

## Oddziaływania elektromagnetyczne na obwody ziemnopowrotne – rurociągi podziemne

### 1. WPROWADZENIE

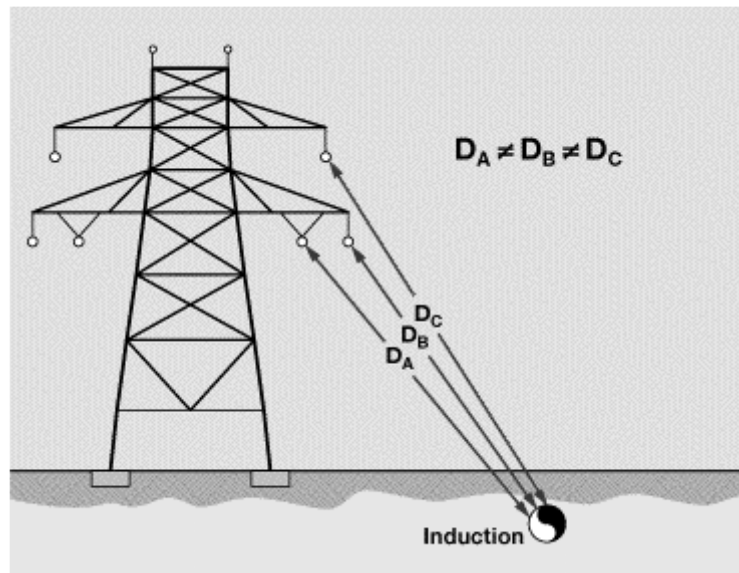
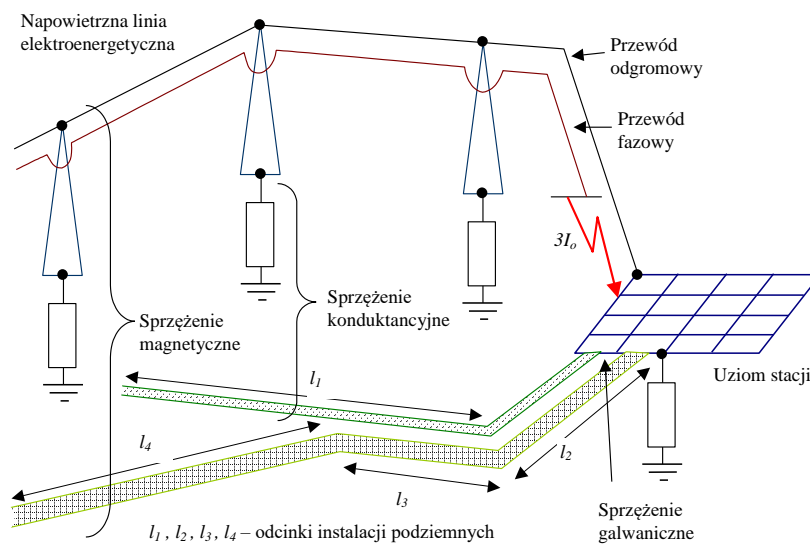
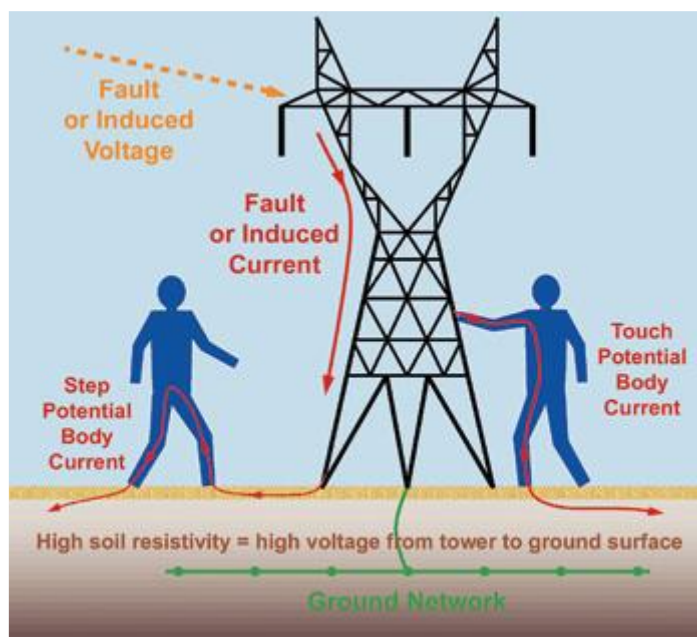


Fig.1. AC interference on a pipeline



Fragment złożonego układu obwodów ziemnopowrotnych

## 2. MODELOWANIE ODDZIAŁYWANIA



Interference between any human body and transmission line system configuration

### Niezbędne dane do obliczeń oddziaływania linii NN (lub WN) na podziemne gazociągi stalowe:

1. Dane na temat przebiegu linii NN i rurociągu (dokładna mapa PAPIEROWA – preferowana skala 1:1000 (minimum 1:5000) obu tras z której wynika odległość linii od rurociągu, numery słupów linii NN, odległości najbliższego słupa od rurociągu w miejscach skrzyżowań tras i długości poszczególnych odcinków zbliżenia – mapa musi obejmować rejon zbliżenia rurociągu do linii NN w pasie o szerokości 2 km (po 1000 m od osi linii NN po obu jej stronach – chodzi o rejon w którym rurociąg krzyżuje się z linią, lub po jednej stronie jeżeli rurociąg przebiega równoległe lub w zbliżeniu w odległości  $\leq 1000$  m od linii) – zgodnie z wymogami GAZ- SYSTEM S.A.
2. Dane o rurociągu DN XXX:
  - nazwa i długość rurociągu (skąd A [0 km] – dokąd B [? km])
  - średnica zewnętrzna rurociągu [mm]
  - grubość izolacji [mm]
  - grubość ścianki rurociągu [mm]
  - głębokość ułożenia [m]
  - rezystywność gruntu [ $\text{ohm} \cdot \text{m}$ ] – muszą być wykonane pomiary rezystywności gruntu wzdłuż trasy gazociągu (wymóg GAZ Systemu) – wynik pomiaru należy podać w miejscu pomiaru czyli w kilometrze liczonym wzdłuż trasy rurociągu
  - rezystancja powłoki rurociągu [ $\text{kohm} \cdot \text{m}^2$ ]
  - co jest na końcach rurociągów (monoblok?, uziemienie (ile omów)?, połączenie z innym rurociągiem),
  - czy jest metaliczne połączenie gazociągów z innymi rurociągami (w którym kilometrze gazociągów)?

- na którym kilometrze rurociągu jest skrzyżowanie z linią NN ? [km rurociągu]
- ochrona katodowa [km gazociągu] – wykaz i lokalizacja SOK i punktów pomiarowo-kontrolnych wzdłuż rurociągu.
- istniejąca ochrona przeciwporażeniowa rurociągu [km rurociągu] (oraz wartości rezystancji uziomów do których dołączono iskierniki/odgromniki)
- istniejąca ochrona rurociągu przed korozją prądu przemiennoprądową [km rurociągu] (oraz wartości rezystancji uziomów do których dołączono odgraniczniki)

3. Dane na temat linii NN ??? kV:

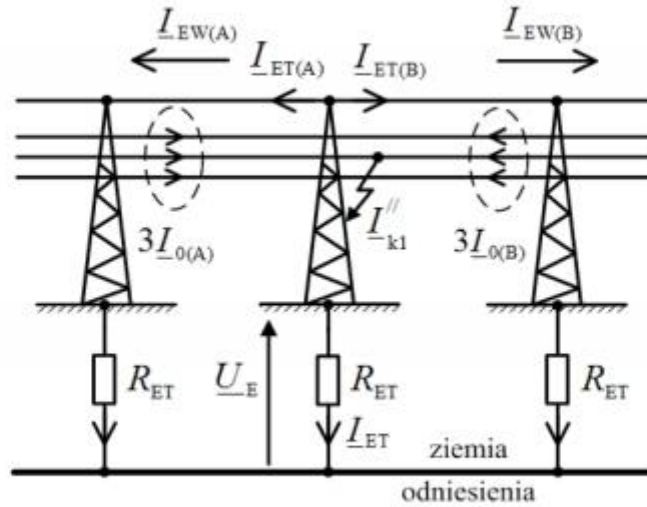
- nazwę linii (skąd X- dokąd Y), czy jest dwustronnie zasilana?
- typ linii
- jeśli linia jest dwutorowa to układ faz w obu torach
- typ słupa
- wartość prądu roboczego [A] (dla normalnej pracy linii)
- średnia (przewidywana) dobową wartość prądu roboczego [A]
- promień przewodu odgromowego [mm]
- rezystancja przewodu odgromowego [ohm/km],
- kąt między gazociągiem a linią NN w miejscu skrzyżowania,
- miejsca skrzyżowania z gazociągami (między słupami linii NN, odległości uziomów słupa i gazociągów – plan sytuacyjny)
- prądy zwarcia doziemnego (udziały ze stacji X i Y) na słupach, prąd zwarcia płynący przez uziom słupa do ziemi (dla całej trasy linii NN).
- czas trwania zwarcia

UWAGA: Możliwe są dalsze pytania po otrzymaniu kompletu dokumentów/informacji j.w.

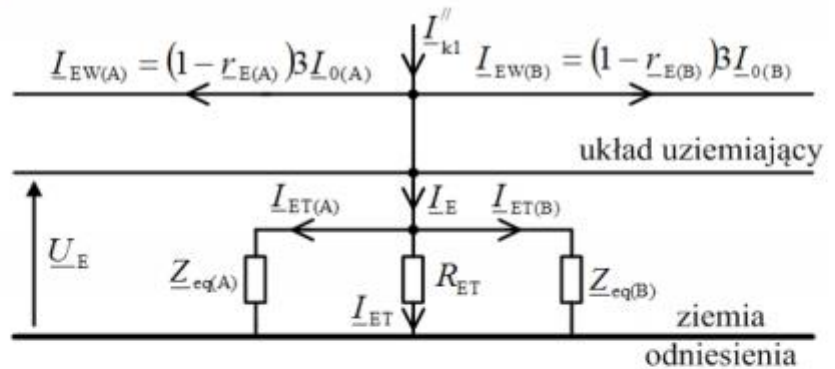
Dane na temat linii elektroenergetycznych :

- prądy zwarcia doziemnego (udziały ze stacji A i B) na słupach, prąd zwarcia płynący przez uziom słupa do ziemi wyliczone zgodnie z poniższym rysunkiem, tzn.:  $3I_0(A)$ ,  $3I_0(B)$ ,  $I_{ew}(A)$ ,  $I_{ew}(B)$ ,  $I_k''$  oraz  $I_{et}$  (patrz przykładowa Tabela poniżej):

a)



b)



Prąd uziomowy przy zwarciu na słupie linii WN lub NN można wyrazić następującym równaniem (Rys. 5.1):

$$\underline{I}_E = 3 \cdot \underline{I}_{0(A)} \cdot r_{E(i-1)} + 3 \cdot \underline{I}_{0(B)} \cdot r_{Ei} = \underline{I}_{ET(A)} + \underline{I}_{ET(B)} + \underline{I}_{ET}$$

Prąd uziomowy, powracający do stacji zasilających przez układ uziemiający, jest nazywany zredukowanym prądem zwarcia. Prąd ten powoduje pojawienie się na słupie przy zwarciu napięcia uziomowego  $U_E$ . W efekcie tego pojawiają się niebezpieczne potencjały względem ziemi na wszystkich słupach, tj. w całym galwanicznie połączonym i uziemiającym linii 110 kV, 220 kV lub 400 kV.

Przykładowo załączam obliczenia (można je zweryfikować posiadającym programem):

Tabela. Rozpływ prądu jednofazowego zwarcia doziemnego na słupie.

a) Linia napowietrzna wysokiego napięcia WN 110 kV (relacji Lubraniec – Włocławek Wschód) – km gazociągu 18+056

- 259/OS

Miejsce zwarcia (Słup)	Prąd zwarcia	Udziały prądu zwarcia od strony		Prądy w kierunku				Prąd w słupie	Prąd w uziemieniu	Napięcie uziemienia
		Stacja GPZ Lubraniec	Stacja GPZ Włocławek Wschód	Stacji GPZ Lubraniec		Stacji GPZ Włocławek Wschód				
				P.O.1	P.O.2	P.O.1	P.O.2			
	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
259/OS	20201	4856	15345	3080,6	3080,6	5684,2	5684,2	1652,9	163	2452

Oczekuję, że otrzymam wyniki obliczeń **PRĄDU W UZIEMIENIU słupa** ( $I_{ET}$  na załączonym rysunku płynący przez rezystancję  $R_{ET}$  do ziemi).

### MODEL SYMULACYJNY

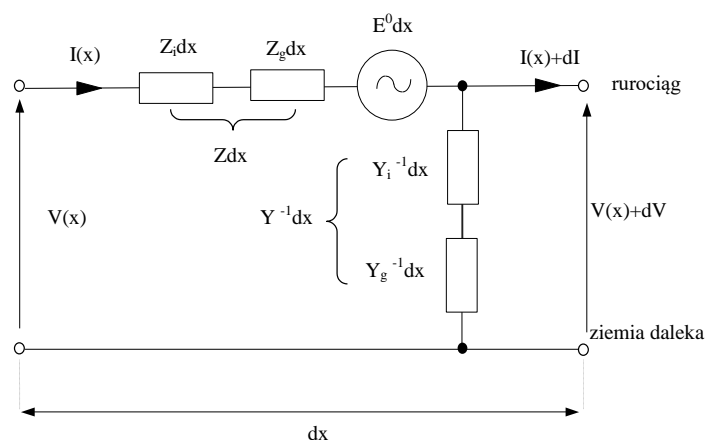


Fig. 2. Equivalent model of an elementary section of earth-return circuit with external excitation

### ZESTAWIENIE OZNACZEŃ I WZORÓW DLA OBLICZANIA PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH GAZOCIĄGU

$C$	- pojemność między gazociągiem i ziemią
$D$	- średnica rurociągu
$h$	- głębokość ułożenia rurociągu
$j$	- jednostka urojona
$r$	- promień rurociągu
$r_u$	- rezystancja przejścia izolacji
$t$	- grubość izolacji
$Y$	- Admitancja
$Y_g$	- admitancja wynikająca z przepływu prądu przez ziemię
$Y_i$	- admitancja upływnościowa rurociągu
$Z$	- Impedancja
$Z_f$	- impedancja charakterystyczna
$Z_g$	- impedancja wynikająca z przepływu prądu przez ziemię
$Z_i$	- impedancja wewnętrzna rurociągu
$\epsilon_0$	- przenikalność elektryczna próżni
$\sigma$	- konduktywność gruntu
$\omega$	- Pulsacja
$\Gamma$	- stała propagacji

$\mu_0$	-	przenikalność magnetyczna próżni
$\mu_r$	-	przenikalność magnetyczna względna
$\rho$	-	rezystywność gruntu
$\rho_{st}$	-	rezystywność stali

$$Z = Z_i + Z_g \quad (3)$$

$$Z_i = (1 + j) \sqrt{\frac{\rho_{st} \mu_0 \mu_r \omega}{2}} \frac{1}{\pi D} \quad (4)$$

$$Z_g = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{a' \sqrt{\Gamma^2 + k^2}} \quad (5)$$

$$Y^{-1} = Y_i^{-1} + Y_g^{-1} \quad (6)$$

$$Y_i = G_i + j\omega C_i \quad (7)$$

$$G_i = \frac{\pi D}{r_u} \quad (8)$$

$$\omega C_i = \frac{\omega \pi D \varepsilon_o \varepsilon_r}{t} \quad (9)$$

$$Y_g^{-1} = \frac{1}{\pi \sigma} \ln \frac{1.12}{\Gamma a'} \quad (10)$$

$$\Gamma_{n+1}^2 = \frac{Z_i + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{a' \sqrt{\Gamma_n^2 + k^2}}}{Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi \sigma} \ln \frac{1.12}{\Gamma_n a'}} \quad (11)$$

$$k^2 = j\omega\mu_0\sigma \quad (12)$$

$$a' = \sqrt{r^2 + 4h^2} \quad (13)$$

$$Z_f = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (14)$$

Zastosowana metoda symulacji polega na założeniu, że oddziaływanie linii elektroenergetycznej na pobliski rurociąg podziemny, z natury zjawisko polowe,

można modelować przy zastosowaniu metod obwodowych. W tym celu obwód ziemnopowrotny (rurociąg) dzieli się na jednorodne odcinki (ogniwa podstawowe), modelowane jako pasywne lub aktywne dwuwrotniki typu  $\pi$ , w których elementy pasywne są parametrami elektrycznymi obliczanymi zgodnie z teorią obwodów ziemnopowrotnych, a elementy aktywne, reprezentujące oddziaływania indukcyjne w układzie sprzężonych obwodów ziemnopowrotnych (przewody napowietrznej linii elektroenergetycznej NN – rurociąg podziemny) stanowią źródła napięciowe, umiejscowione w odpowiednich gałęziach dwuwrotnika. Rozpatrywany obwód ziemnopowrotny traktuje się jako połączenie łańcuchowe pasywnych i aktywnych dwuwrotników. Wyznaczenie rozptyłu prądów/napięć w analizowanym układzie opiera się m.in. na znajomości wartości prądów roboczych linii w stanach normalnej pracy (oddziaływanie długotrwałe na rurociąg) lub prądu jednofazowego zwarcia doziemnego (oddziaływanie krótkotrwałe na rurociąg) oraz geometrii rozpatrywanego układu. Pozwala to na określenie parametrów źródeł napięciowych, wymuszających rozptyw prądów oraz rozkład napięć w rozpatrywanym rurociągu podlegającym oddziaływaniu prądów płynących linią elektroenergetyczną.

Układ rurociąg – linia elektroenergetyczna sprowadza się więc do  $m$  zastępczych układów równoległych przez wyznaczenie zastępczej odległości (w poziomie) zbliżenia linii i rurociągu jako średnich geometrycznych z odległości maksymalnej i minimalnej:

$$a_{msr} = \sqrt{a_{m\max} a_{m\min}} \quad (1)$$

przy spełnieniu warunku, że

$$\frac{a_{m\max}}{a_{m\min}} \leq 3 \quad (2)$$

Obliczenia wykonuje się wzdłuż trasy całego gazociągu w punktach obliczeniowych. Usytuowanie punktów obliczeniowych w pasie o szerokości 1,0 km po obu stronach trasy linii elektroenergetycznej wyznacza kryterium – wzory (1) i (2).

### 3. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ I OCENA ZAGROŻENIA PORAŻENIOWEGO ORAZ KOROZYJNEGO GAZOCIĄGU

#### Ocena stopnia zagrożenia porażeniowego gazociągu

Ocenę stopnia zagrożenia porażeniowego gazociągu przeprowadza się przy założeniach:

- obliczony potencjał gazociągu odpowiada napięciu rażeniowemu dotykowemu w sytuacji, gdy człowiek znajdujący się w pobliżu gazociągu dotyka go (np. wykonując pomiary w słupku pomiarowym instalacji ochrony katodowej),
- czas rażenia wynosi (przykładowo) 300 ms,
- dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe dla czasu rażenia  $t = 0,3$  s wynosi 1000 V wg **PN-EN 50443** (patrz Table 3 poniżej).
- dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe w przypadku oddziaływania długotrwałego linii elektroenergetycznej  $U = 60$  V (dla czasu rażenia  $t > 3$  s).

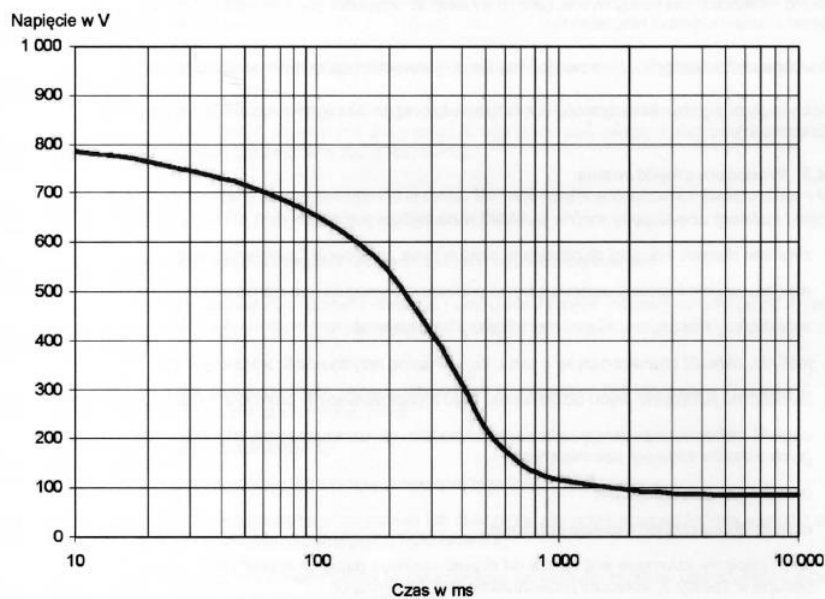
Norma Europejska EN 50443:2011 Effects of electromagnetic interference on pipelines caused by high voltage a.c. electric traction systems and/or high voltage a.c. power supply systems (ma status Polskiej Normy: PN-EN 50443)

Table 3 — Limits for interference voltage related to danger to (electrically) instructed persons

Fault duration $t$ s	Interference voltage (r.m.s. value) V
$t \leq 0,1$	2 000
$0,1 < t \leq 0,2$	1 500
$0,2 < t \leq 0,35$	1 000
$0,35 < t \leq 0,5$	650
$0,5 < t \leq 1,0$	430
$1 < t \leq 3$	150
$t > 3$	60

PN-EN 50522:2011 *Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV*



Dopuszczalne napięcie dotykowe  $U_{Tp}$ 

Rysunek 4 – Dopuszczalne napięcie dotykowe

UWAGA W przypadku czasu przepływu prądu znacznie dłuższego niż 10 s jako dopuszczalne napięcie dotykowe  $U_{Tp}$  może być stosowana wartość 80 V.

POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY 2017

P.O

Tablica B.3 – Obliczone wartości dopuszczalnego napięcia dotykowego  $U_{Tp}$  w zależności od czasu trwania zakłócenia  $t_f$

Czas trwania zakłócenia $t_f$ s	Dopuszczalne napięcie dotykowe $U_{Tp}$ V
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

UWAGA 1 Dla warunków specjalnych mogą być wyznaczone napięcia dotykowe oparte rzeczywistej drodze W warunkach specjalnych, napięcie dotykowe rażeniowe może być określone na podstawie aktualnej drogi przepływu prądu.

UWAGA 2 W przypadku czasu przepływu prądu znacznie dłuższego niż 10 s jako dopuszczalne napięcie dotykowe  $U_{Tp}$  może być stosowana wartość 80 V.

## Ocena stopnia zagrożenia korozją prądu przemienną gazociąg

Ocena stopnia zagrożenia korozją prądu przemienną rurociągów podziemnych jest zagadnieniem trudnym, nie do końca rozpoznanym oraz kontrowersyjnym.

W Standardzie Technicznym Izby Gospodarczej Gazownictwa ST-IGG-0602:2013 jest zapis, iż zagrożenie korozją prądu przemiennopiękądową nie występuje lub jest mało prawdopodobne, jeśli gęstość prądu przemiennopiękądowego jest mniejsza niż 20 A/m<sup>2</sup>. Zapis ten jest dyskusyjny. Pomimo ustanowionej normy EN 15280:2013 i podanego w niej kryterium gęstości prądu 30 A/m<sup>2</sup>, poniżej którego prawdopodobieństwo korozji wywołanej prądem przemiennopiękądowym nie występuje lub uznaje się je jako niskie, trwają dyskusje na temat wartości progowej gęstości prądu przemiennopiękądowego mogącego spowodować przyspieszoną korozję ścianek rurociągu. Norma niemiecka DIN 50925 przyjmuje również 30 A/m<sup>2</sup>, lecz nie brak doniesień literaturowych o dopuszczalnej wartości gęstości prądu rzędu 20 A/m<sup>2</sup>, a nawet stawiana jest teza, że w pewnych warunkach nawet prąd o gęstości 10 A/m<sup>2</sup> może stanowić zagrożenie korozyjne.

W normie PN-EN15280:2013: „Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia na zakopanych rurociągach korozji wywołanej prądem przemiennopiękądowym stosowana do rurociągów chronionych katodowo” podano między innymi następujące akceptowalne poziomy oddziaływania prądów przemiennopiękądowych:

- w pierwszym kroku, napięcie przemiennopiękądowe mierzone na rurociągu powinno być ograniczone do 15 V lub mniej. Dotyczy to jego wartości średniej z reprezentatywnego okresu np. 24 godzin;
- jako drugi krok, skuteczne złagodzenie korozji prądu przemiennopiękądowego może być osiągnięte poprzez przestrzeganie kryteriów zdefiniowanych w normie PN-EN 12954, Tabela 1 - dotycząca potencjałów korozyjnych, potencjałów ochrony i potencjałów krytycznych typowych metali w gruncie oraz w wodzie słodkiej i słonej.

i równocześnie:

- zapewnienie średniej gęstości prądu przemiennopiękądowego w reprezentatywnym okresie (np. przez 24 godziny) niższej niż 30 A/m<sup>2</sup>, przy pomiarze na elektrodzie symulującej o powierzchni 1 cm<sup>2</sup>;
- lub zapewnienie średniej gęstości prądu ochrony katodowej w reprezentatywnym okresie (np. przez 24 godziny) niższej niż 1 A/m<sup>2</sup> mierzonej na elektrodzie symulującej o powierzchni 1 cm<sup>2</sup>, jeżeli gęstość prądu przemiennopiękądowego wynosi więcej niż 30 A/m<sup>2</sup>;
- lub zapewnienie, że stosunek gęstości prądu przemiennopiękądowego ( $J_{ac}$ ) do gęstości prądu stałego ( $J_{dc}$ ) jest mniejszy niż 5 przez reprezentatywny okres (np. 24 godziny). Stosunek  $J_{ac}$  do  $J_{dc}$  mniejszy niż 5 wskazuje małe ryzyko korozji

przemienopięciowej. Jednakże w celu zredukowania ryzyka korozji do minimum preferuje się by ten stosunek był mniejszy niż 3.

Należy ponadto zwrócić uwagę na porównanie kryteriów: zgodnie ze standardem ST-IGG 0602: 2009 gęstość prądu a.c. przepływającego pomiędzy gazociągiem a środowiskiem elektrolitycznym powinna być mniejsza niż 20 A/m<sup>2</sup>, natomiast zgodnie z normą PKN-CEN/TS 15280:2013-12E napięcie przemienne pomiędzy gazociągiem a ziemią nie powinno przekraczać 10 V na całej długości gazociągu lub 4 V na odcinkach ułożonych w gruntach o rezystywności mniejszej niż 25 Ωm.

Z porównania tych kryteriów wynika jednoznacznie brak spójności między w/w wymogami. Z kryterium potencjałowego ( $\rho \leq 25 \Omega m, U_{ac} \leq 4 V$ ) wynika, że dopuszcza się gęstość prądu a.c. wpływającego z defektu (1 cm<sup>2</sup>) izolacji gazociągu zgodnie z zależnością

$$J_{ac} = \frac{226U_{ac}}{\rho} = \frac{226 \times 4}{25} = 36,16 \text{ A/m}^2$$

i jest to wartość znacząco odbiegająca od 20 A/m<sup>2</sup> (kryterium prądowe).

**Przyjmuje się (na ogół) jako podstawę oceny zagrożenia korozją a.c. gazociągu wymóg standardu ST-IGG: gęstość prądu a.c. przepływającego pomiędzy gazociągiem a środowiskiem elektrolitycznym powinna być mniejsza niż 20 A/m<sup>2</sup>.**

#### **4. KONCEPCJA ZABEZPIECZENIA GAZOCIĄGU PRZED ODDZIAŁYWANIEM LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ NN**

##### **Koncepcja zabezpieczenia gazociągu przed korozją a.c.**

Zabezpieczenie gazociągu przeciw korozji a.c. dobiera się (przykładowo) dla prognozowanego średniorocznego natężenia prądu roboczego.

Zakłada się, że jako zabezpieczenie gazociągu przed korozją a.c. zostaną zainstalowane odgraniczniki prądu stałego + uziom (UZPP).

Lokalizację zainstalowania urządzeń UZPP, ich liczbę oraz wymaganą wartość rezystancji uziomów dobiera się symulacyjnie, dopóki nie osiągnie się rozkładu potencjałów wzdłuż zabezpieczanego gazociągu o wartościach, dla których gęstości hipotetycznych prądów upływu poprzez defekty powłoki izolacyjnej gazociągu będą leżały poniżej dopuszczalnej wartości 20 A/m<sup>2</sup>.

##### **Koncepcja zabezpieczenia przeciwporażeniowego gazociągu**

Jeżeli przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że możliwe jest niebezpieczeństwo wystąpienia zagrożenia porażeniowego na nie zabezpieczanym gazociągu, wywołane krótkotrwałym oddziaływaniem indukcyjnym linii elektroenergetycznej.

Należy zatem ograniczyć, do wartości dopuszczalnych, potencjały wzdłuż całej długości gazociągu przy zastosowaniu urządzeń zabezpieczających przed oddziaływaniem prądu przemiennego. Wybór typu UZPP powinien być zgodny z koncepcją zabezpieczenia przed korozją przeniennoprądową oraz uwzględniać wartości natężenia prądów płynących poprzez uziomy urządzeń pośrednio uziemiających podczas jednofazowego zwarcia doziemnego linii elektroenergetycznej.

## **PODSUMOWANIE**

### **Literatura**

1. Haubrich H.-J., Machczyński W.: "Ohmsche Beeinflussung erdverlegter Leitungen durch quasistationäre Strömungsfelder von Erdungsanlagen". etz Archiv/ European Transactions on Electrical Power, Bd. 9, 1987, H. 5, s. 149 – 152.
2. Haubrich H.-J., Brandes W., Machczyński W., Rennie K.: "A new universal algorithm for computation of interference by earth return currents". 8th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zürich, March 7-9, 1989, pp. 285 – 289.
3. Haubrich H.J., Flechner B., Machczyński W.: A universal model for the computation of the electromagnetic interference on earth return circuits. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, No. 3, s. 1593-1599.
4. Machczyński W.: Oddziaływania elektromagnetyczne na obwody ziemnowrotne – rurociągi podziemne. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
5. Lukstaedt M., Machczyński W.: "Analiza oddziaływania indukcyjnego linii elektroenergetycznej na pobliski obwód ziemnowrotny". XXII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC-SPETO, Politechnika Śląska, Gliwice- Ustroń, 19 - 22 maja, 1999, s. 201 – 204.
6. Machczyński W., Markiewicz M., Sokółski W.: Oddziaływanie linii przesyłowych W.N., Rurociągi, 1999, Nr 2-3, s. 11-17.
7. Machczyński W., Markiewicz M., Sokółski W.: Oddziaływania linii elektroenergetycznych W.N., Rurociągi, 1999, Nr 4, s. 15-19.
8. Machczyński W., Sokółski W.: Oddziaływanie indukcyjne linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na gazociągi - część I, Ochrona przed Korozją, 2005, nr 8, 267-271.

9. Sokólski W., Machczyński W., Rozwadowski J.: Oddziaływanie indukcyjne linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na gazociągi. Cz. II, Ochrona przed Korozją, 2006, nr 8, s. 244-248.
10. Machczyński W.: Wprowadzenie do kompatybilności elektromagnetycznej. Wyd. 2, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2010.
11. Czarnywojtek P., Machczyński W.: Wave propagation effects induced in transmission pipelines by EMI from power lines, *Electrical Engineering*, September 2018, Volume 100, Issue 3, pp. 1739–1747