current draw and required minimum structure to soil resistance (coating resistance) R_{CO} provided that: required density of protection current $j_0 = 0.1 \text{ A/m}^2$, ground resistivity $\rho = 70 \Omega\text{m}$, anticorrosion coating thickness $d = 3 \text{ mm}$ for selected qualities of on-potentials E_{on} and protective potential E_0

Tabela 2. Dopuszczalne maksymalne pobory prądu polaryzacji / oraz wymagane minimalne rezystancje przejścia R_{CO} dla wybranych wartości potencjału załączeniowego E_{on} i potencjału ochrony E_0 przy założeniach, że: wymagane gęstości prądu polaryzacji $j_0 = 0,1 \text{ A/m}^2$, rezystywność gruntu $\rho = 70 \Omega\text{m}$, grubość powłoki antykorozyjnej $d = 3 \text{ mm}$

Parameter/ Wyszczególnienie	$E_0 = -0.85 \text{ V}$		$E_0 = -0.95 \text{ V}$	
	$E_{on} = -1.30 \text{ V}$	$E_{on} = -1.50 \text{ V}$	$E_{on} = -1.30 \text{ V}$	$E_{on} = -1.50 \text{ V}$
$I [\text{mA}]$	1.91	4.11	1.125	2.91
$R_{CO} [\Omega]$	235.2	158.1	311.1	189.1

Table 3. Permissible (maximum) polarisation / current draw and required minimum structure to soil resistance (coating resistance) R_{CO} provided that: required density of protection current $j_0 = 0.1 \text{ A/m}^2$, ground resistivity $\rho = 30 \Omega\text{m}$, anticorrosion coating thickness $d = 3 \text{ mm}$ for selected qualities of on-potentials E_{on} and protective potential E_0

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

Parameter/ Wyszczególnienie	$E_0 = -0.95 \text{ V}$	
	$E_{on} = -1.30 \text{ V}$	$E_{on} = -1.50 \text{ V}$
$I [\text{mA}]$	11.2	28
$R_{CO} [\Omega]$	31.25	19.7

czego defektu izolacji bądź ocenianego odcinka rurociągu i dla różnych potencjałów załączeniowych, aby spełnione zostały warunki skutecznej ochrony katodowej (został osiągnięty potencjał ochrony E_0) w pojedynczym defekcie izolacji lub na ocenianym odcinku rurociągu.

Stosowanie metody wyłączeniowej lub innych metod opartych na metodzie wyłączeniowej w odniesieniu do rurociągów pokrytych powłokami izolującymi o wysokim poziomie szczelności z reguły nie jest zasadne z powodu zbyt dużej stałej czasowej układu kondensatora cylindrycznego, jaki stanowią tego typu rurociąg i ziemia.

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

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

gdzie:

ρ – rezystywność środowiska elektrolitycznego [Ωm],

d – grubość powłoki izolacyjnej [m],

D – średnica defektu kołowego [m],

j_0 – wymagana gęstość prądu ochrony [A/m^2] prowadząca do osiągnięcia potencjału ochrony E_0 ,

E_0 – potencjał ochrony [V],

E_{on} – potencjał załączeniowy zapewniający osiągnięcie w defekcie potencjału ochrony E_0 [V].

Zależność (2) dotyczy sytuacji, gdy na rurociąg nie oddziałują prądy błądzące. Z kolei jeśli w stanie bez ochrony katodowej na rurociągu występowałyby silne makroogniwa korozyjne, należałoby zastosować odpowiednio dużą gęstość prądu ochrony katodowej, aby osiągnąć właściwy potencjał załączeniowy, zapewniający w tych warunkach

Relationship (2) applies if the pipeline is not affected by stray currents. On the other hand, if strong corrosion macro-cells were present on the pipeline in a condition without cathodic protection, it would be necessary to apply a sufficiently high current density of cathodic protection to achieve the right on-potential to ensure effective protection under these conditions (the right density of resultant polarization currents in insulation defects taking into account, among other things, the need to compensate for the anodic currents of corrosion macro-cells).

In relationship (2) and in the values calculated from this relationship (Table 4) and Fig. 4, it is assumed that the same electrolyte (with the same resistivity) is present in the insulation defect as in its surroundings. Meanwhile, as a result of cathodic polarization (increase in pH), the resistivity of the electrolyte in the defect and adjacent to the defect decreases. Cathodic deposits with insulating properties can also be produced in and on the defect, increasing the resistivity.

4. On-potential vs. DC stray current effects

If stray currents are affecting the pipeline being tested, it may be, and most often is, necessary to carry out measurements over longer periods using recording measuring instruments to determine the extent and nature of changes in pipeline potentials and changes in simulating electrode currents and the length of time the cathodic protection criteria remained unfulfilled, as well as the possible flow of current from the pipeline into the electrolytic environment.

According to the new PN-EN ISO 21857:2022 [6] standard, reference values should be determined for cathodically protected structures: simulating electrode currents or on-potentials at which potential criteria for the effectiveness of cathodic protection are met during periods when stray currents are not present (for example, at night when there is no traffic on electric traction). The average changes in simulating electrode currents or on-potentials in relation to these reference values are evaluated, according to criteria given in the standard, which specifies several approaches.

Determining the correct reference values is crucial. In general, these are not arbitrary values accompanying a condition in which there is no stray current interaction. They are the minimum values at which the criteria for effective cathodic protection are met when stray currents are not present. For example, if the on-potential for effective cathodic protection of a pipeline during the period when no stray currents are present is -1.3 V in relation to the CSE, and the cathodic protection is carried out in such a way that during the period when no stray currents are present the on-potential is -1.5 V (as this potential ensures effective protection of this pipeline under the conditions of stray currents), then the reference value is -1.3 V.

Information appendix A of PN-EN ISO 21857:2022 [6] contains a table deriving from PN-EN 50162:2006 [7], specifying the maximum permissible periods during which the requirements for the reference values of the protection currents measured at the simulating electrodes do not have to be met. The data given in the table appear to be controversial, particularly with regard to the condition in which the current flows out of the simulating electrode. It has been pointed out that these values are based on practical experience and that their use in assessments when the IR free potentials are significantly more negative than the protection potentials (by 250 mV, for example) may result in an overestimation of the corrosion risk. Other assessment criteria are also given in the standard [6].

In all cases, the effects of stray currents are considered acceptable if the potential of the structure without an IR component, $E_{IR\ free}$ is within the limits of the protective potentials: $E_{IR\ free} \leq E_0$ (which means that $E_{on} \leq E_{on,ref}$). It is not absolutely necessary to ful-

Table 4. Necessary "on-potentials" according to relationship (2) ensuring effective cathodic protection – protective potential $E_0 = -0.85$ V – in insulation defects of various diameters D and coating thickness $d = 2$ mm in the ground with resistivity $\rho = 100$ Ω m; protective current density was assumed at $j_0 = 100$ mA/m²

Tabela 4. Potencjały załączeniowe wymagane w celu zapewnienia skutecznej ochrony katodowej – potencjału ochrony katodowej $E_0 = -0,85$ V – w defektach izolacji o różnych średnicach D , o grubości powłoki $d = 2$ mm, w gruncie o rezystywności $\rho = 100$ Ω m; założono gęstość prądu ochrony $j_0 = 100$ mA/m²

Insulation defect diameter D [m]/ Średnica defektu izolacji D [m]	Required on-potential E_{on} [V] in relation to the CSE/ Wymagany potencjał załączeniowy E_{on} [V] wzgl. CSE
0.0128	-0.93
0.03	-1
0.1	-1.27
0.2	-1.67

skuteczną ochronę (odpowiednią gęstość wypadkowych prądów polaryzacji w defektach izolacji z uwzględnieniem m.in. konieczności kompensacji anodowych prądów makroogniw korozyjnych).

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

4. Potencjał załączeniowy a oddziaływania prądów błędnych DC

Jeśli na badany gazociąg oddziałują prądy błędne, może zachodzić, i najczęściej zachodzi, konieczność przeprowadzania pomiarów w dłuższych okresach z zastosowaniem rejestrujących przyrządów pomiarowych w celu określenia zakresu i charakteru zmian potencjałów rurociągu oraz zmian prądów elektrod symulujących i czasu, przez jaki kryteria ochrony katodowej pozostawały niespełnione, a także ewentualnego wypływu prądu z gazociągu do środowiska elektrolitycznego.

Zgodnie z nową PN-EN ISO 21857:2022 [6] dla konstrukcji chrońnych katodowo powinny zostać wyznaczone wartości referencyjne: prądy elektrod symulujących lub potencjały załączeniowe, przy których w okresach nieoddziaływania prądów błędnych (na przykład w godzinach nocnych, kiedy nie ma ruchu na trakcji elektrycznej) spełnione są potencjałowe kryteria skuteczności ochrony katodowej. Ocenia się średnie zmiany prądów elektrod symulujących lub potencjałów załączeniowych w stosunku do tych wartości referencyjnych, według kryteriów podanych w normie. Określono w niej kilka sposobów postępowania.

Wyznaczenie prawidłowych wartości referencyjnych jest kluczowe. Generalnie nie są to dowolne wartości towarzyszące stanowi, w którym nie dochodzi do oddziaływań prądów błędnych. Są to minimalne wartości, przy których zostają spełnione kryteria skutecznej ochrony katodowej w sytuacji, kiedy prądy błędne nie występują. Jeśli na przykład potencjałem załączeniowym zapewniającym skuteczną ochronę katodową pewnego rurociągu w okresie nieoddziaływania prądów błędnych jest $-1,3$ V wzgl. CSE, a ochrona katodowa prowadzona jest w taki sposób, że w okresie, w którym nie oddziałują prądy błędne, potencjał załączeniowy wynosi $-1,5$ V (gdyż taki potencjał zapewnia skuteczną ochronę tego rurociągu w warunkach oddziaływania prądów błędnych), to wartością referencyjną jest $-1,3$ V.

W załączniku informacyjnym A normy PN-EN ISO 21857:2022 [6] znajduje się znana z PN-EN 50162:2006 [7] tabela zawierająca

Table 5. Permissible periods during which reference protective current values of simulating electrodes do not meet requirements, depending on the level of underperformance according to PN-EN ISO 21857:2022 and PN-EN 50162:2006

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

Current value in relation to the reference protective current value of the simulating electrode [%]/ Natężenie prądu w stosunku do natężenia referencyjnego prądu ochrony elektrody symulującej [%]	Maximum permissible period/ Maksymalny dopuszczalny okres występowania	
	„the worst hour” [%]/ „najgorsza godzina” [%]	in seconds/ w sekundach
>70	unlimited/ nieograniczony	unlimited/ nieograniczony
<70	40	1440
<60	20	720
<50	10	360
<40	5	180
<30	2	72
<20	1	36
<10	0.5	18
<0 (outgoing current)/ <0 (prąd wypływający)	0.1	3.6

Source: on the basis of [6, 7].

Źródło: opracowanie własne na podstawie [6, 7].

fill this condition, but if it is, the risk of corrosion caused by stray currents is certainly not present. The $E_{IR\ free}$ potential can be measured, for example, using simulating electrodes.

In a situation of interaction between variables, when the maximum anodic interaction period $T_{a,max}$ is no longer than 250 s, the average on-potential (over 24 h) $E_{on,avg}$ should be equal to or more negative than the difference of the on-potential reference $E_{on,ref}$ and the average anodic deviation of the on-potential $\Delta E_{a,avg}$:

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

In relationships (3) and (4), the anodic deviations $\Delta E_{a,avg}$ and $\Delta E_{a,max}$ are the average and maximum deviations from the reference potential $E_{on,ref}$ in the electropositive direction, respectively.

For long-lasting interactions of an anodic nature, the on-potential E_{on} should be equal to or more negative than the difference of the $E_{on,ref}$ reference on-potential and the $\Delta E_{a,max}$ maximum anodic deviation of the on-potential [8]:

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

In standard PN-EN ISO 21857:2022 [6] a universal criterion is also given, based on the Q ratio:

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

The interactions are considered acceptable if:

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

where $T_{a,max}$ is the maximum (longest) period of continuous anodic influence in seconds.

The standard recommends that when areas with strong cathodic (in relation to the pipeline) stray current influences are identified on the pipeline, manifested by a mean shift of the on-potential in the $\Delta E_{c,avg}$ electro-negative direction:

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

other areas on the pipeline should be identified where these cathodic influences will be accompanied by anodic influences.

The use of simulating electrodes may be necessary in the study of stray current influences. Corrosion methods, especially resistance corosimetry, may be advisable.

For pipelines with extra-tight insulation coatings, it must be taken into account that the connection of a simulation electrode

maksymalne dopuszczalne okresy, w których wymogi dotyczące referencyjnych wartości natężenia prądów ochrony zmierzonych na elektrodach symulujących mogą nie być spełniane. Dane podane w tabeli wydają się być kontrowersyjne, szczególnie odnośnie do stanu, w którym prąd wypływa z elektrody symulującej. Zaznaczono, że wartości te wynikają z praktycznego doświadczenia oraz że ich wykorzystywanie w ocenach, gdy potencjały wolne od IR są znacznie bardziej ujemne niż potencjały ochrony (na przykład o 250 mV), może skutkować przeszacowaniem ryzyka korozji. W normie [6] podano także inne kryteria oceny.

W każdym przypadku oddziaływania prądów błędzących uznaje się za dopuszczalne, jeżeli potencjał konstrukcji bez składowej IR , $E_{IR\ free}$ mieści się w granicach

potencjałów ochronnych: $E_{IR\ free} \leq E_O$ (co jest równoznaczne z tym, że $E_{on} \leq E_{on,ref}$). Spełnienie tego warunku nie jest bezwzględnie konieczne, ale jeśli ma miejsce, to z pewnością zagrożenie korozją powodowaną przez prądy błędzące nie występuje. Potencjał $E_{IR\ free}$ można mierzyć na przykład za pomocą elektrod symulujących.

W sytuacji oddziaływań zmiennych, gdy maksymalny okres oddziaływań anodowych $T_{a,max}$ nie jest dłuższy niż 250 s, średni potencjał załączeniowy (w ciągu 24 h) $E_{on,avg}$ powinien być równy różnicy załączeniowego potencjału referencyjnego $E_{on,ref}$ i średniego anodowego odchylenia potencjału załączeniowego $\Delta E_{a,avg}$ lub bardziej ujemny od tej wartości:

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

W zależnościach (3) i (4) odchylenia anodowe $\Delta E_{a,avg}$ i $\Delta E_{a,max}$ są odpowiednio średnim i maksymalnym odchyleniem od potencjału referencyjnego $E_{on,ref}$ w kierunku elektrododatnim.

W wypadku długotrwałych oddziaływań o charakterze anodowym potencjał załączeniowy E_{on} powinien być równy różnicy załączeniowego potencjału referencyjnego $E_{on,ref}$ i maksymalnego anodowego odchylenia potencjału załączeniowego $\Delta E_{a,max}$ lub bardziej ujemny od tej wartości [8]:

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

W normie PN-EN ISO 21857:2022 [6] podano także uniwersalne kryterium, oparte na współczynniku ratio Q:

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

Oddziaływania uznaje się za dopuszczalne, jeśli:

$$Q \geq 0,004 \text{ s}^{-1} \cdot T_{a,max} \quad (6)$$

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

Norma zaleca, aby w sytuacji rozpoznania na rurociągu miejsc z silnymi katodowymi (w stosunku do rurociągu) oddziaływaniami prądów błędzących, objawiającymi się średnim przesunięciem potencjału załączeniowego w kierunku elektroujemnym $\Delta E_{c,avg}$:

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

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

or a corrosimetric electrode to the pipeline may change the conditions for stray currents and the results obtained may not be reliable.

If a tight insulation coating is applied and maintained at the crossing of the gas pipeline with traction and in the adjacent sections, measurements at this crossing using a simulating electrode will allow determination of whether there will be a corrosion risk in the insulation defect, if any.

If a tight insulation coating is the only effective means of protection and the formation of a defect would lead to the emergence of a corrosion risk (despite the cathodic protection), for example at junctions where there are strong cathodic interactions on the rails (and strong anodic interactions on the pipeline at the same time) of stray currents, it is necessary to periodically test the insulation on such a section to confirm the coating's tightness.

5. On-potential and AC effects

5.1. Introductory notes

As recently as the 1980s, it was assumed that alternating current did not pose a real corrosion risk to underground steel structures (it was claimed that alternating current caused a metal loss of 1% of that caused by an equivalent direct current – with the same rms value).

It is now recognized that alternating current flowing between a steel underground pipeline and the ground can cause significant corrosion damage, particularly in the case of cathodically protected pipelines, and this has been confirmed in practice. A major change in the findings on the corrosive effects of AC occurred after a pipeline failure in Germany in 1988, which resulted from a perforation caused by 16.7 Hz traction AC current.

The critical parameter in AC-induced corrosion is primarily, but not exclusively, the density of AC current flowing between the steel structure and the electrolytic environment (through a defect in the insulation coating).

Underground steel pipelines can be subjected to AC effects. Sources of impact include overhead or underground AC power lines and AC traction systems. Under national conditions, the main source of impacts are overhead high and extra-high voltage (HV/NV) lines.

AC exposures may have a short-term or long-term character. Long-term AC exposures can cause corrosion at discontinuities in the pipeline insulation coating as a result of the AC current flowing between the steel wall and the soil electrolyte. Unprotected pipelines as well as (or even primarily) cathodically protected pipelines may be at risk from corrosion caused by AC. Short-lived AC effects occurring during fault (short-circuit) conditions on power lines can create an electrocution hazard, cause damage to insulation coatings and insulating joints, and can also increase the explosion hazard in aboveground gas facilities.

5.2. Factors influencing the extent of AC effects on a pipeline

As a result of the inductive action of the HV/EHV transmission lines, an AC electromotive force is induced in the pipeline. As a result, an alternating current flows between the pipeline and

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

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

Jeśli na skrzyżowaniu gazociągu z trakcją i na przyległych odcinkach zastosowana i utrzymywana jest szczelna powłoka izolacyjna, to wykonanie pomiarów na tym skrzyżowaniu z zastosowaniem elektrody symulującej pozwoli ustalić, czy w ewentualnym defekcie izolacji, jeśli taki powstanie, będzie występować zagrożenie korozyjne.

Jeżeli szczelna powłoka izolacyjna jest jedynym skutecznym środkiem ochrony i powstanie defektu doprowadziłoby do pojawienia się zagrożenia korozyjnego (pomimo ochrony katodowej), na przykład na skrzyżowaniach, na których na szynach występują silne oddziaływania katodowe (a na rurociągu jednocześnie – silne oddziaływania anodowe) prądów błędzących, to niezbędne jest okresowe badanie izolacji na takim odcinku w celu potwierdzenia szczelności powłoki.

5. Potencjał załączeniowy a oddziaływania AC

5.1. Uwagi wstępne

Jeszcze w latach 80. przyjmowano, że prąd przemienny nie stanowi realnego zagrożenia korozyjnego dla podziemnych konstrukcji stalowych (twierdzono, że prąd przemienny powoduje powstawanie ubytków metalu na poziomie 1% ubytków, do których dochodzi na skutek działania równoważnego prądu stałego – o tej samej wartości skutecznej).

Obecnie uznaje się, że prąd przemienny przepływający pomiędzy stalowym podziemnym rurociągiem a ziemią może powodować istotne uszkodzenia korozyjne, szczególnie w wypadku rurociągów objętych ochroną katodową, i zostało to potwierdzone w praktyce. Istotna zmiana w zakresie ustaleń na temat korozyjnego oddziaływania prądu przemiennego nastąpiła po awarii gazociągu w Niemczech w 1988 r., do której doszło w wyniku perforacji spowodowanej przez trakcyjny prąd przemienny o częstotliwości 16,7 Hz.

Parametrem krytycznym w korozji wywołanej przez prąd przemienny jest przede wszystkim, ale nie tylko, gęstość prądu AC przepływającego pomiędzy konstrukcją stalową a środowiskiem elektrolitycznym (przez defekt w powłoce izolacyjnej).

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

Oddziaływania prądu przemiennego mogą mieć charakter krótkookresowy lub długookresowy. Długookresowe oddziaływanie prądu przemiennego może powodować korozję w miejscach nieszczelności powłoki izolacyjnej rurociągu w wyniku przepływu prądu przemiennego pomiędzy stalową ścianką a elektrolitem glebowym. Korozją wywołaną przez prąd przemienny mogą być zagrożone rurociągi niechronione, a także (a nawet przede wszystkim) chronione katodowo. Krótkookresowe oddziaływania prądu przemiennego występujące w stanach zakłóceń (zwarcio-tych) linii energetycznych mogą stwarzać niebezpieczeństwo porażenia prądem elektrycznym, powodować uszkodzenia powłok izolacyjnych i złączy izolujących, mogą również zwiększać zagrożenie wybuchowe w naziemnych obiektach gazowniczych.

5.2. Czynniki wpływające na wielkość oddziaływań prądu przemiennego na rurociągu

W wyniku indukcyjnego oddziaływania linii przesyłowych WN/NN w rurociągu indukuje się przemiennoprądowa siła elektro-

the ground through defects in the insulation coating and an alternating voltage $U_{a.c.}$ is produced (as a result of this flow). The extent of alternating current effects on the pipeline – the alternating voltage between the pipeline and the ground, the density of the alternating current flowing between the pipeline and the environment through defects in the insulation coating – depend primarily on:

- the length of the section where the pipeline and the HV/EHV line are brought closer together;
- distance between the pipeline and the HV/EHV line;
- current in the conductors of the HV/EHV line;
- configuration of phase conductors and protective conductors on HV/EHV lines;
- type, thickness and quality of the insulation coating of the pipeline, size and distribution of defects in the coating;
- distribution of resistivity of the soil in which the pipeline is laid.

The electromotive forces induced in the pipeline due to the impact of an HV/EHV line and the AC voltage distribution between the pipeline and the ground can be determined by field measurements and estimated by calculation methods. Calculation methods can be applied to planned and existing pipelines.

5.3. AC corrosion mechanism, risk of corrosion caused by alternating current

The mechanism of AC-induced corrosion of a cathodically protected steel structure was found to be as follows:

- As a result of the cathodic polarization in the underground coating defect of the structure on and near the surface of the steel wall, the environment becomes strongly alkaline.
- During the anodic half-cycle of the applied AC voltage, a passive layer is formed in the alkaline environment as a result of the resultant current outflow.
- During the cathodic half-cycle of the applied AC voltage, the inflowing current into the structure reduces the passive layer to magnetite and iron hydroxide, for example $Fe(OH)_2$.
- In each subsequent cycle, a new passive layer is formed, which is reduced to magnetite and iron hydroxide, i.e. the loss of steel increases and the layer of iron corrosion products grows.

Corrosion products “move away” from the metal surface (are pushed outwards) and cause the insulation coating to detach.

Alkalization of the environment on the metal surface (under the influence of cathodic protection) and “transport” processes reduce its resistivity in the surrounding area, which also leads to an increase in AC density.

The risk of AC corrosion depends primarily on the density of the AC current flowing between the pipeline and the environment through defects in the insulation coating. AC corrosion does not occur if the AC current density flowing between the exposed pipeline wall and the ground is less than the critical density.

The most significant factors affecting AC corrosion include:

- the alternating voltage between the pipeline and the ground,
- the alternating current density flowing between the metal and the environment,
- cathodic polarization,
- extent of defects in the insulation coating,
- resistivity and other properties (chemical composition) of the ground.

5.4. Overview of AC corrosion risk criteria

In a publication edited by W. v. Baeckmann, W. Schwenk and W. Prinz [9], it is stated that the critical AC current density above

toryczna. W rezultacie pomiędzy rurociągiem a ziemią przepływa prąd przemienny przez defekty powłoki izolacyjnej i powstaje (w wyniku tego przepływu) napięcie przemiennie $U_{a.c.}$. Wielkości oddziaływań prądu przemiennego na rurociąg – napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią, gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a środowiskiem przez defekty w powłoce izolacyjnej – zależą przede wszystkim od:

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

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

5.3. Mechanizm korozji AC, zagrożenie korozją powodowaną przez prąd przemienny

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

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

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

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

Ryzyko korozji AC zależy przede wszystkim od gęstości prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a środowiskiem przez defekty w powłoce izolacyjnej. Korozja powodowana przez prąd przemienny nie zachodzi, jeśli gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy odsłoniętą ścianką rurociągu a ziemią jest mniejsza od gęstości krytycznej.

Najistotniejszymi czynnikami mającymi wpływ na zjawisko korozji AC są:

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

5.4. Przegląd kryteriów zagrożenia korozją AC

W publikacji pod redakcją W. v. Baeckmanna, W. Schwenka i W. Prinza [9] można przeczytać, że krytyczna gęstość prądu AC,

which the risk of AC corrosion occurs is 20 A/m^2 . S. Goidanich, L. Lazzari and M. Ormellese [10], on the other hand, reported that, under certain conditions, at an AC current density of 10 A/m^2 , the corrosion rate is almost twice as high as the free corrosion rate (without AC influence); at AC densities above 30 A/m^2 , the increase in corrosion rate can be considered unacceptable.

R. A. Gummow, R. G. Wakelin and S. M. Segall [11] found that the corrosion rate increases with an AC current density greater than 20 A/m^2 and becomes significant at AC current densities greater than 100 A/m^2 , regardless of the extent of the cathodic polarization current density.

M. Yunovich and N. G. Thompson [12] confirmed this criterion (an AC current density of 20 A/m^2 causes accelerated corrosion). They also reported that the cathodic protection criterion of a 100 mV corrosion potential shift in the electro-negative direction was found to be effective at AC current densities below 20 A/m^2 .

R. A. Gummow, in a paper [12] prepared for the largest (no longer existing) organisation of pipeline operators (CEPA), indicates that for cathodically protected pipelines the critical AC current density is a value of 20 A/m^2 , and presents the following criteria for the probability of AC corrosion depending on the $J_{a.c.}$ AC current density:

- $J_{a.c.} \leq 20 \text{ A/m}^2$ – low probability of AC corrosion,
- $20 \text{ A/m}^2 < J_{a.c.} < 100 \text{ A/m}^2$ – unpredictable probability of AC corrosion,
- $J_{a.c.} > 100 \text{ A/m}^2$ – AC corrosion can be expected.

He formulated a practical guideline that the risk of AC corrosion should be investigated if the AC voltage between the pipeline and the ground, expressed in mV, is numerically greater than the resistivity of the soil at the depth of the pipeline, expressed in Ωcm : $U_{a.c.} [\text{mV}] > \rho [\Omega\text{cm}]$, because then the AC current density in a 1 cm^2 insulation defect will be greater than 20 A/m^2 . This principle can also be described using values expressed in V and Ωm : $U_{a.c.} [\text{V}] > 0.1\rho [\Omega\text{m}]$ (1st criterion).

In PN-EN ISO 18086:2021-06 [14], two situations are considered in the context of AC corrosion risk:

- In the case of a “low” (weakly negative) on-potential, a fairly high alternating voltage between pipeline and the ground (up to 15 V) is permissible.
- In the case of a “high” (strongly negative) potential, the AC voltage must be reduced to the lowest possible levels.

The wording of the standard indicates that the limit on-potential between strongly negative and weakly negative is -1.2 V relative to the CSE.

According to the standard's provisions, in the first step the AC voltage between the pipeline and the ground should be brought below 15 V (this is the average over a representative period of for example 24 h). In the second step, effective mitigation of AC corrosion is possible if the cathodic protection potentials according to ISO 15589-1:2015 are reached at the same time and if any of the following conditions are met:

- the $J_{a.c.}$ alternating current density will be kept below 30 A/m^2 (this is the average density measured on a 1 cm^2 simulating electrode over a representative period, for example 24 h; 2nd criterion);
- the average DC cathodic protection current density $J_{d.c.}$ will be kept below 1 A/m^2 when the AC current density $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$ (these are the average values measured on a simulating electrode with an area of 1 cm^2 over a representative period, for example 24 h; 3rd criterion);
- a ratio (quotient) of AC current density to DC protective current density of less than 5 will be ensured: $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 5$ over a representative period, for example 24 h; the standard recommends that this ratio should be less than 3 to minimize the risk of AC corrosion (4th criterion).

powyżej której występuje zagrożenie korozją AC, wynosi 20 A/m^2 . S. Goidanich, L. Lazzari i M. Ormellese [10] podali z kolei, że w pewnych warunkach przy gęstości prądu AC na poziomie 10 A/m^2 szybkość korozji jest prawie dwukrotnie wyższa niż szybkość korozji swobodnej (bez oddziaływań AC); przy gęstościach prądu przemiennego wynoszących powyżej 30 A/m^2 wzrost szybkości korozji można uznać za niedopuszczalny.

R. A. Gummow, R. G. Wakelin i S. M. Segall [11] stwierdzili, że szybkość korozji wzrasta wraz ze wzrostem większej niż 20 A/m^2 gęstości prądu przemiennego i staje się istotna przy gęstościach prądu przemiennego większych niż 100 A/m^2 , niezależnie od wielkości gęstości prądu polaryzacji katodowej.

M. Yunovich i N. G. Thompson [12] potwierdzili to kryterium (prąd AC o gęstości 20 A/m^2 powoduje przyspieszoną korozję). Podali także, że stwierdzono, iż przy gęstościach prądu AC poniżej 20 A/m^2 kryterium ochrony katodowej w postaci przesunięcia potencjału korozyjnego o 100 mV w kierunku elektroujemnym jest skuteczne.

R. A. Gummow w opracowaniu [12], przygotowanym dla największej (nieistniejącej już) organizacji zrzeszającej operatorów rurociągów (CEPA), wskazuje, że w wypadku rurociągów chronionych katodowo gęstością krytyczną prądu AC jest wartość 20 A/m^2 , i przedstawia następujące kryteria prawdopodobieństwa wystąpienia korozji AC w zależności od gęstości prądu przemiennego $J_{a.c.}$:

- $J_{a.c.} \leq 20 \text{ A/m}^2$ – niskie prawdopodobieństwo korozji AC,
- $20 \text{ A/m}^2 < J_{a.c.} < 100 \text{ A/m}^2$ – nieprzewidywalne prawdopodobieństwo korozji AC,
- $J_{a.c.} > 100 \text{ A/m}^2$ – można oczekiwać wystąpienia korozji AC.

Sformułował praktyczną wskazówkę, zgodnie z którą ryzyko korozji AC należy zbadać, jeśli napięcie AC pomiędzy rurociągiem a ziemią, wyrażone w mV, jest liczbowo większe niż rezystywność gruntu na głębokości ułożenia rurociągu, wyrażona w Ωcm : $U_{a.c.} [\text{mV}] > \rho [\Omega\text{cm}]$, gdyż wówczas gęstość prądu przemiennego w defekcie izolacji o powierzchni 1 cm^2 będzie większa od 20 A/m^2 . Inaczej tę zasadę można opisać, stosując wielkości wyrażone w V i Ωm : $U_{a.c.} [\text{V}] > 0,1\rho [\Omega\text{m}]$ (1. kryterium).

W PN-EN ISO 18086:2021-06 [14] w kontekście zagrożenia korozją AC uwzględniane są dwie sytuacje:

- W wypadku „niskiego” (słabo ujemnego) potencjału połączeniowego dopuszczalne jest dość duże napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią (do 15 V).
- W wypadku „wysokiego” (mocno ujemnego) potencjału wymagane jest obniżenie napięcia AC do najniższych możliwych poziomów.

Z treści normy wynika, że graniczną wartością potencjału połączeniowego między mocno ujemnym a słabo ujemnym jest $-1,2 \text{ V}$ wzgl. CSE.

Zgodnie z zapisami normy w pierwszym kroku napięcie AC pomiędzy rurociągiem a ziemią powinno zostać sprowadzone poniżej 15 V (chodzi o średnią z reprezentatywnego okresu, na przykład 24 h). W drugim kroku skuteczne złagodzenie korozji AC jest możliwe, jeśli jednocześnie osiągnięte zostaną potencjały ochronne ochrony katodowej według ISO 15589-1:2015 oraz jeżeli zostanie spełniony któryś z warunków:

- gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.}$ będzie utrzymywana poniżej 30 A/m^2 (chodzi o średnią gęstość mierzoną na elektrodzie symulującej o powierzchni 1 cm^2 w reprezentatywnym okresie, na przykład 24 h; 2. kryterium);
- średnia gęstości prądu ochrony katodowej DC $J_{d.c.}$ będzie utrzymywana poniżej 1 A/m^2 , gdy gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$ (chodzi o wartości średnie mierzone na elektrodzie symulującej o powierzchni 1 cm^2 w reprezentatywnym okresie, na przykład 24 h; 3. kryterium);
- zapewniony będzie stosunek (iloraz) gęstości prądu AC do gęstości prądu ochrony DC poniżej 5: $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 5$ w reprezentatywnym okresie, na przykład 24 h; norma zaleca, aby ten stosu-

Information appendix E of PN-EN ISO 18086:2021-06 [14] provides separate criteria for two situations. In the case of a strongly negative on-potential, one of the following three non-hazard criteria can be used (in order of importance):

1. $U_{a.c.}/(|E_{on}| - 1.2) < 3$ (5th criterion),
2. $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ (6th criterion),
3. $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 3$, if $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$ (7th criterion).

With regard to 4th and 7th criteria it is important not to cause cathodic detachment of the insulation coatings and the negative effects of hydrogen evolution. If cathodic protection is carried out at an on-potential of $E_{on} \approx -1.5 \text{ V}$, then according to 5th criterion the average (in time) voltage $U_{a.c.}$ between the pipeline and the ground should not be greater than just 0.9 V.

In the case of a weakly negative on-potential, one of the following criteria can be used (in order of importance):

1. average AC voltage $U_{a.c.} < 15 \text{ V}$ when the average on-potential E_{on} is less negative than -1.2 V or CSE (8th criterion),
2. average alternating current density $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ (9th criterion),
3. average current density of cathodic protection $J_{d.c.} < 1 \text{ A/m}^2$, if $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$ (10th criterion).

The criteria presented in the standard for values measured on simulating electrodes with a surface area of 1 cm^2 are valid for existing pipeline systems with HV/EHV lines. For planned pipelines or HV/EHV lines, it is necessary to consider values relating to hypothetical defects in 1 cm^2 insulation coatings.

As part of DVGW research projects [15, 16], a mathematical model of AC corrosion was developed. The results of the work were included in the German GW 28 regulations [17, 18] and have been discussed in numerous publications [8, 19, 20]. The AC current density criterion was used as a starting point: $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ (11th criterion).

Technical guidance GW 28 [17] provides the following current criteria:

- AC corrosion rate is negligible if the average AC current density is less than 30 A/m^2 : $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ or the protective current density is less than 1 A/m^2 : $J_{d.c.} < 1 \text{ A/m}^2$ (12th criterion);
- AC corrosion can also be avoided at higher AC densities; this is possible when the current density of the cathodic protection is at least one third of the AC density: $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 3$ (13th criterion).

Potential criteria have also been established:

- when the on-potential $E_{on} > -1.2 \text{ V}$, the alternating voltage between the pipeline and the ground should not be greater than 15 V : $U_{a.c.} < 15 \text{ V}$ (14th criterion);
- when $E_{on} < -1.2 \text{ V}$, the on-potential should be sufficiently negative: $E_{on} \leq -U_{a.c.}/3 - 1.2$ (15th criterion).

Conclusions on the developed mathematical model for AC corrosion are included in information appendix A of supplement GW 28 [18].

With the proposed mathematical model, it was confirmed that defects in insulation with an area of 1 cm^2 are representative of AC corrosion evaluations. AC corrosion in the initial period can progress very rapidly, at a rate even faster than 100 mm/year . As the metal surface area in the defect (pitting) increases, its rate decreases significantly and over time the process virtually ceases. AC corrosion disappears when the pitting depth reaches a certain maximum value (if the pipeline wall thickness is large enough). The model takes into account: protection current density, AC current density (which decreases as the pitting increases), AC voltage, E_{on} on-potential, $E_{IR \text{ free}}$ potential, pH (which increases with cathodic polarization), environmental resistivity (which decreases as pH increases), surface area of the defect or pitting (which increases as the corrosion progresses), resistance to flow through the defect (which decreases as the resistivity of the environment decreases), diameter and depth of the pitting, and insulation thickness.

As the protective current density increases, so does the pH, while the defect transition resistance decreases, causing an increase in

nek był mniejszy niż 3, żeby zminimalizować ryzyko korozji AC (4. kryterium).

W załączniku informacyjnym E normy PN-EN ISO 18086:2021-06 [14] podano odrębne kryteria dla dwóch sytuacji. W wypadku mocno ujemnego potencjału załączeniowego można stosować jedno spośród trzech poniższych kryteriów braku zagrożenia (w kolejności od najistotniejszego):

1. $U_{a.c.}/(|E_{on}| - 1.2) < 3$ (5. kryterium),
2. $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ (6. kryterium),
3. $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 3$, jeśli $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$ (7. kryterium).

Jeśli chodzi o 4. i 7. kryterium, istotne jest, aby nie doprowadzać do katodowych odspojień powłok izolacyjnych i negatywnych skutków wydzielania wodoru. Jeśli ochrona katodowa prowadzona jest przy potencjale załączeniowym $E_{on} \approx -1.5 \text{ V}$, to zgodnie z 5. kryterium średnie (w czasie) napięcie $U_{a.c.}$ pomiędzy rurociągiem a ziemią nie powinno być większe niż zaledwie 0,9 V.

W wypadku słabo ujemnego potencjału załączeniowego można stosować jedno z poniższych kryteriów (w kolejności od najważniejszego):

- średnie napięcie przemiennie $U_{a.c.} < 15 \text{ V}$, gdy średni potencjał załączeniowy E_{on} jest mniej ujemny niż $-1,2 \text{ V}$ wzgl. CSE (8. kryterium),
- średnia gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ (9. kryterium),
- średnia gęstość prądu ochrony katodowej $J_{d.c.} < 1 \text{ A/m}^2$, gdy $J_{a.c.} > 30 \text{ A/m}^2$ (10. kryterium).

Przedstawione w normie kryteria dotyczące wielkości mierzonych na elektrodach symulujących o powierzchni 1 cm^2 dotyczą istniejących układów rurociąg–linie WN/NN. W wypadku projektowanych rurociągów lub linii WN/NN niezbędne jest rozpatrywanie wielkości dotyczących hipotetycznych defektów w powłokach izolacyjnych o powierzchni 1 cm^2 .

W ramach projektów badawczych DVGW [15, 16] został opracowany matematyczny model korozji przemiennoprądowej. Wyniki prac zostały uwzględnione w niemieckich przepisach GW 28 [17, 18] i zostały omówione w wielu publikacjach [8, 19, 20]. Jako wyjściowe zastosowano kryterium gęstości prądu przemiennego: $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ (11. kryterium).

W wytycznych technicznych GW 28 [17] podano kryteria prądowe:

- szybkość korozji AC jest znikoma, jeśli średnia gęstość prądu przemiennego jest mniejsza niż 30 A/m^2 : $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$ lub gęstość prądu ochrony jest mniejsza niż 1 A/m^2 : $J_{d.c.} < 1 \text{ A/m}^2$ (12. kryterium);
- korozji AC można także uniknąć przy większych gęstościach prądu przemiennego; jest to możliwe, gdy gęstość prądu ochrony katodowej stanowi co najmniej jedną trzecią gęstości prądu przemiennego: $J_{a.c.}/J_{d.c.} < 3$ (13. kryterium).

Ustalono także kryteria potencjałowe:

- gdy potencjał załączeniowy $E_{on} > -1,2 \text{ V}$, napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią nie powinno być większe niż 15 V : $U_{a.c.} < 15 \text{ V}$ (14. kryterium);
- gdy $E_{on} < -1,2 \text{ V}$, potencjał załączeniowy powinien być odpowiednio ujemny: $E_{on} \leq -U_{a.c.}/3 - 1,2$ (15. kryterium).

Wnioski dotyczące wypracowanego matematycznego modelu korozji AC zawarto w załączniku informacyjnym A do suplementu GW 28 [18].

Proponowanym modelem matematycznym potwierdzono, że reprezentatywne dla ocen korozji AC są defekty w izolacji o powierzchni 1 cm^2 . Korozja AC w początkowym okresie może postępować bardzo szybko, w szybszym nawet tempie niż 100 mm/rok . W miarę zwiększania się powierzchni metalowej w defekcie (wżerze) jej szybkość znacznie maleje i z czasem proces praktycznie ustaje. Korozja AC zanika, kiedy głębokość wżeru osiąga określoną maksymalną wartość (jeśli grubość ścianki rurociągu jest dostatecznie duża). W modelu uwzględniono: gęstość prądu ochrony, gęstość prądu przemiennego (która zmniejsza się w miarę zwiększania się wżeru),

the AC current density at a given AC voltage value. On the basis of laboratory and field tests, the typical relationship (quotient) of the maximum pitting depth L_{max} to the insulation defect diameter d_k was determined: $d_k: L_{max} / d_k \approx 0.2$. In reality, however, these ratios seem to vary and depend, among other things, on the magnitude of the AC voltage $U_{a.c.}$ between the pipeline and the ground. The publications [8, 18–20] present graphs showing the maximum permissible (average) AC voltage $U_{a.c.}$ as a function of the on-potential E_{on} in the case of permissible pits of different depths (for example, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm and 7 mm) – always for defects in the insulation coating with an area of 1 cm^2 . The quotients are then between 0.1 and 0.7.

The pitting initially develops in depth, up to a certain depth (L_{max}), and when this is reached, the metal is “picked up” from under the coating (sub-coating corrosion around the edge of the insulation defect) – the diameter of the pitting becomes larger than the diameter of the insulation defect. As a result, the pitting area increases and the AC density decreases.

There is a relationship between the maximum pitting depth and the area at which corrosion practically stops. For an allowable maximum depth of 2 mm, this area is approximately 1 cm^2 .

In the case of small defects in the coating, AC corrosion is generally unavoidable, since AC corrosion would have to be reduced to practically 0 to prevent it. With small insulation defects, smaller pitting depths can be expected than with large defects.

When the risk of AC corrosion is assessed and protections are designed on the basis of defects with a surface area of 1 cm^2 , it is thus accepted that corrosion losses of several millimeters (e.g. 2 mm) may occur in defects with smaller surfaces.

The illustrative Fig. 6–8, compiled on the basis of material in the publications [8, 18–20], show the permissible alternating voltages between the pipeline and the ground as a function of the on-potential and for selected soil resistivities, not causing AC corrosion and causing pitting with depths of 3 mm and 5 mm, in defects with areas of 1 cm^2 in selected insulation coatings. Complete diagrams (calculated from the mathematical corrosion model for a larger number of resistivities and permissible pitting depths) can be found in the indicated source materials.

Comparison of the graphs in Fig. 7 and 8 shows that the same critical AC voltages in soils with the same resistivity values will result in pitting 3 mm deep for a polyolefin coated pipeline (PE, 3LPE, 3LPP) and 5 mm deep for a pipeline with a much thinner FBE coating.

The increase in pH as a result of cathodic polarization leads to a reduction in the resistivity of the adjacent environment, which naturally leads to an increase in AC current density. The mathematical model developed takes these phenomena into account. As a result, the calculated maximum voltage $U_{a.c.}$ under the given conditions (also at a given soil resistivity), taking into account the current criterion $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$, which does not cause a corrosion risk, is considerably lower than the voltage calculated without taking the resistivity reduction into account – it is about 52% of the voltage value obtained without taking this phenomenon (resistivity reduction) into consideration. As a result, when calculating the maximum permissible voltage $U_{a.c.}$, one obtains results similar to, or more rigorous than, those obtained using the 20 A/m^2 criterion, but without taking into account the reduction in resistivity due to the increase in pH. For example: using the 20 A/m^2 criterion for insulation defects in soil with a resistivity of $20 \Omega\text{m}$, a critical AC voltage of approx. 1.8 V is obtained. According to a mathematical model of AC corrosion, which takes into account a criterion of 30 A/m^2 and a reduction in resistivity due to an increase in pH, for an on-potential of -1.5 V and the same output resistivity of $20 \Omega\text{m}$, the critical AC voltage is only about 1 V (Fig. 6).

napięcie przemiennie, potencjał załączeniowy E_{on} , potencjał $E_{IR_{free}}$ pH (które rośnie pod wpływem polaryzacji katodowej), rezystywność środowiska (która zmniejsza się wraz ze wzrostem pH), powierzchnię defektu lub wżeru (która rośnie w miarę postępu korozji), rezystancję rozprywu przez defekt (która maleje w wyniku zmniejszenia rezystywności środowiska), średnicę i głębokość wżeru, grubość izolacji.

Wraz ze wzrostem gęstości prądu ochrony wzrasta pH i maleje rezystancja przejścia przez defekt, powodując zwiększenie gęstości prądu przemiennego przy danej wartości napięcia przemiennego. Na podstawie badań laboratoryjnych i terenowych wyznaczono typową relację (iloraz) maksymalnej głębokości wżeru L_{max} do średnicy defektu izolacji d_k : $L_{max} / d_k \approx 0,2$. W rzeczywistości jednak, jak się wydaje, te stosunki są różne i zależą m.in. od wielkości napięcia przemiennego $U_{a.c.}$ pomiędzy rurociągiem a ziemią. W publikacjach [8, 18–20] przedstawiono wykresy obrazujące maksymalne dopuszczalne (średnie) napięcie przemiennie $U_{a.c.}$ w funkcji potencjału załączeniowego E_{on} w wypadku dopuszczenia wżerów o różnych głębokościach (na przykład 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm i 7 mm) – zawsze dla defektów w powłoce izolacyjnej o powierzchni 1 cm^2 . Wówczas ilorazy te wynoszą od 0,1 do 0,7.

Wżer początkowo rozwija się w głąb, do pewnej głębokości (L_{max}), a po jej osiągnięciu następuje „podbieranie” metalu spod powłoki (korozja podpowłokowa w rejonie krawędzi defektu izolacji) – średnica wżeru staje się większa niż średnica defektu izolacji. W rezultacie zwiększa się powierzchnia wżeru i zmniejsza się gęstość prądu przemiennego.

Występuje związek pomiędzy maksymalną głębokością wżeru a powierzchnią, przy której korozja praktycznie ustaje. Dla dopuszczalnej maksymalnej głębokości 2 mm powierzchnia ta wynosi ok. 1 cm^2 .

W wypadku małych defektów w powłoce na ogół nie można uniknąć korozji AC, gdyż aby jej zapobiec, należałoby obniżyć napięcie AC praktycznie do 0. Przy małych defektach izolacji można spodziewać się mniejszych głębokości wżerów niż w dużych defektach.

Gdy ocenia się zagrożenie korozją AC i projektuje zabezpieczenia, przyjmując za podstawę defekty o powierzchni 1 cm^2 , dopuszcza się tym samym, że w defektach o mniejszych powierzchniach mogą wystąpić ubytki korozyjne sięgające kilku milimetrów (na przykład 2 mm).

Na poglądowych rys. 6–8, opracowanych na podstawie materiałów zawartych w publikacjach [8, 18–20], przedstawiono dopuszczalne napięcia przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią w zależności od potencjału załączeniowego i dla wybranych rezystywności gruntu niepowodujące korozji AC i powodujące wżery o głębokościach 3 mm i 5 mm w defektach o powierzchniach 1 cm^2 w wybranych powłokach izolacyjnych. Kompletnie wykresy (wyliczone na podstawie matematycznego modelu korozji dla większej liczby rezystywności i dopuszczalnych głębokości wżerów) znajdują się we wskazanych materiałach źródłowych.

Z porównania wykresów przedstawionych na rys. 7 i 8 wynika, że w wypadku rurociągu w powłoce poliolefinowej (PE, 3LPE, 3LPP) te same krytyczne napięcia AC w gruntach o tych samych wartościach rezystywności spowodują powstanie wżerów o głębokości 3 mm, a w wypadku rurociągu w dużo cieńszej powłoce FBE – wżerów o głębokości 5 mm.

Wzrost pH w wyniku polaryzacji katodowej prowadzi do zmniejszenia rezystywności przyległego środowiska, co oczywiście prowadzi do wzrostu gęstości prądu AC. W wypracowanym modelu matematycznym uwzględnia się te zjawiska. W związku z tym obliczone maksymalne napięcie $U_{a.c.}$ w danych warunkach (także przy określonej rezystywności gruntu), z uwzględnieniem kryterium prądowego $J_{a.c.} < 30 \text{ A/m}^2$, niepowodujące zagrożenia korozyjnego jest znacznie mniejsze niż napięcie obliczone z pominięciem zmniejszania rezystywności – wynosi ok. 52% wartości napięcia uzyskanej bez uwzględnienia tego zjawiska (zmniejszania rezystywności). W rezultacie, obliczając maksymalne dopuszczalne napięcie $U_{a.c.}$, uzyskuje się wyniki zbli-

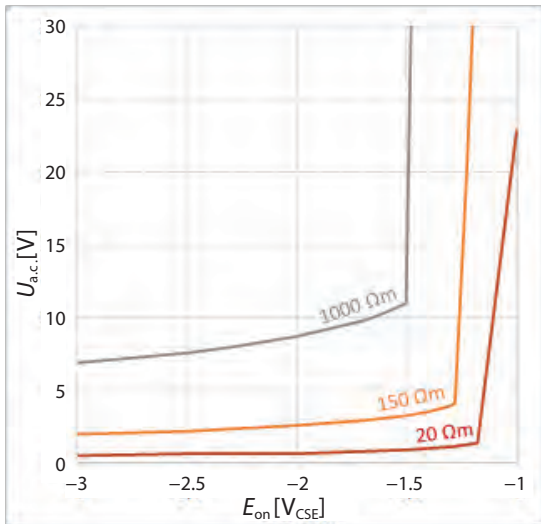


Fig. 6. Permissible alternating voltages between a pipeline and the ground depending on "on-potential" for selected ground resistivity which do not cause AC corrosion in defects of 1 cm^2 area, calculated based on the mathematical corrosion model

Source: illustrative own drawing on the basis of [19].

Rys. 6. Dopuszczalne napięcia przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią w zależności od potencjału załączeniowego i dla wybranych rezystywności gruntu niepowodujące korozji AC w defektach o powierzchni 1 cm^2 , wyliczone na podstawie matematycznego modelu korozji

Źródło: opracowanie własne na podstawie [19].

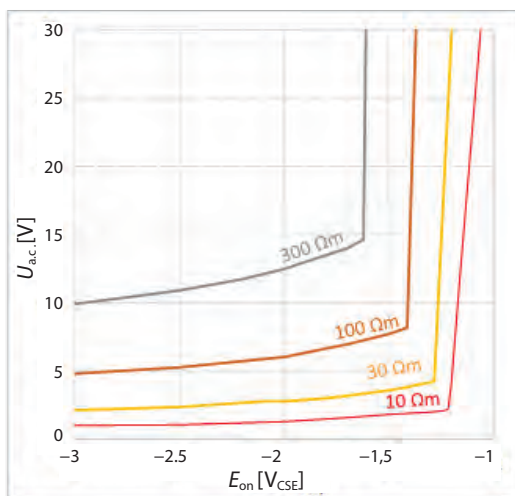


Fig. 7. Critical voltages between polyolefin coated pipeline and the ground depending on "on-potential" for selected ground resistances, causing 3 mm deep pits in insulation defects of 1 cm^2 in area

Source: illustrative own drawing on the basis of [18].

Rys. 7. Krytyczne napięcia przemiennie pomiędzy rurociągiem w powłoce poliolefinowej a ziemią w zależności od potencjału załączeniowego i dla wybranych rezystywności gruntu powodujące wżery o głębokości 3 mm w defektach izolacji o powierzchni 1 cm^2

Źródło: opracowanie własne na podstawie [18].

The maximum alternating voltage (in volts) can be estimated according to the simplified relationship $U_{a.c. \max} \approx 0,1\rho$, where ρ is the resistivity of the soil in Ωm (1st criterion).

It can be seen from the above-mentioned relations that, by applying increasingly negative on-potentials, the pipeline can be protected against increasingly higher AC voltages according to the principle $E_{on} \leq -U_{a.c.}/3 - 1.2$. For an AC voltage of, for example, 6 V, an on-potential of approx. -3.2 V in relation to

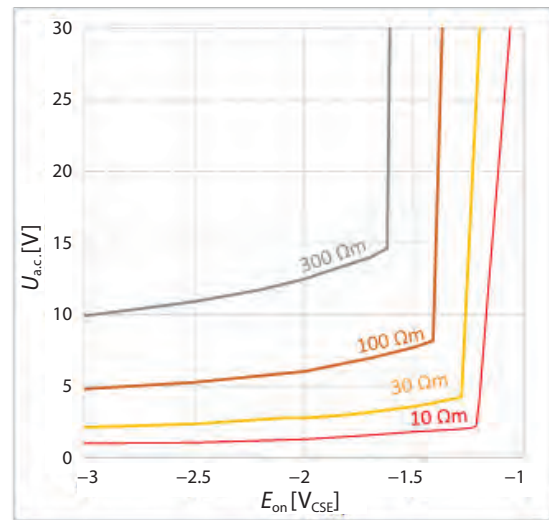


Fig. 8. Critical voltages between FBE coated pipeline and the ground depending on "on-potential" for selected ground resistances, causing 5 mm deep pits in insulation defects of 1 cm^2 in area

Source: illustrative own drawing on the basis of [8, 20].

Rys. 8. Krytyczne napięcia przemiennie pomiędzy rurociągiem w powłoce FBE a ziemią w zależności od potencjału załączeniowego i dla wybranych rezystywności gruntu powodujące wżery o głębokości 5 mm w defektach izolacji o powierzchni 1 cm^2

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8, 20].

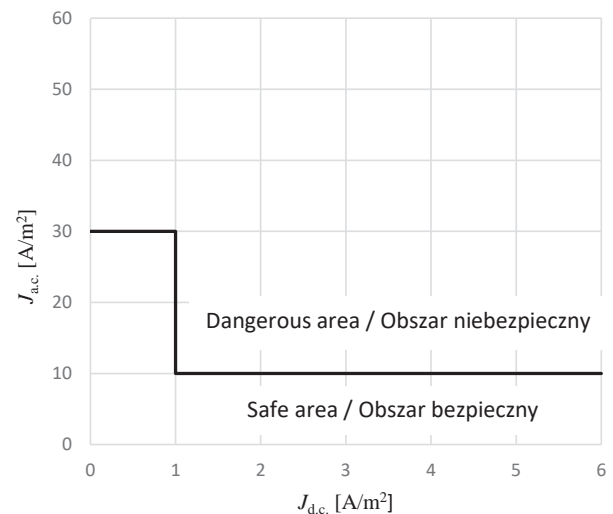


Fig. 9. Permissible $J_{a.c.}$ alternating current density depending on the cathodic protection current density $J_{d.c.}$

Source: illustrative own drawing based on [21].

Rys. 9. Dopuszczalna gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.}$ w zależności od gęstości prądu ochrony katodowej $J_{d.c.}$

Źródło: opracowanie własne na podstawie [21].

zone do tych, które otrzymuje się z zastosowaniem kryterium 20 A/m^2 , ale bez uwzględnienia zmniejszenia rezystywności wskutek wzrostu pH, lub bardziej rygorystyczne. Przykładowo: stosując kryterium 20 A/m^2 dla defektów izolacji w gruncie o rezystywności $20 \Omega\text{m}$, uzyskuje się krytyczne napięcie AC na poziomie ok. $1,8 \text{ V}$. Zgodnie z modelem matematycznym korozji AC, w którym uwzględnia się kryterium 30 A/m^2 i zmniejszenie rezystywności wskutek wzrostu pH, dla potencjału

the CSE would have to be applied. The use of excessive cathodic polarization, however, leads to negative effects such as detachment of insulation coatings and hydrogenation of the structure.

Conducting "mild" cathodic protection, with on-potentials less negative than -1.2 V, to protect the pipeline against AC corrosion (up to 15 V) most often does not provide effective protection against other types of corrosion.

By using AC corrosion protection by treatments that reduce the voltage $U_{a.c.}$ between the pipeline and the ground, set to protect insulation defects (simulating electrodes) with areas of 1 cm^2 , it is in principle allowed that pitting of a few millimeters in depth can occur in smaller defects. Furthermore, it is noted in German regulations and studies that there is a tendency to tolerate pitting caused by AC corrosion if this does not lead to perforation. Any pitting, however, weakens the pipe and can be the cause of the initiation of stress corrosion cracking (SCC).

Views are presented (based on test results) that AC corrosion can occur at AC current densities of less than 20 A/m^2 . M. Ormellese, A. Brenna and L. Lazzari [21] propose, for example, that for DC current densities higher than 1 A/m^2 the AC current density should not be higher than 10 A/m^2 .

Considering the described AC corrosion mechanism and the data shown in Fig. 6–9, it can be concluded that cathodic protection increases the susceptibility of the pipeline to AC corrosion. Until recently, it was considered that for steel structures (it is now known that only those not covered by cathodic protection), AC did not represent a real corrosion risk (it was assumed that the metal loss caused by AC was 1% of that caused by an equivalent DC current – of the same rms value). In fact, alternating current under cathodic protection conditions can pose a real corrosion risk. With weak cathodic protection ($E_{on} > -1.2 \text{ V}$), or when no protection is present at all, the acceptable $U_{a.c.}$ voltages between the structure and the ground can be considerable. However, such an on-potential in general does not ensure effective cathodic protection – at this value of on-potential, cathodic protection could be effective if the insulation level of the pipeline is very high: in places the insulation coating would even have to be completely free of defects. In the case of typical cathodic polarization ($E_{on} < -1.2 \text{ V}$), on the other hand, various rigorous criteria have to be met to avoid AC corrosion, and the permissible $U_{a.c.}$ voltages are small.

5.5. Recommended criterion for gas pipelines

When considering: the negative effects of excessive cathodic polarization and the consequences of incomplete cathodic protection, the desirability of limiting AC corrosion in insulation coating defects with areas smaller than 1 cm^2 , the difficulty of measuring the ground resistivity "seen" by defects in the insulation coating and the fact that the contact area between the simulating electrode and the electrolyte is unknown (they are covered with deposits), as well as taking into account literature reports, national practice – i.e. that AC corrosion has been found at AC current densities well below 30 A/m^2 – and the simplicity of the criterion, it ap-

łączeniowego $-1,5 \text{ V}$ i takiej samej rezystywności wyjściowej $20 \text{ }\Omega\text{m}$ krytyczne napięcie AC wynosi zaledwie ok. 1 V (rys. 6).

Maksymalne napięcie przemiennie (w voltach) można oszacować według uproszczonej zależności $U_{a.c. \text{ max}} \approx 0,1\rho$, gdzie ρ to rezystywność gruntu w Ωm (1. kryterium).

Z omówionych zależności wynika, że stosując coraz bardziej ujemne potencjały łączeniowe, można przeciwkorozyjnie zabezpieczyć rurociąg przed coraz większymi napięciami przemiennymi, zgodnie z zasadą $E_{on} \leq -U_{a.c.}/3-1,2$. W wypadku napięcia przemiennego na poziomie na przykład 6 V należałoby zastosować potencjał łączeniowy wynoszący ok. $-3,2 \text{ V}$ wzgl. CSE. Stosowanie nadmiernej polaryzacji katodowej prowadzi jednak do negatywnych skutków, takich jak odspojenia powłok izolacyjnych i nawodorowanie konstrukcji.

Prowadzenie „łagodnej” ochrony katodowej, przy potencjałach łączeniowych mniej ujemnych niż $-1,2 \text{ V}$, w celu przeciwkorozyjnego zabezpieczenia rurociągu przed napięciami przemiennymi (do 15 V) najczęściej nie zapewnia skutecznej ochrony przed innymi rodzajami korozji.

Stosując ochronę przed korozją AC przez zabiegi zmniejszające napięcie $U_{a.c.}$ pomiędzy rurociągiem a ziemią, ochronę nastawioną na zabezpieczenie defektów izolacji (elektrod symulujących) o powierzchniach 1 cm^2 , w zasadzie dopuszcza się, że w mniejszych defektach mogą powstać wżery o głębokości kilku milimetrów. Co więcej, zauważa się w przepisach i opracowaniach niemieckich tendencję do tolerowania wżerów spowodowanych przez korozję AC, jeśli nie prowadzi to do perforacji. Każdy wżer osłabia jednak rury i może być przyczyną zainicjowania naprężeniowych pęknięć korozyjnych (SCC).

Przedstawia się poglądy (oparte na wynikach badań), że korozja AC może zachodzić przy gęstościach prądu AC wynoszących poniżej 20 A/m^2 . M. Ormellese, A. Brenna i L. Lazzari [21] proponują na przykład, aby przy wartościach gęstości prądu DC wyższych od 1 A/m^2 gęstość prądu AC nie była większa niż 10 A/m^2 .

Biorąc pod uwagę opisany mechanizm korozji AC oraz dane przedstawione na rys. 6–9, można stwierdzić, że ochrona katodowa zwiększa podatność rurociągu na korozję AC. Do niedawna uznawano, że w odniesieniu do konstrukcji stalowych (obecnie wiadomo już, że tylko tych nieobjętych ochroną katodową) prąd przemienny nie stanowi realnego zagrożenia korozyjnego (przyjmowano, że ubytki metalu spowodowane przez prąd przemienny stanowią wartość 1% ubytków, do których dochodzi w wyniku oddziaływania równoważnego prądu stałego – o tej samej wartości skutecznej). W rzeczywistości prąd przemienny w warunkach ochrony katodowej może stanowić realne zagrożenie korozyjne. Przy słabej ochronie katodowej ($E_{on} > -1,2 \text{ V}$), a także gdy w ogóle jej nie ma, akceptowalne napięcia $U_{a.c.}$ pomiędzy konstrukcją a ziemią mogą być znaczne. Taki potencjał łączeniowy w ogólności nie zapewnia jednak skutecznej ochrony katodowej – przy takiej wartości potencjału łączeniowego ochrona katodowa mogłaby być skuteczna, jeśli poziom izolacji rurociągu byłby bardzo wysoki: miejscami powłoka izolacyjna musiałaby być wręcz zupełnie pozbawiona defektów. W wypadku typowej polaryzacji katodowej ($E_{on} < -1,2 \text{ V}$) należy natomiast spełnić różne rygorystyczne kryteria, aby uniknąć korozji AC, a dopuszczalne napięcia $U_{a.c.}$ są niewielkie.

5.5. Kryterium zalecane w wypadku gazociągów

Gdy uwzględnimy: negatywne skutki nadmiernej polaryzacji katodowej i konsekwencje niepełnej ochrony katodowej, celowość ograniczenia korozji AC w defektach powłoki izolacyjnej o powierzchniach mniejszych niż 1 cm^2 , trudności w pomiarach rezystywności gruntu „widzianych” przez defekty w powłoce izolacyjnej i to, że nie wiadomo, jaka jest powierzchnia styku elektrody symulującej z elektrolitem (pokrywają się osadami), a także weźmie pod uwagę doniesienia literaturowe, praktykę krajową – stwierdzono korozję AC przy gęstościach prądu AC dużo niższych niż 30 A/m^2 – oraz prostotę kryterium, celowe okazuje się stosowanie następują-

pears expedient to use the following criteria (ignoring the effect of decreasing environmental resistivity due to increasing pH):

- The risk of AC corrosion is very high if the AC current density $J_{a.c.} \geq 100 \text{ A/m}^2$.
- There is no or very little risk of AC corrosion if the AC current density $J_{a.c.} < 20 \text{ A/m}^2$.

A simplified relationship (which, among other things, does not take into account the thickness of the coating in the defect) defining the current density in an insulation defect with an area of 1 cm^2 can be expressed by the equation:

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

where:

$U_{a.c.}$ – alternating voltage between pipeline and the ground (reference) [V],

ρ – substitute resistivity of the environment “as seen” by a defect in the insulation coating [Ωm],

$J_{a.c.}$ – current density in an insulation defect with an area of 1 cm^2 [A/m^2].

In turn, the permissible voltage $U_{a.c.}$, depending on the resistivity of the soil ρ , such that in an insulation defect with an area of 1 cm^2 the current density $J_{a.c.}$ is not greater than 20 A/m^2 , can be determined, on the basis of equation (7), from the simplified relationship:

$$U_{a.c.} < 0.0885 \cdot \rho. \quad (8)$$

Relationship (8) is similar to the 1st criterion: permissible $U_{a.c.} [\text{V}] < 0.1\rho [\Omega\text{m}]$. For example: for soil resistivity $\rho = 20$, the permissible voltage $U_{a.c.}$ according to relationship (8) is 1.77 V irrespective of the value of the on-potential E_{on} , and according to the 1st criterion this voltage will be 2 V . When, on the other hand, taking into account the information presented in Fig. 6. and 5th and 15th criteria, formulated on the basis of the criterion of permissible density $J_{a.c.} \leq 30 \text{ A/m}^2$, the permissible voltage $U_{a.c.}$ is considerably lower and amounts to $0.9\text{--}1 \text{ V}$. It is reasonable to use the simple criterion (8) or 1st criterion in the analyses and calculations, independent of the magnitude of polarization and cathodic protection current density.

A very important issue in estimating the current density $J_{a.c.}$ and determining the permissible voltage $U_{a.c.}$ is the use of the correct value for the resistivity of the environment. This should be the resistivity “as seen” by a defect in the insulation coating (actual or hypothetical), as appropriately measured, or the lowest possible in a given location or region.

In order for the corrosion protection to be fully effective, the cathodic protection effectiveness criteria should also be met in defects in the insulation coating of the pipeline (on simulating electrodes). When assessing the corrosion risk caused by alternating current, the following can also be taken into account:

- the value of alternating voltage between the pipeline and the ground,
- the on-potential,
- value of polarization potential in defects of a pipeline’s insulation coating (simulating electrodes),
- cathodic protection current density,
- ratio of AC current density to DC current density,
- the ratio of AC voltage to the IR component of the on-potential.

When the complexity of AC corrosion and the associated variety of criteria for assessing corrosion risk and the effectiveness of protection measures are taken into account, it makes sense to use corrosive methods, including resistance corrosion, on existing pipelines.

5.6. The role of E_{on} in AC corrosion risk assessments

The most relevant values in AC corrosion risk analyses of cathodically protected pipelines are the following: the $J_{a.c.}$ current density flowing between the pipeline and the ground through the insulation defect, the cathodic polarization current density $J_{d.c.}$ flowing

ych kryteriów (z pominięciem wpływu zmniejszania się rezystywności środowiska wskutek wzrostu pH):

- Zagrożenie korozją przeniennoprądową jest bardzo duże, jeśli gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.} \geq 100 \text{ A/m}^2$.
- Zagrożenie korozją przeniennoprądową nie występuje lub jest bardzo małe, jeśli gęstość prądu przemiennego $J_{a.c.} < 20 \text{ A/m}^2$.

Uproszczoną zależność (nieuwzględniając m.in. grubości powłoki w defekcie) określającą gęstość prądu w defekcie izolacji o powierzchni 1 cm^2 można zapisać równaniem:

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

gdzie:

$U_{a.c.}$ – napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią (odniesienia) [V],

ρ – zastępcza rezystywność środowiska „widziana” przez defekt w powłoce izolacyjnej [Ωm],

$J_{a.c.}$ – gęstość prądu w defekcie izolacji o powierzchni 1 cm^2 [A/m^2].

Z kolei dopuszczalne napięcie $U_{a.c.}$ w zależności od rezystywności gruntu ρ , takie aby w defekcie izolacji o powierzchni 1 cm^2 gęstość prądu $J_{a.c.}$ nie była większa niż 20 A/m^2 , można określić, wychodząc od równania (7), na podstawie uproszczonej zależności:

$$U_{a.c.} < 0.0885 \cdot \rho. \quad (8)$$

Zależność (8) jest podobna do 1. kryterium: dopuszczalne $U_{a.c.} [\text{V}] < 0,1\rho [\Omega\text{m}]$. Przykładowo: dla rezystywności gruntu $\rho = 20$ dopuszczalne napięcie $U_{a.c.}$ według zależności (8) wynosi $1,77 \text{ V}$ niezależnie od wartości potencjału załączeniowego E_{on} , a zgodnie z 1. kryterium napięcie to wyniesie 2 V . Gdy natomiast uwzględni się informacje przedstawione na rys. 6. oraz 5. i 15. kryterium, sformułowane na podstawie kryterium dopuszczalnej gęstości $J_{a.c.} \leq 30 \text{ A/m}^2$, dopuszczalne napięcie $U_{a.c.}$ jest znacznie mniejsze i wynosi $0,9\text{--}1 \text{ V}$. Zasadne jest stosowanie w analizach i obliczeniach prostego kryterium (8) lub 1. kryterium, niezależnych od wielkości polaryzacji i gęstości prądu ochrony katodowej.

Bardzo istotną kwestią w szacowaniu gęstości prądu $J_{a.c.}$ i określaniu dopuszczalnego napięcia $U_{a.c.}$ jest stosowanie właściwej wartości rezystywności środowiska. Powinna to być rezystywność „widziana” przez defekt w powłoce izolacyjnej (rzeczywisty lub hipotetyczny), odpowiednio zmierzona, lub najmniejsza z możliwych w danym miejscu bądź rejonie.

Aby ochrona przeciwkorozyjna była w pełni skuteczna, w defektach powłoki izolacyjnej rurociągu (na elektrodach symulujących) powinny być także spełniane kryteria skuteczności ochrony katodowej. Przy ocenie zagrożenia korozją powodowaną przez prąd przemienny mogą być również uwzględniane:

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

Gdy weźmie się pod uwagę złożoność zjawiska korozji AC i związaną z tym różnorodność kryteriów oceny zagrożenia korozyjnego i skuteczności zabezpieczeń, zasadne jest stosowanie na istniejących rurociągach metod korozymetrycznych, w tym korozymetrii rezystancyjnej.

5.6. Rola E_{on} w ocenach zagrożenia korozją AC

Najistotniejsze w analizach zagrożeń korozją AC rurociągów chronionych katodowo są następujące wartości: gęstość prądu $J_{a.c.}$ przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią przez defekt izolacji, gęstość prądu polaryzacji katodowej $J_{d.c.}$ wpływającego przez defekt

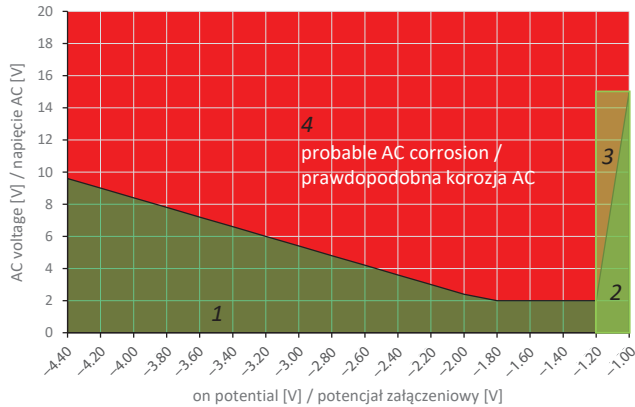


Fig. 10. Diagram alternating voltage – “on-potential”, that shows the probability of AC corrosion: 1 – strong cathodic polarization and low AC voltage area – no threat of AC corrosion, 2 – weak cathodic polarization area – no threat of AC corrosion, 3 – an area that needs to be verified in terms of AC and DC current density if ground resistivity is 10–80 Ω , 4 – possible AC corrosion area

Source: [17, p. 13].

Rys. 10. Napięcie przemiennie a potencjał załączeniowy – diagram obrazujący prawdopodobieństwo korozji AC: 1 – obszar silnej polaryzacji katodowej i niskiego napięcia AC – brak zagrożenia korozją AC, 2 – obszar słabej polaryzacji katodowej – brak zagrożenia korozją AC, 3 – obszar wymagający weryfikacji pod kątem gęstości prądu AC i DC, jeśli rezystywność gruntu wynosi 10–80 Ω , 4 – obszar prawdopodobnej korozji AC

Źródło: [17, s. 13].

through the defect into the pipeline, and the $J_{a.c.}$ to $J_{d.c.}$ current density ratio. These are respectively expressed by: 1st, 2nd, 6th, 9th, 11th, 12th criteria; relationship (8) and 3rd, 10th and 12th criteria; 4th, 7th and 13th criteria. The $J_{a.c.}/J_{d.c.}$ ratio criteria can be replaced by the criterion defining the ratio of the AC voltage to the IR component of the on-potential E_{on} : $U_{a.c.}/(IR)$, which is included in 5th criterion and 15th criterion, which use the on-potential E_{on} . The IR component of the on-potential represents the difference of the polarization potential E_p and the on-potential E_{on} .

An important category in the context of the corrosion risk caused by AC current is the DC current density of the cathodic protection. The critical value for this current density is 1 A/m^2 . It can be presumed that in the documents [14, 17], this value of DC current density corresponds to an on-potential of $-1.2 V$ relative to the CSE, i.e.:

- if $E_{on} < -1.2 V$, then in small insulation defects ($1 cm^2$) the DC current density in a part of the defects will be greater than 1 A/m^2 (this statement is not questionable – it depends on the soil resistivity and the IR component of the on-potential, in this area such places will certainly occur);
- if $E_{on} > -1.2 V$, the DC current density in small insulation defects ($1 cm^2$) will not be greater than 1 A/m^2 (this assumption is questionable – it depends on the soil resistivity and the IR component of the on-potential; there may be situations where $J_{d.c.} > 1 A/m^2$ under these conditions [17] (Fig. 10, area 3).

In addition to this, relationships $U_{a.c.} = f(E_{on})$ are defined according to the current state of knowledge, taking into account various phenomena concerning AC interference on cathodic polarization and having an impact on corrosion (Fig. 6–8).

In standards PN-EN ISO 18086:2021-06 [14] and GW 28 [17, 18], diagrams $J_{a.c.} = f(J_{d.c.})$ and $U_{a.c.} = f(E_{on})$ are presented, illustrating the probability of AC corrosion (Fig. 10, 11). The on-potential plays an important role in AC corrosion risk analyses of cathodically protected pipelines.

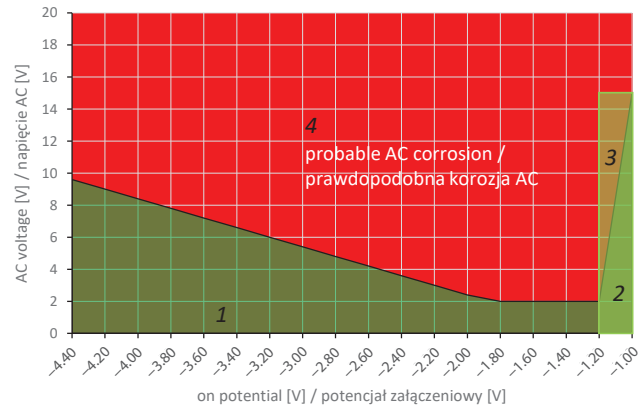


Fig. 11. Alternating voltage – “on-potential” diagram showing the probability of AC corrosion: 1 – area of strong cathodic polarization and low AC voltage – no risk of AC corrosion, 2 – area of weak cathodic polarization – no risk of AC corrosion, 3 – area of probable AC corrosion

Source: [14, p. 31].

Rys. 11. Napięcie przemiennie a potencjał załączeniowy – diagram obrazujący prawdopodobieństwo korozji AC: 1 – obszar silnej polaryzacji katodowej i niskiego napięcia AC – brak zagrożenia korozją AC, 2 – obszar słabej polaryzacji katodowej – brak zagrożenia korozją AC, 3 – obszar prawdopodobnej korozji AC

Źródło: [14, s. 31].

do rurociągu oraz stosunek gęstości $J_{a.c.}$ do gęstości prądu $J_{d.c.}$. Wyrazem tego są odpowiednio: 1., 2., 6., 9., 11., 12. kryterium; zależność (8) oraz 3., 10. i 12. kryterium; kryteria: 4., 7. i 13. Kryteria stosunku $J_{a.c.}/J_{d.c.}$ można zastąpić przez kryterium stosunku napięcia przemiennego do składowej IR potencjału załączeniowego E_{on} : $U_{a.c.}/(IR)$, co zostało uwzględnione w 5. i 15. kryterium, w których wykorzystano potencjał załączeniowy E_{on} . Składowa IR potencjału załączeniowego jest różnicą potencjału polaryzacji E_p i potencjału załączeniowego E_{on} .

Ważną kategorią w kontekście zagrożenia korozyjnego powodowanego przez prąd AC jest gęstość prądu DC ochrony katodowej. Krytyczną wartością gęstości tego prądu jest 1 A/m^2 . Można domniemywać, że w dokumentach [14, 17] tej wartości gęstości prądu DC odpowiada potencjał załączeniowy wynoszący $-1,2 V$ wzgl. CSE, tzn.:

- jeśli $E_{on} < -1,2 V$, to w małych defektach izolacji ($1 cm^2$) gęstość prądu DC w części defektów będzie większa niż 1 A/m^2 (stwierdzenie nie budzi zastrzeżeń – zależy to od rezystywności gruntu i składowej IR potencjału załączeniowego, w tym obszarze z pewnością takie miejsca wystąpią);
- jeśli $E_{on} > -1,2 V$, to w małych defektach izolacji ($1 cm^2$) gęstość prądu DC nie będzie większa niż 1 A/m^2 (takie założenie wzbudza wątpliwości – zależy to od rezystywności gruntu i składowej IR potencjału załączeniowego; mogą wystąpić sytuacje, gdy w tych warunkach $J_{d.c.} > 1 A/m^2$ [17] (rys. 10, obszar 3).

Oprócz tego zgodnie z aktualnym stanem wiedzy określane są zależności $U_{a.c.} = f(E_{on})$, uwzględniające różnorodne zjawiska dotyczące interferencji AC na polaryzację katodową i mające wpływ na korozję (rys. 6–8).

W normatywach PN-EN ISO 18086:2021-06 [14] i GW 28 [17, 18] przedstawiono diagramy $J_{a.c.} = f(J_{d.c.})$ oraz $U_{a.c.} = f(E_{on})$, obrazujące prawdopodobieństwo korozji AC (rys. 10, 11). Potencjał załączeniowy odgrywa ważną rolę w analizach zagrożeń korozją AC rurociągów chronionych katodowo.

5.7. Methods of preventing corrosion caused by alternating current

Adjustments to a planned HV/EHV line, such as moving the line away from pipelines, increasing the crossing angles (rerouting), raising the poles, changing the phase arrangement to reciprocal, will reduce the impact of the line on the metallic pipelines.

In the case of designed pipelines, it is recommended that a suitable routing of the pipelines with respect to the HV/EHV lines is carried out wherever possible, especially within 1 km in each direction from the lines, keeping in mind to keep the pipelines away from the lines, avoiding, as far as possible, longitudinal routes and slight angles with respect to the lines, and using crossing angles that are as large as possible and approximate to right angles to the lines.

The solutions described cannot always be applied, nor can they be fully effective, and other protective measures may need to be implemented, for example:

- laying of reduction conductors in the ground along the HV/EHV lines (this method can be effective in some systems, although not all);
- laying of reduction conductors along the pipeline in the ground (these are linear, insulated, reduction metal conductors laid longitudinally, in close proximity to the pipeline, between the pipeline and the HV/EHV line, which are periodically earthed);
- the use of indirect grounding devices (connection of the pipeline to suitable grounding conductors through so-called delimiters) at suitable locations and in an acceptable number with grounding conductors of small but feasible grounding resistances;
- installation of isolation monoblocks in the pipeline and additional cathodic protection sources and electrical survey points;
- bringing the insulation coating in selected sections (including sections separated by insulation monoblocks) to a fully tight condition;
- carrying out local soil replacement;
- use of active devices – controlled power supplies to compensate for the AC voltage between the pipeline and the ground.

It is not uncommon to use a combination of different protection measures (mixed solutions).

Protection against the corrosive effects of alternating current is based on a suitable reduction of the alternating current density flowing between the pipeline and the ground through defects in the insulation coating – which is what the aforementioned measures are designed to do. It is also based on reducing the ratio of the alternating current density to the cathodic polarization current density. This can be achieved by:

- Reducing the AC voltage between the pipeline and the ground (the first three solutions mentioned above are used for this purpose).
- Measures to locally lower the AC current density flowing between the pipeline and the ground at risk locations. Local reduction of the AC current density flowing between the pipeline and the ground can be achieved by increasing the ground resistance of the pipeline at potential coating defects. To this end, sand filling can be applied to the affected pipeline sections during the pipeline construction phase. For existing pipelines, modification of the environment in the vicinity of coating defects can be carried out to create cathodic deposits with insulating properties in these defects.
- Elimination of AC current flow between the pipeline and the ground by using a defect-free, insulation coating. A sealed, defect-free insulation coating can be used when the risk of AC corrosion is present on short sections of the pipeline. The level of integrity of the insulation coating over such sections should be checked periodically. Checking should be carried out using suitable sensitive measuring methods.

5.7. Metody zapobiegania korozji powodowanej przez prąd przemienny

Korekty projektowanej linii WN/NN, takie jak oddalenie linii od rurociągu, zwiększenie kątów skrzyżowań (zmiana trasy), podwyższenie słupów, zmiana układu faz na przeciwsobny, zmniejszą oddziaływania linii na metalowe rurociągi.

W wypadku projektowanych rurociągów, jeśli tylko jest to możliwe, zaleca się wyznaczyć odpowiednią trasę rurociągu względem linii WN/NN, szczególnie w pasach o szerokości 1 km w każdą stronę od linii, pamiętając o oddaleniu rurociągu od linii, unikaniu, na ile to możliwe, przebiegów wzdłużnych i pod łagodnymi kątami względem linii, stosowaniu możliwie dużych, zbliżonych do kąta prostego kątów skrzyżowań z liniami.

Opisane rozwiązania nie zawsze mogą zostać zastosowane, mogą też nie być w pełni skuteczne, może więc być konieczne wdrożenie innych środków zabezpieczających, na przykład:

- ułożenie w ziemi przewodów redukcyjnych wzdłuż linii WN/NN (ten sposób w pewnych układach może być skuteczny, choć nie we wszystkich);
- ułożenie w ziemi przewodów redukcyjnych wzdłuż rurociągu (są to liniowe, izolowane, redukcyjne przewody metalowe układane wzdłuż, w niewielkiej odległości od rurociągu, pomiędzy rurociągiem a linią WN/NN, które są okresowo uziemiane);
- wykorzystanie urządzeń pośrednio doziemających (połączenie rurociągu z odpowiednimi uziomami przez tzw. ograniczniki) w odpowiednich miejscach i w akceptowalnej liczbie z uziomami o małych, ale realnych rezystancjach uziemień;
- montaż w rurociągu monobloków izolujących oraz dodatkowych źródeł ochrony katodowej i punktów pomiarów elektrycznych;
- doprowadzenie powłoki izolacyjnej na wybranych odcinkach (w tym na odcinkach wydzielonych monoblokami izolującymi) do stanu całkowitej szczelności;
- przeprowadzenie lokalnej wymiany gruntu;
- zastosowanie urządzeń aktywnych – sterowanych zasilaczy kompensujących napięcie przemiennie pomiędzy rurociągiem a ziemią. Nierzadko stosuje się kombinację różnych zabezpieczeń (rozwiązania mieszane).

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

- Zmniejszenie napięcia przemiennego pomiędzy rurociągiem a ziemią (w tym celu stosuje się trzy pierwsze wymienione powyżej rozwiązania).
- Działania obniżające lokalnie, w miejscach zagrożonych, gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią. Lokalne obniżenie gęstości prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią można uzyskać poprzez zwiększenie rezystancji uziemienia rurociągu w potencjalnych defektach powłoki. W tym celu na zagrożonych odcinkach rurociągu można stosować obsypkę piaskową na etapie budowy rurociągu. W wypadku istniejących rurociągów można przeprowadzić modyfikację środowiska w rejonie usytuowania defektów w powłoce w celu wytworzenia w tych defektach osadów katodowych o własnościach izolacyjnych.
- Wyeliminowanie przepływu prądu przemiennego pomiędzy rurociągiem a ziemią poprzez zastosowanie bezdefektowej, szczelnej powłoki izolacyjnej. Szczelną, bezdefektową powłokę izolacyjną można zastosować, gdy zagrożenie korozją prądową występuje na krótkich odcinkach rurociągu. Poziom szczelności powłoki izolacyjnej na takich odcinkach powinien być okresowo sprawdzany. Kontrolę należy przeprowadzać odpowiednio czułymi metodami pomiarowymi.

– Increasing the cathodic protection current so that it compensates for the anodic part of the AC current. Increasing the cathodic polarization current to reduce the risk of AC corrosion involves deepening the polarization. If this method is used, the limitations of the polarization potential must be taken into account. Mixed solutions are often needed to achieve a good result.

6. Conclusion

1. On-potential measurements are the “primary” measurement in the field of cathodic protection. Despite its specific unfavorable characteristic (it generally contains a significant IR component), it is the primary measurement carried out in the practice of cathodic protection of pipelines. Its importance is growing, especially with regard to pipelines protected by extra-tight insulation coatings.
2. On-potential measurements and recording of on-potentials play a key role in investigating the effects of stray currents on pipelines. PN-EN ISO 21857:2022-03 defines risk criteria based on average on-potential and its variations.
3. Cathodic protection increases the susceptibility of steel pipelines to AC corrosion.
4. Risk criteria defined in standards, including those based on-potential, are used to investigate AC impacts on cathodically protected pipelines.
5. There is an increasing knowledge of AC effects on pipelines and the risk criteria are evolving and revisions are being made.
6. It is reasonable and recommended to use simple and safe criteria in AC corrosion risk analyses, such as permissible AC voltages $U_{a.c.} [V] < 0.1 \rho [\Omega m]$ or $U_{a.c.} [V] < 0.0885 [\Omega m]$, independent of the polarization (density) value of the cathodic protection current, where ρ is the equivalent resistivity of the ground “as seen” by a hypothetical or actual defect in the insulation.

– Zwiększenie prądu ochrony katodowej tak, by kompensował on anodową część prądu przemiennego. Zwiększenie prądu polaryzacji katodowej w celu redukcji zagrożenia korozją przenienną wiąże się z pogłębieniem polaryzacji. Jeżeli stosuje się tę metodę, należy wziąć pod uwagę ograniczenia dotyczące potencjału polaryzacji.

Aby uzyskać dobry efekt, niejednokrotnie trzeba zastosować rozwiązania mieszane.

6. Wnioski

1. Pomiar potencjału załączeniowego jest „pierwotnym” pomiarem w dziedzinie ochrony katodowej. Mimo specyficznej, niekorzystnej cechy (z reguły zawiera znaczną składową IR) jest podstawowym pomiarem realizowanym w praktyce ochrony katodowej rurociągów. Jego znaczenie wzrasta, szczególnie w odniesieniu do rurociągów zabezpieczonych powłokami izolacyjnymi o wysokim poziomie szczelności.
2. W badaniach oddziaływań prądów błądzących na rurociągi pomiary i rejestrowanie potencjałów załączeniowych odgrywają kluczową rolę. W normie PN-EN ISO 21857:2022-03 określono kryteria zagrożenia oparte na średnim potencjale załączeniowym i jego zmianach.
3. Ochrona katodowa zwiększa podatność stalowych rurociągów na korozję AC.
4. W badaniach oddziaływań AC na rurociągi chronione katodowo stosuje się określone w normach kryteria zagrożeń, m.in. oparte na potencjale załączeniowym.
5. Wiedza na temat oddziaływań AC na rurociągi jest coraz większa, a kryteria zagrożeń ulegają zmianom, wprowadzane są korekty.
6. Zasadne i zalecane jest stosowanie w analizach zagrożenia korozją AC prostych i bezpiecznych kryteriów, takich jak dopuszczalne napięcia przemiennie $U_{a.c.} [V] < 0,1 \rho [\Omega m]$ lub $U_{a.c.} [V] < 0,0885 [\Omega m]$, niezależnych od wielkości polaryzacji (gęstości) prądu ochrony katodowej, gdzie ρ jest zastępczą rezystywnością gruntu „widzianą” przez hipotetyczny lub rzeczywisty defekt w izolacji.

BIBLIOGRAPHY

- [1] M. Fiedorowicz. 2012. „Ochrona katodowa – potencjały konstrukcji”. *Ochrona przed Korozją* 55(8): 340–346.
- [2] M. Fiedorowicz, M. Jagiełło. 2008. „Zdalny monitoring ochrony katodowej gazociągów przesyłowych w GAZ-SYSTEM SA Oddział w Gdańsku”. *Ochrona przed Korozją* 51(8): 301–305.
- [3] ST-IGG-0602:2022: Ochrona przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych. Ochrona katodowa. Projektowanie, budowa i użytkowanie.
- [4] M. Fiedorowicz, M. Jagiełło. 2001. „Stopień szczelności powłoki a ochrona katodowa podziemnego rurociągu. Cz. 1”. *Ochrona przed Korozją* 44(8): 329–333.
- [5] M. Fiedorowicz, M. Jagiełło. 2002. „Stopień szczelności powłoki a ochrona katodowa podziemnego rurociągu. Cz. 2”. *Ochrona przed Korozją* 45(2): 35–39.
- [6] PN-EN ISO 21857:2022-03: Przemysł naftowy, petrochemiczny i gazowniczy – Zapobieganie korozji systemów rurociągów spowodowanej występowaniem prądów błądzących.
- [7] PN-EN 50162:2006: Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błądzące z układów prądu stałego.
- [8] M. Büchler. 2020. “On the Mechanism of Cathodic Protection and Its Implications on Criteria Including AC and DC Interference Conditions.” *Corrosion* 76(5): 451–463. DOI: 10.5006/3379.
- [9] W. v. Baeckmann, W. Schwenk, W. Prinz (Herausgeber). 1989. *Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Theorie und Praxis der elektrochemischen Schutzverfahren*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft.
- [10] S. Goidanich, L. Lazzari, M. Ormellese. 2010. “AC Corrosion. Part 2: Parameters Influencing Corrosion Rate.” *Corrosion Science* 52(3): 916–922. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.11.012.
- [11] R. A. Gummow, R. G. Wakelin, S. M. Segall. 1998. “AC Corrosion – A New Challenge to Pipeline Integrity.” Paper presented at the Corrosion 98. Paper No.: NACE-98566.
- [12] M. Yunovich, N. G. Thompson. 2004. “AC Corrosion: Corrosion Rate Risk and Mitigation Requirements.” Paper presented at the Corrosion 2004. Paper No.: NACE-04206.
- [13] R. A. Gummow. 2014. *A/C Interference Guideline Final Report*. Canadian Energy Pipeline Association.
- [14] PN-EN ISO 18086:2021-06: Korozja metali i stopów – Określenie korozji wywołanej przez prąd przemienny – Kryteria ochrony.
- [15] DVGW. 2010. Forschungsvorhaben G 2-01-08. Feldversuch Wechselstromkorrosion.
- [16] DVGW. 2015. Forschungsvorhaben G 2-01-10. Feldversuch Wechselstromkorrosion – Validierung des Berechnungsmodells.
- [17] Technische Regel. 2014. Arbeitsblatt DVGW GW 28 (A): Beurteilung der Korrosionsgefährdung durch Wechselstrom bei katodisch geschützten Stahlrohrlösungen und Schutzmassnahmen. Textgleich mit AfK – Empfehlung Nr. 11.
- [18] Technische Regel. 2018. Arbeitsblatt DVGW GW 28-B1 (A): Beurteilung der Korrosionsgefährdung durch Wechselstrom bei katodisch geschützten Stahlrohrlösungen und Schutzmassnahmen. Beiblatt 1: Modifizierte Kriterien für Wechselspannung und Einschaltpotential.
- [19] A. Vimalanandan, H. G. Schöneich, M. Büchler. 2018. “Evaluating the AC Corrosion Risk of Cathodically Protected Pipelines: A First Experience with a New Approach According to German Standard GW28.” Proceedings of Ceocor Conference. Paper No.: 28.
- [20] M. Büchler, D. Joos. 2018. “AC-Corrosion on Cathodically Protected Pipelines: A Description of the Involved Processes, the Risk Assessment and a New Normative Approach.” *Ochrona przed Korozją* 61(8): 204–212. DOI: 10.15199/40.2018.8.1.
- [21] M. Ormellese, A. Brenna, L. Lazzari. 2015. “AC Corrosion of Cathodically Protected Buried Pipelines: Critical Interference Values and Protection Criteria.” Paper presented at the Corrosion 2015. Paper No.: NACE-2015-5753.