

**IX Krajowa Konferencja**  
**POMIARY KOROZYJNE W OCHRONIE ELEKTROCHEMICZNEJ**  
**9-th National Conference**  
**CORROSION MEASUREMENTS IN ELECTROCHEMICAL PROTECTION**  
**7-9. 06. 2006 Zakopane, Poland**

---



**WYZNACZANIE PARAMETRÓW JEDNOSTKOWYCH  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  PODZIEMNYCH RUROCIĄGÓW**

**DETERMINATION OF UNIT-LENGTH PARAMETERS  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  OF UNDERGROUND PIPELINES**

Wojciech Machczyński

Politechnika Poznańska

Słowa kluczowe: parametry elektryczne, rurociąg podziemny, pomiary, obliczanie  
Keywords: electrical parameters, underground pipeline, measurements, calculations

**Streszczenie**

Opracowano metodę pomiarowo – analityczną wyznaczania parametrów jednostkowych  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  rurociągów podziemnych. Pomiary wykonuje się na wyizolowanym odcinku rurociągu z wykorzystaniem uzimów zainstalowanych na obu końcach. Rurociąg zasila się ze źródła napięcia 50 Hz, włączonego między rurociąg i uzim na jednym z końców odcinka, podczas gdy drugi koniec rurociągu jest dołączony do uzim (stan obciążenia) lub odłączony (stan jałowy). Mierzy się napięcie między rurociągiem i uzimem, prąd wpływający do rurociągu oraz kąt przesunięcia fazowego (i jego charakter) na wejściu. Wyniki pomiarów wykorzystuje się do obliczeń analitycznych parametrów falowych rurociągu, a na ich podstawie parametrów jednostkowych  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ . Metoda daje poprawne wyniki w przypadku stosowania jej dla rurociągów pokrytych powłokami izolacyjnymi dobrej jakości.

**Summary**

A measuring-analytical method of determination of the unit-length electrical parameters  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  of underground pipelines has been proposed. Measurements can be performed on separated pipeline section by use of earth electrodes installed near pipeline ends. A voltage source 50 Hz has to be connected between the pipeline and the nearby earth electrode, whereas the other pipeline end is short-circuited to the second earth electrode or open-circuited. The input voltage and current are measured and the phase shift and its character is determined. Results of measurements are applied to calculation of pipeline propagation constant and characteristic impedance and then to evaluation of electrical parameters. The method gives satisfied accuracy in case of buried pipelines with insulation of good quality.

## 1. Wprowadzenie

Na magistralne rurociągi transportu gazu, paliw, wody i ciepła oddziałują zewnętrzne pola elektryczne i magnetyczne, powodujące przepływ prądu wzdłuż rurociągów. Rozpływ prądu w podziemnym rurociągu zależy od jego parametrów elektrycznych  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ . Znajomość parametrów elektrycznych rurociągów niezbędna jest również przy projektowaniu urządzeń ochrony katodowej, których zadaniem jest automatyczne regulowanie napięcia lub prądu wyjściowego.

Parametry elektryczne rurociągów podziemnych zależą od wielu czynników. Oprócz rezystancji wzdłużnej, zależnej od materiału rurociągu, średnicy i grubości ścianki, i rezystancji przejścia, zależnej od materiału pokrycia ochronnego, na wartości parametrów elektrycznych rurociągu podziemnego ma wpływ głębokość ułożenia, częstotliwość prądu, przenikalność magnetyczna materiału rurociągu, a przede wszystkim konduktywność gruntu. Wyznaczaniu analitycznemu parametrów elektrycznych rurociągów oraz metodom obliczania oddziaływań elektromagnetycznych na rurociągi poświęconych jest wiele publikacji [1-11], podczas gdy na temat pomiarów parametrów elektrycznych rurociągów można znaleźć w literaturze niewiele informacji [12].

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie opracowanej pomiarowo – analitycznej metody wyznaczania parametrów jednostkowych  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  rurociągów ułożonych w ziemi.

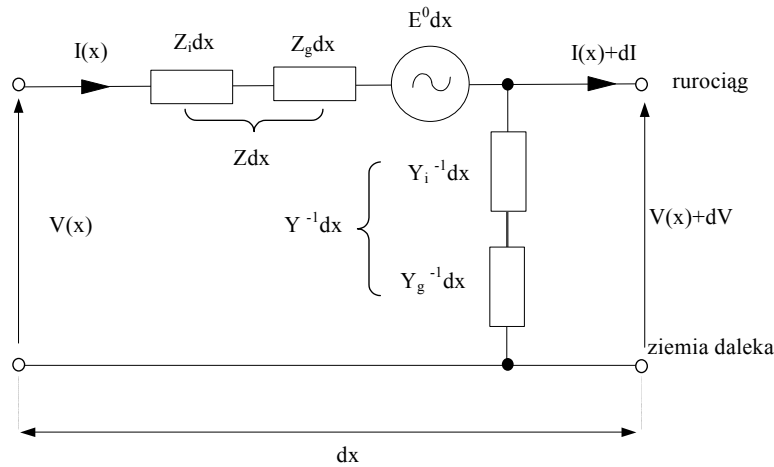
Pomiary wykonuje się na wyizolowanym od sieci przesyłowej odcinku rurociągu z wykorzystaniem niskoomowych uziomów zainstalowanych (dostępnych) na obu końcach odcinka rurociągu. Badany rurociąg powinien być wolny od zakłócających wpływów zewnętrznych źródeł (np. pobliskich linii elektroenergetycznych w.n.). Rurociąg zasila się napięciem przemiennym 50 Hz, dołączając źródło napięcia między rurociąg i uziom na jednym z końców odcinka, podczas gdy drugi koniec rurociągu jest dołączony do uziomu (stan obciążenia) lub odłączony (stan jałowy). Podczas pomiaru mierzy się napięcie między rurociągiem i uziomem, prąd wpływający do rurociągu oraz kąt przesunięcia fazowego (i jego charakter) na wejściu. W przypadku niejednorodności badanego układu (np. znaczna niejednorodność gruntu wzdłuż rurociągu) analogiczny pomiar dokonuje się zasilając rurociąg od drugiego końca. Wyniki pomiarów wykorzystywane są do obliczeń analitycznych parametrów falowych rurociągu, a na ich podstawie impedancji wzdłużnej i admitancji poprzecznej. Parametry elektryczne rurociągu odniesione na jednostkę długości: rezystancję  $R$  i konduktancję  $G$  wyznacza się odpowiednio jako część rzeczywistą impedancji wzdłużnej oraz admitancji poprzecznej, a z ich części urojonej, przy znanej częstotliwości, indukcyjność  $L$  i pojemność  $C$ .

## 2. Zależności ogólne

Metalowy rurociąg podziemny, pokryty powłoką ochronną w celu odizolowania go od agresywnego środowiska jest obwodem ziemnopowrotnym stykającym się z ziemią przez niedoskonałą izolację na całej swej długości. W warunkach quasi-stacjonarnych obwodów taki można przedstawić za pomocą schematu zastępczego elektrycznej linii długiej. Elementarny odcinek podziemnego rurociągu przedstawia rys. 1 [7].

Schemat zastępczy elementarnego odcinka rurociągu podziemnego zawiera jednostkową impedancję wzdłużną  $Z$  oraz jednostkową admitancję poprzeczną  $Y$ . Źródło napięciowe  $E^0(x)$  reprezentuje natężenie pierwotnego pola elektrycznego, wzbudzonego wzdłuż rurociągu przez czynniki zewnętrzne. Jednostkowa impedancja wzdłużna  $Z$  jest szeregowym połączeniem jednostkowej impedancji wewnętrznej rurociągu  $Z_i$  oraz impedancji  $Z_g$ , będącej impedancją części obwodu ziemnopowrotnego, związaną z przepływem prądu przez ziemię. Na jednostkową admitancję poprzeczną rurociągu podziemnego składają się jednostkowa admitancja  $Y_i$  oraz jednostkowa admitancja  $Y_g$

związane, odpowiednio, z właściwościami powłoki ochronnej rurociągu oraz ziemią tworzącą obwód ziemnopowrotny.



Rys. 1. Schemat zastępczy elementarnego odcinka rurociągu podziemnego z wymuszeniem zewnętrznym

Podziemny rurociąg – obwód ziemnopowrotny może być traktowany jako linia długa o jednostkowych parametrach  $R$ ,  $L$ ,  $G$  i  $C$ , przy czym

$$\underline{Z} = R + j\omega L \quad (1)$$

$$\underline{Y} = G + j\omega C \quad (2)$$

Parametry falowe linii długiej  $\underline{\Gamma}$  (stała przenoszenia falowego) i  $\underline{Z}_f$  (impedancja falowa) wyznacza się z zależności

$$\underline{\Gamma} = \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} \quad (3)$$

$$\underline{Z}_f = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \quad (4)$$

Linia długa, o parametrach falowych  $\underline{\Gamma}$  i  $\underline{Z}_f$ , opisana jest równaniami (5) i (6), w których  $\underline{U}_1$  i  $\underline{I}_1$  oznaczają wartości skuteczne zespolone napięcia i prądu na początku linii, a  $\underline{U}_2$  i  $\underline{I}_2$  - wartości skuteczne zespolone napięcia i prądu na końcu linii.

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh(\underline{\Gamma}l) + \underline{Z}_f \underline{I}_2 \sinh(\underline{\Gamma}l) \quad (5)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_f} \sinh(\underline{\Gamma}l) + \underline{I}_2 \cosh(\underline{\Gamma}l) \quad (6)$$

Parametry falowe linii długiej wyznaczyć można na podstawie znajomości impedancji wejściowej linii w stanie jałowym  $\underline{Z}_j$  i stanie zwarcia  $\underline{Z}_z$  z zależności:

$$\underline{Z}_f = \sqrt{\underline{Z}_z \underline{Z}_j} \quad (7)$$

$$\tanh(\underline{\Gamma}l) = \sqrt{\frac{\underline{Z}_z}{\underline{Z}_j}} \quad (8)$$

Impedancje wejściowe linii w stanie jałowym  $\underline{Z}_j$  i stanie zwarcia  $\underline{Z}_z$  można w pewnych przypadkach (np. dla linii elektroenergetycznej) uzyskać w drodze pomiarowej. W przypadku podziemnego rurociągu, pomiarowe wyznaczenie impedancji wejściowej w stanie zwarcia jest niemożliwe – zwarcie rurociągu z ziemią daleką nastąpić może jedynie poprzez impedancję dołączoną do końca rurociągu. Konieczne jest zatem pośrednie wyznaczenie impedancji w stanie zwarcia w oparciu o pomiary dokonywane w stanie obciążenia linii. Znajomość impedancji  $\underline{Z}_j$  i  $\underline{Z}_z$  umożliwia wyznaczenie parametrów falowych linii ze wzorów (7) i (8), a następnie obliczenie parametrów jednostkowych linii  $R$ ,  $L$ ,  $G$  i  $C$  z zależności:

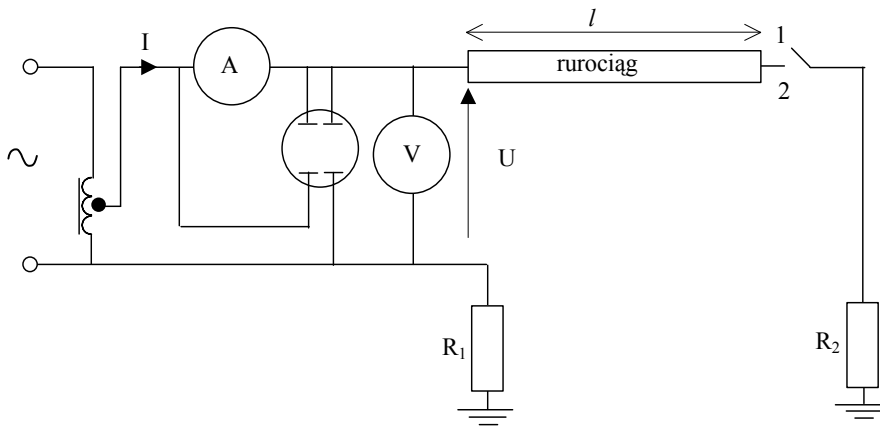
$$\underline{\Gamma Z}_f = R + j\omega L \quad (9)$$

$$\frac{\underline{\Gamma}}{\underline{Z}_f} = G + j\omega C \quad (10)$$

gdzie  $\omega$  oznacza pulsację.

### 3. Układ do pomiaru impedancji wejściowych rurociągu

Impedancje wejściowe linii w stanie jałowym i stanie obciążenia mierzy się w układzie przedstawionym na rys.2. Pomiar możliwy jest w przypadku, gdy odcinek rurociągu o znanej długości  $l$  odizolowany jest od sieci przesyłowej, a na obu końcach badanego odcinka wykonane są uziomy o znanych rezystancjach  $R_1$  i  $R_2$ . Rurociąg zasila się z jednego końca źródłem napięcia o częstotliwości 50 Hz, dołączonym między rurociąg i uziom  $R_1$ , podczas gdy drugi koniec rurociągu odłączony jest od uziomu  $R_2$  (stan jałowy) lub do niego dołączony (stan obciążenia). Podczas pomiaru mierzy się natężenie prądu doprowadzanego do rurociągu  $I$ , napięcie  $U$  między rurociągiem i uziomem  $R_1$  oraz wyznacza się kąt przesunięcia fazowego między napięciem i prądem. Podobne pomiary wykonać można zasilając rurociąg na drugim końcu, a uzyskane wyniki pomiaru uśrednić.



Rys.2. Układ do pomiaru impedancji wejściowych rurociągu

Impedancję wejściową rurociągu  $\underline{Z}_j$  oblicza się wg zależności:

$$\underline{Z}_j = \frac{U_{1j}}{I_{1j}} = \frac{U_j - I_{1j} R_1}{I_{1j}} \quad (11)$$

przy czym  $U_j$  i  $I_j$  oznaczają wartości skuteczne zespolone napięcia i prądu mierzone podczas stanu jałowego.

W przypadku wyznaczania impedancji wejściowej rurociągu przy obciążeniu go rezystancją  $R_2$  korzysta się z zależności:

$$\underline{Z}_o = \frac{U_{1o}}{I_{1o}} = \frac{U_o - I_{1o} R_1}{I_{1o}} \quad (12)$$

przy czym  $U_o$  i  $I_o$  oznaczają wartości skuteczne zespolone napięcia i prądu mierzone podczas obciążenia.

Impedancję wejściową rurociągu  $\underline{Z}_o$  można również wyznaczyć analitycznie jako stosunek napięcia do prądu na wejściu linii, wykorzystując zależności (5) i (6) oraz uwzględniając, że  $U_2 = I_2 R_2$ . Zatem:

$$\underline{Z}_o = R_2 \frac{1 + \frac{\underline{Z}_f}{R_2} \tanh(\Gamma l)}{\frac{R_2}{\underline{Z}_f} \tanh(\Gamma l)} \quad (13)$$

Stąd, po uwzględnieniu wzorów (7) i (8) oraz biorąc pod uwagę, że  $\underline{Z}_o$  jest impedancją wejściową rurociągu wyznaczoną pomiarowo wg równania (12), impedancję wejściową w stanie zwarcia  $\underline{Z}_z$  otrzymuje się w postaci:

$$\underline{Z}_z = \underline{Z}_o \left(1 + \frac{R_2}{\underline{Z}_j}\right) - R_2 \quad (14)$$

## 4. Wyznaczenie jednostkowych parametrów $R$ , $L$ , $G$ , $C$ podziemnych rurociągów

### 4.1. Pomiary na rurociągu DN 200

Do pomiarów wykorzystano odcinek rurociągu o długości ok. 32 km, pokryty izolacją PE, położony między słupą A i stacją redukcyjną B. W rejonie słupy A zaadaptowano do pomiarów uziom o rezystancji  $R_1 = 4,12 \Omega$ , natomiast w rejonie stacji redukcyjnej B uziom o rezystancji  $R_2 = 1,92 \Omega$ .

Podczas zasilania napięciem przemiennym o częstotliwości 50 Hz rurociągu od strony słupy A uzyskano wyniki:

- stan jałowy ( $R_2 = \infty \Omega$ )  
 $U = 60,3 \text{ V}$   
 $I = 3,1 \text{ A}$   
 $\varphi = 18^\circ$  (charakter pojemnościowy)
- stan obciążenia ( $R_2 = 1,92 \Omega$ )  
 $U = 60,5 \text{ V}$   
 $I = 2,05 \text{ A}$   
 $\varphi = 39,6^\circ$  (charakter indukcyjny).  
 Przy zasilaniu rurociągu od strony stacji redukcyjnej B zmierzono:
- stan jałowy ( $R_1 = \infty \Omega$ )  
 $U = 61,8 \text{ V}$   
 $I = 5,1 \text{ A}$   
 $\varphi = 32,4^\circ$  (charakter pojemnościowy)
- stan obciążenia ( $R_1 = 4,12 \Omega$ )  
 $U = 61,0 \text{ V}$   
 $I = 3,3 \text{ A}$   
 $\varphi = 21,6^\circ$  (charakter indukcyjny).

### 4.2. Pomiary na rurociągu DN 250

Do pomiarów wykorzystano odcinek rurociągu o długości  $l = 25,5 \text{ km}$ , pokryty izolacją bitumiczną, położony między stacją redukcyjną X i stacją redukcyjną Y. W rejonie stacji redukcyjnej X zaadaptowano do pomiarów uziom o rezystancji  $R_1 = 1,4 \Omega$ , natomiast w rejonie stacji redukcyjnej Y uziom o rezystancji  $R_2 = 0,5 \Omega$ .

Podczas zasilania rurociągu od strony stacji redukcyjnej X uzyskano wyniki:

- stan jałowy ( $R_2 = \infty \Omega$ )  
 $U = 20,7 \text{ V}$   
 $I = 11 \text{ A}$   
 $\varphi = 14,4^\circ$  (charakter pojemnościowy)

- stan obciążenia ( $R_2 = 0,5 \Omega$ )  
 $U = 20,2 \text{ V}$   
 $I = 11 \text{ A}$   
 $\varphi = 14,4^\circ$  (charakter pojemnościowy).  
 Przy zasilaniu rurociągu od strony stacji redukcyjnej Y zmierzono:
- stan jałowy ( $R_1 = \infty \Omega$ )  
 $U = 20,5 \text{ V}$   
 $I = 12,55 \text{ A}$   
 $\varphi = 25,2^\circ$  (charakter pojemnościowy)
- stan obciążenia ( $R_1 = 1,4 \Omega$ )  
 $U = 20,6 \text{ V}$   
 $I = 13 \text{ A}$   
 $\varphi = 23,4^\circ$  (charakter pojemnościowy).

#### 4.3. Obliczenia parametrów $R, L, G, C$ rurociągu DN 200

Obliczenia impedancji wejściowych rurociągu przy zasilaniu napięciem o częstotliwości 50 Hz wykonano zgodnie ze wzorami (11 – 14), a na ich podstawie wyznaczono parametry falowe rurociągu zgodnie z zależnościami (7) i (8), otrzymując:

$$\underline{Z}_f = 17,27 e^{j7,83^\circ} \Omega \text{ oraz } \underline{\Gamma} = 0,0352 \cdot 10^{-3} e^{j64,24^\circ} \frac{1}{m}$$

Na podstawie (9) i (10) otrzymano wartości parametrów  $R, L, G, C$ :

$$R = 0,187 \frac{m\Omega}{m} \quad (0,178)$$

$$L = 1,841 \frac{\mu H}{m} \quad (2,17)$$

$$G = 1,13 \frac{\mu S}{m} \quad (1,26 \text{ dla } r_u = 5 \cdot 10^4 \Omega \cdot m^2)$$

$$C = 5,41 \frac{nF}{m} \quad (6,94)$$

Wyniki w nawiasach odnoszą się do parametrów obliczonych ze wzorów teoretycznych [7].

W przypadku rurociągu pokrytego powłoką izolacyjną dobrej jakości – rurociąg DN 200 uzyskuje się wyniki obliczeń jednostkowych parametrów  $R, L, G, C$  zgodne z oczekiwanymi, bliskie wynikom uzyskiwanym z zależności analitycznych. Ze względu na niejednorodność badanego układu – rezystywność gruntu w rejonie śluzy A jest rzędu 50  $\Omega m$ , natomiast w rejonie stacji redukcyjnej B kilkaset  $\Omega m$ , pomiary wykonano na obu końcach odcinka rurociągu, a wyniki obliczeń impedancji wejściowych w stanie jałowym i w stanie obciążenia uśredniono.

#### 4.4. Obliczenia parametrów $R, L, G, C$ rurociągu DN 250

W przypadku rurociągu pokrytego powłoką izolacyjną złej jakości – rurociąg DN 250 nie jest możliwe uzyskanie na drodze analitycznej parametrów  $R, L, G, C$ . Ze względu na jakość izolacji, długość badanego odcinka rurociągu przekraczała tzw. długość krytyczną, a rurociąg był „elektrycznie długi”. Powodowało to, że impedancja wejściowa rurociągu bliska była impedancji falowej. Znalazło to odbicie w wynikach pomiaru stanu jałowego i stanu obciążenia – włączenie rezystancji na końcu odcinka rurociągu zmieniało w bardzo nieznacznym stopniu wskazania przyrządów pomiarowych – impedancja widziana od strony wejścia odpowiadała w przybliżeniu stanowi dopasowania falowego. Równość impedancji

rurociągu w stanie jałowym i w stanie zwarcia  $\underline{Z}_j \approx \underline{Z}_z$  sprawia, że wyznaczenie analityczne stałej przenoszenia falowego z zależności (15):

$$\tanh(\underline{\Gamma}l) = \sqrt{\frac{\underline{Z}_z}{\underline{Z}_j}} \approx 1 \quad (15)$$

może być obarczone poważnym błędem lub wręcz niemożliwe.

Z zależności (15) wynika, że

$$\coth(\underline{\Gamma}l) \approx \tanh(\underline{\Gamma}l) \approx 1 \quad (16)$$

a warunek ten, z wystarczającą do celów praktycznych dokładnością, spełniony jest w przypadku, gdy:

$$|\underline{\Gamma}l| \geq 2,5 \quad (17)$$

Z powyższych zależności wynika, że w przypadku rurociągów pokrytych powłoką izolacyjną złej jakości, długość krytyczna rurociągu sięga kilku kilometrów. Szacować można, że wynosi ona w przypadku rurociągu DN 250 ok. 4 km. Jest więc znacznie mniejsza od długości odcinka rurociągu objętego badaniami.

## 5. Uwagi końcowe

Opisana metoda pomiarowo – analityczna wyznaczania parametrów jednostkowych  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  rurociągów daje poprawne wyniki w przypadku stosowania jej dla rurociągów pokrytych powłokami izolacyjnymi dobrej jakości (odcinki badanego rurociągu są znacznie mniejsze od długości krytycznej).

W przypadku stosowania opisanej metody do wyznaczania parametrów elektrycznych rurociągów w powłoce izolacyjnej złej jakości, odcinek badany rurociągu powinien być krótszy od długości krytycznej (kilka kilometrów). Ponieważ w warunkach praktycznych trudno byłoby wyizolować od pozostałej części sieci przesyłowej tak krótki odcinek rurociągu, metoda powyższa nie nadaje się bez modyfikacji do zastosowania. W przypadku rurociągów „elektrycznie długich”, jak miało to miejsce dla rurociągu DN 250, należałoby oprócz pomiarów wykonywanych na wejściu rurociągu, mierzyć również napięcie na końcu odcinka, a także kąt przesunięcia fazowego między napięciem na wejściu i na wyjściu. Dysponując wynikami takich pomiarów, stałą przenoszenia falowego można wyznaczyć z równań linii długiej w stanie dopasowania falowego:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 e^{\underline{\Gamma}l} \quad (18)$$

a parametry jednostkowe  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  rurociągu obliczyć następnie wg zależności (9) i (10).

## Literatura

- [1] Böcker H., Oeding D.: *Induktionsspannungen an Pipelines in Trassen von Hochspannungs-Freileitungen*, Elektr.-Wirtsch., 1966, Bd. 65, s.157-170.
- [2] Dawalibi F.P., Southey R.D.: *Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. Part I: Computation methods*. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, Vol. 4, 3, s.1840-1846. *Part II: Parametric analysis*, IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, Vol. 5, 1, s. 415-421.
- [3] Favez B., Gougeuil J.C.: *Contribution to studies on problems resulting from the proximity of overhead lines with underground metal pipelines*, Proc. of the CIGRE Session, Paris, June 1966, paper 336, s. 1-30.
- [4] Feist K.H.: *Starkstrombeeinflussung*, Band 203, Kontakt und Studium, Sendelfingen, Expert Verlag 1986.

- [5] Kouteynikoff P., Rochereau H., Urbain J.P., Blanchet L.: *Proximity between VHV lines or substations and telecommunications systems or underground metallic pipelines*, Proc. of the CIGRE Session, Paris, August/September 1990, paper 36-201, s. 1-6.
- [6] Krakowski M.: *Obwody ziemnopowrotne*, Warszawa, WNT 1979.
- [7] Machczyński W.: *Oddziaływania elektromagnetyczne na obwody ziemnopowrotne - rurociągi podziemne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [8] Michajlov M.I., Razumov L.D.: *Električeskie parametry podzemnych metalličeskich turboprovodov*, *Električestvo*, 1963, 5, s. 60-64.
- [9] Pohl J.: *Induktive Beeinflussung von Rohrleitungen durch Erdkurzschluss- und Betriebsströme in 50 Hz Hochspannungsfreileitungen*, *Elektrizitätswirtschaft*, 1976, 75, 19, s. 593-599.
- [10] Striževskij J.V., Dmitrijev V.I.: *Teorija i rasčët vlijanija elektrificirovannoj železnoj dorogi na podzemnye metalličeskie sooruzhenija*, Moskva, Strojizdat 1968.
- [11] Sunde E.D.: *Earth conduction effects in transmission system*, New York, Dover 1968.
- [12] Kaiser G.: *Die elektrischen Konstanten von Rohrleitungen und ihre Messung*, *ETZ-A*, 1966, 22, s.792 – 796.