

Piotr CZARNYWOJTEK\*  
Wojciech MACHCZYŃSKI\*\*

## SYMULACJA ODDZIAŁYWANIA KONDUKTANCYJNEGO NA OBWODY ZIEMNOPOWROTNE

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie problematyki związanej z modelowaniem oddziaływania konduktancyjnego linii elektroenergetycznych W.N. na podziemne rurociągi, ze szczególnym uwzględnieniem zagrożenia porażeniowego powodowanego oddziaływaniami w stanie nieustalonym. Oddziaływanie konduktancyjne na rurociąg znajdujący się w polu elektrycznym prądu upływającego z uziomu przeprowadza się przy zastosowaniu pakietu symulacyjnego PSPICE. Jednorodny odcinek obwodu ziemnopowrotnego o znanych, pasywnych parametrach jednostkowych można symulować jako połączenie łańcuchowe czwórników typu  $\pi$ . Elementy aktywne modelu reprezentują zewnętrzne wymuszenie – potencjał skalarny pola elektrycznego. Czas trwania stanu nieustalonego symulowany jest za pomocą dwóch sterowanych napięciowo kluczy, zsynchronizowanych w czasie przy przełączaniu. Przeprowadzono przykładowe symulacje i przeanalizowano uzyskane wyniki dla potencjału oraz gęstości prądu upływu rurociągu.

SŁOWA KLUCZOWE: obwody ziemnopowrotne, oddziaływanie konduktancyjne, symulacja, stan nieustalony

### 1. WPROWADZENIE

Obwody ziemnopowrotne należą do klasy obwodów elektrycznych zawierających ziemię, w których prąd przepływa zarówno w przewodach elektrycznych, jak i w samej ziemi. Obwody ziemnopowrotne występują między innymi w elektroenergetyce, telekomunikacji, trakcji elektrycznej i ochronie katodowej. Należą do nich rurociągi, kable energetyczne i telekomunikacyjne, szyny trakcji elektrycznej prądu stałego, sieć jezdna i napowietrzna trakcji elektrycznej prądu przemiennego, linie elektroenergetyczne z uziemionymi punktami zerowymi itp.

Konieczność oszczędnej gospodarki terenami, zwłaszcza w rejonach zindustrializowanych, sprawia, że tworzy się tzw. korytarze przesyłu energii, w których grupuje się napowietrzne linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia,

---

\* Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu.

\*\* Politechnika Poznańska.

urządzenia trakcji elektrycznej, kable energetyczne i teletechniczne oraz magistralne rurociągi wody, gazu i paliw płynnych. Długość takich korytarzy może dochodzić do kilkuset kilometrów. Zbliżenie tras obwodów ziemnopowrotnych do źródeł pola elektromagnetycznego stwarza zagrożenia wynikające z oddziaływań indukcyjnych oraz konduktancyjnych.

Oddziaływanie indukcyjne może zachodzić zarówno w stanie normalnej pracy linii elektroenergetycznej (oddziaływanie długotrwałe), jak i w stanach zakłóceń (oddziaływanie krótkotrwałe). Krótkotrwałe oddziaływanie konduktancyjne występuje podczas zwarć jednofazowych z ziemią w sieciach najwyższych napięć pracujących ze skutecznie uziemionym punktem zerowym. Zwarcia w linii elektroenergetycznej mają charakter przypadkowy i są praktycznie nie do uniknięcia. Wartości prądów jednofazowego zwarcia doziemnego sięgają 100 kA (w warunkach krajowych 30-40 kA). Zwarcia z ziemią są wyłączane w czasie nie przekraczającym 0,5 s. Potencjał wzbudzany w rurociągu może osiągać wartość do kilku kV. Stwarza to zagrożenie dla rurociągów i urządzeń do nich dołączonych oraz dla ich obsługi. Istnieje także niebezpieczeństwo wybuchu lub pożaru w przypadku upływu gazu lub paliw z rurociągu.

W wielu przypadkach praktycznych oraz na etapie projektowania tras np. rurociągów przydatnym narzędziem dla określania intensywności oddziaływań jest komputerowa symulacja. Znajomość mechanizmów sprzężeń, zastępczych parametrów elektrycznych rurociągów podziemnych oraz modeli obliczeniowych jest konieczna dla umiejętnego posługiwania się tym narzędziem.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie i przybliżenie problematyki związanej z modelowaniem oddziaływania konduktancyjnego linii elektroenergetycznych W.N. na podziemne rurociągi, ze szczególnym uwzględnieniem zagrożenia porażeniowego powodowanego oddziaływaniami w stanie nieustalonym.

## 2. MODELOWANIE ODDZIAŁYWANIA KONDUKTANCYJNEGO NA RUROCIĄG PODZIEMNY

W rurociągu, traktowanym jako elektryczna linia długa znajdująca się w zewnętrznym, pierwotnym polu elektromagnetycznym, zostaje wzbudzona siła elektromotoryczna wymuszająca przepływ prądu wzdłuż linii. Schemat zastępczy elementarnego odcinka linii ma postać jak na rys. 1 [1].

Przyjmąwszy, że parametry elektryczne  $Z$  i  $Y$  linii długiej są wielkościami stałymi, a linia jest równoległa do osi  $0x$  układu współrzędnych prostokątnych, układ z rys. 1 jest opisany równaniami [1, 2, 3]:

$$\frac{dV(x)}{dx} + ZI(x) = E^0(x) \quad (1)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -YV(x) \quad (2)$$

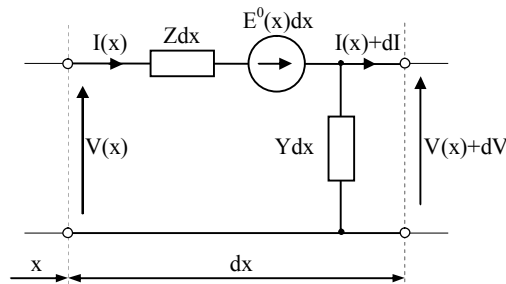
Po zróżniczkowaniu równania (2) względem  $x$  otrzymuje się z równania (1)

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} - \Gamma_0^2 I(x) = -YE^0(x) \quad (3)$$

przy czym

$$\Gamma_0 = \sqrt{ZY}, \quad \text{Re}(\Gamma_0) > 0 \quad (4)$$

i jest stałą przenoszenia linii długiej.



Rys. 1. Schemat zastępczy odcinka linii długiej z rozłożonym wymuszeniem zewnętrznym;  
 $Z$  impedancja linii na jednostkę długości,  $Y$  admitancja linii na jednostkę długości,  
 $E^0(x)$  siła elektromotoryczna na jednostkę długości o wartości zależnej od położenia,  
 reprezentująca zewnętrzne wymuszenie

Funkcja

$$I(x) = \frac{Y}{2\Gamma_0} \int_{-\infty}^{\infty} E^0(v) e^{-\Gamma_0|x-v|} dv = \frac{1}{2Z_0} [e^{-\Gamma_0 x} \int_{-\infty}^x E^0(v) e^{\Gamma_0 v} dv + e^{\Gamma_0 x} \int_x^{\infty} E^0(v) e^{-\Gamma_0 v} dv] \quad (5)$$

jest rozwiązaniem równania różniczkowego (3), a

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}, \quad \text{Re}(Z_0) > 0 \quad (6)$$

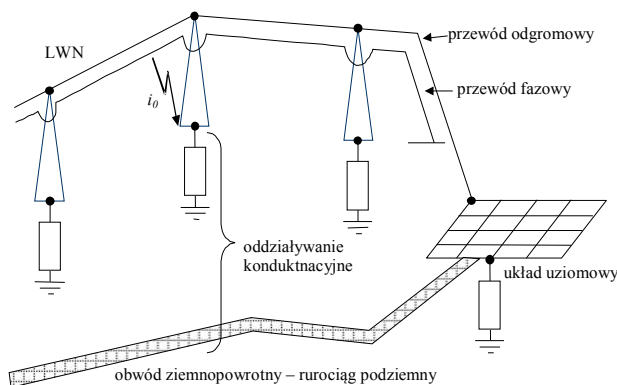
i jest impedancją charakterystyczną linii długiej.

Napięcie wzdłuż linii długiej wyznacza się na podstawie równań (2) i (5):

$$V(x) = \frac{1}{2} [e^{-\Gamma_0 x} \int_{-\infty}^x E^0(v) e^{\Gamma_0 v} dv - e^{\Gamma_0 x} \int_x^{\infty} E^0(v) e^{-\Gamma_0 v} dv] \quad (7)$$

Schemat zastępczy oraz równania różniczkowe (1) i (2) umożliwiają analityczne wyznaczenie prądów i potencjałów wzdłuż podziemnego rurociągu w niewielu prostych przypadkach [2], jeżeli znane są jego parametry elektryczne  $Z$  i  $Y$  oraz natężenie pierwotnego pola elektrycznego, wytworzonego w ziemi wzdłuż trasy rurociągu.

Rysunek 2 obrazuje przykładowe oddziaływanie konduktancyjne linii wysokiego napięcia na znajdujący się w pobliżu obwód ziemnopowrotny.



Rys. 2. Oddziaływanie konduktancyjne LWN na rurociąg

### 3. MODEL SYMULACYJNY W PSPICE

Oddziaływanie konduktancyjne na rurociąg znajdujący się w polu elektrycznym prądu upływającego z uziomu przeprowadza się przy zastosowaniu pakietu symulacyjnego PSPICE [3 – 5].

Jednorodny odcinek obwodu ziemnopowrotnego (o parametrach jednostkowych  $Z'$ ,  $Y' = \text{const}$ ) o długości  $l$  można symulować jako połączenie łańcuchowe czwórników typu  $\pi$  jak pokazano na rys. 3. Wartości elementów podstawowego obwodu wyznacza się z zależności:

$$R = \text{Re}(Z), \quad \omega L = \text{Im}(Z), \quad G = \text{Re}\left(\frac{Y}{2}\right), \quad \omega C = \text{Im}\left(\frac{Y}{2}\right), \quad (8)$$

gdzie impedancja wzdłużna obwodu ziemnopowrotnego określona jest wzorem

$$Z = Z_0 \sinh(\Gamma l), \quad (9)$$

a admitancja poprzeczna

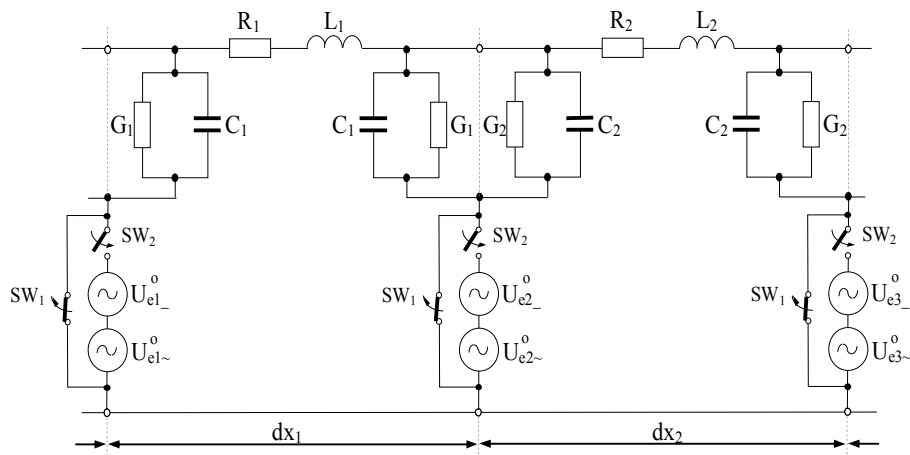
$$Y = \frac{2 \tanh\left(\Gamma \frac{l}{2}\right)}{Z_0} \quad (10)$$

Oddziaływanie konduktancyjne w modelu z rys. 3 reprezentują źródła napięciowe  $U_{e\_}^{\circ}$  i  $U_{e\_}^{\sim}$ , których wartość wyznaczana jest ze wzoru

$$U_{e\_}^{\circ}(P) = \int_s^{\infty} E_r dr = \frac{i_0}{2\pi\sigma s}, \quad (11)$$

oznaczającego potencjał skalarny pochodzący od natężenia pola elektrycznego uziomu linii wysokiego napięcia, w której nastąpiło zwarcie doziemne. Potencjał skalarny wytwarzany jest przez prąd  $i_0$  wypływający przez uziom do ziemi, gdzie  $\sigma$  - konduktywność gruntu,  $s$  - odległość punktu obserwacji  $P$  od uziomu punkowego (rys. 4), obliczana ze wzoru

$$s = \sqrt{dl^2 + d^2} . \quad (12)$$



Rys. 3. Model dwóch podstawowych odcinków obwodu ziemnopowrotnego typu  $\pi$ -połączonych łańcuchowo, z oddziaływaniem konduktancyjnym w stanie nieustalonym

Zakładając, że prąd  $i_0$  jest skutkiem powstania zwarcia w linii WN można przyjąć, że składa się on z dwóch składowych: ustalonej (sinusoidalnej)  $i_{0-}$  oraz przejściowej (wykładniczej)  $i_{0-}$  określonych zależnościami

$$i_0 = i_{0-} + i_{0-} = I_m \left[ \sin(\omega(t - t_0) + \delta - \varphi) - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \sin(\delta - \varphi) \right] \quad (13)$$

gdzie

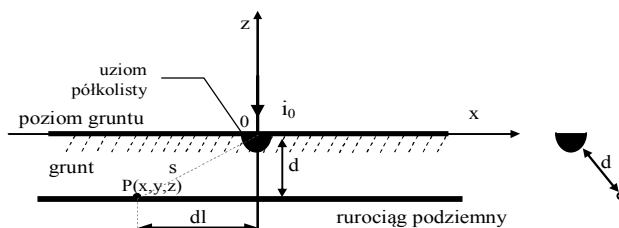
$$I_m = \sqrt{2} \cdot I , \quad \varphi = \arctan \frac{\omega L_{LWN}}{R_{LWN}} , \quad \tau = \frac{L_{LWN}}{R_{LWN}} , \quad (13)$$

$\delta$  jest fazą początkową napięcia (w symulacjach najczęściej przyjmuje się odniesienie  $\delta = 0$ ),  $I$  jest wartością skuteczną prądu,  $R_{LWN}$ ,  $L_{LWN}$  są parametrami linii wysokiego napięcia.

Czas trwania stanu nieustalonego (początek  $t_0$  i koniec  $t_1$ ) symulowany jest za pomocą dwóch sterowanych napięciowo kluczy  $SW_1$  i  $SW_2$ , zsynchronizowanych w czasie przy przełączaniu (gdy jeden jest zamykany to drugi otwiera się i na odwrót).

#### 4. WYNIKI OBLICZEŃ

Przeprowadzono symulacje dla układu przedstawionego na rys. 4.

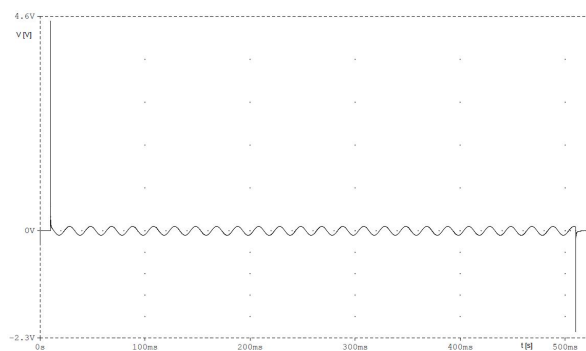


Rys. 4. Układ: uziom półkolisty – rurociąg podziemny

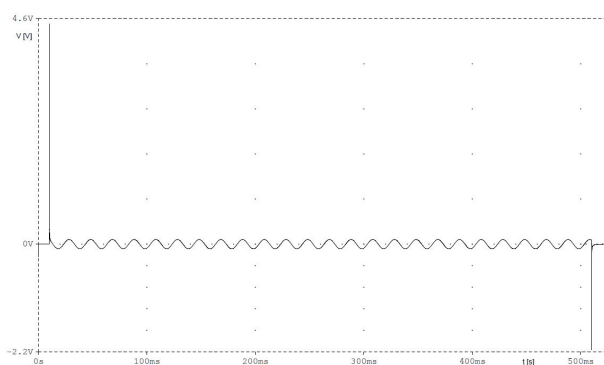
Obwód ziemnowrotny (rurociąg podziemny) o długości  $l = 12$  km podzielono na 192 odcinki o różnych długościach  $dx$  ( $10 \times 0,5$ m,  $10 \times 1$ m,  $10 \times 2,5$ m,  $10 \times 5$ m,  $10 \times 7,5$ m,  $10 \times 10$ m,  $10 \times 25$ m,  $8 \times 50$ m,  $6 \times 75$ m,  $4 \times 100$ m,  $3 \times 250$ m,  $2 \times 500$ m,  $2 \times 750$ m,  $1 \times 985$ m). Przyjęto, że uziom znajduje się w środku modelowanego odcinka (6 km), a odcinki rozłożone są symetrycznie względem niego. Poszczególne odcinki zamodelowano przy pomocy oczek typu  $\pi$  (jak na rys. 3) o parametrach przeliczonych dla jednostkowej długości  $dx$ . Parametry rurociągu wynoszą:  $R' = 0,16 \Omega/\text{km}$ ,  $L' = 2,89 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $G' = 0,83 \text{ S}/\text{km}$ ,  $C' = 63 \mu\text{F}/\text{km}$ . Oddziaływanie konduktancyjne zamodelowano źródłami napięciowymi reprezentującymi składową ustaloną i przejściową, których wartości wyliczono na podstawie wzorów (11) i (13) oraz odległości  $s$  od uziomu. Założono, że na 6 kilometrów modelowanego układu, uziom znajduje się w odległości  $d = 10$  m od rurociągu. W symulacji przyjęto wartość skuteczną prądu  $I = 1$  A, stałą czasową  $\tau = 423,7 \mu\text{s}$  (dla LWN o parametrach:  $R'_{LWN} = 0,118 \Omega/\text{km}$ ,  $L'_{LWN} = 0,05 \text{ mH}/\text{km}$ ). Konduktywność gruntu  $\sigma = 10^{-2} \text{ S}/\text{m}$ . Przyjęto, że czas trwania stanu nieustalonego wynosi  $t_1 = 0,5$  s, a chwila jego rozpoczęcia  $t_0 = 0,01$ s (w modelu z rys. 3 symulowane za pomocą naprzemiennie przełączanych kluczy  $SW_1$  i  $SW_2$ ). Przeprowadzono symulacje dla różnych wartości kąta  $\varphi = -90^\circ$ ,  $-75^\circ$ ,  $-45^\circ$  dla modelu rurociągu odizolowanego na końcach i w jednym przypadku ( $\varphi = -90^\circ$ ) z obciążeniem falowym ( $Z_f = 0,8045 + j0,6553 \Omega$  i stąd  $R_f = 0,8045 \Omega$ ,  $L_f = 2,085 \text{ mH}$ ). Przebiegi czasowe potencjału  $V$  oraz gęstości prądu  $J$  (w 6 km modelowanego układu) uzyskane w symulacjach w programie PSPICE zaprezentowano na rys. 5–14.

Porównując przebiegi dla potencjału (rys. 5 i rys. 6) oraz gęstości prądu upływu (rys. 9 i rys. 10) można zauważyć, że nie ma różnic w uzyskanych wynikach dla modelu rurociągu nie obciążonego na końcach i z obciążeniem falowym. W obu przypadkach początkowo potencjał rurociągu osiąga wartość 4,5 V, a gęstość prądu upływu  $-41,5 \text{ mA}/\text{m}^2$ . Czas trwania początkowych pików

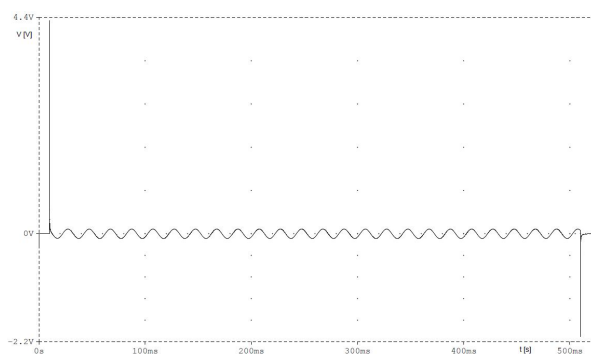
nie przekracza 1 ms (rys.13 i 14), po czym przebiegi mają charakter sinusoidalny o znacznie mniejszej amplitudzie (odpowiednio 0,1 V i 3 mA/m<sup>2</sup>). Trzeba zauważyć pojawienie się pików również przy wyłączaniu zwarcia, jednak o mniejszych wartościach.



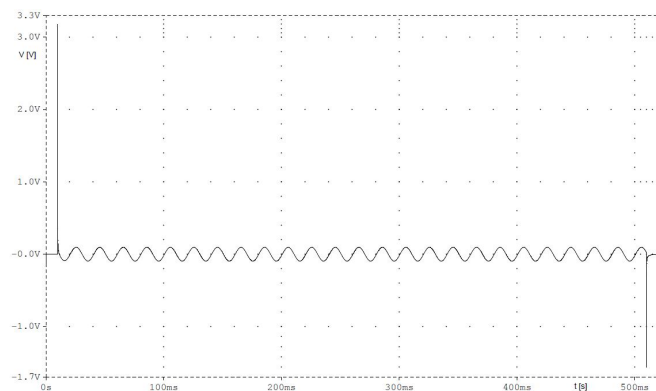
Rys. 5. Potencjał rurociągu ( $x = 6$  km,  $\varphi = -90^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)



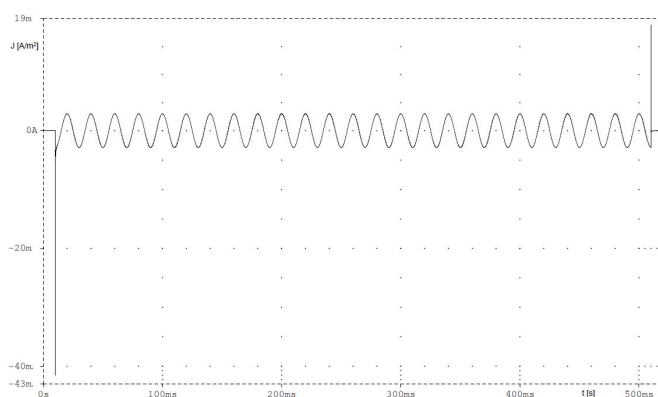
Rys. 6. Potencjał rurociągu ( $x = 6$  km,  $\varphi = -90^\circ$ , model rurociągu obciążonego falowo)



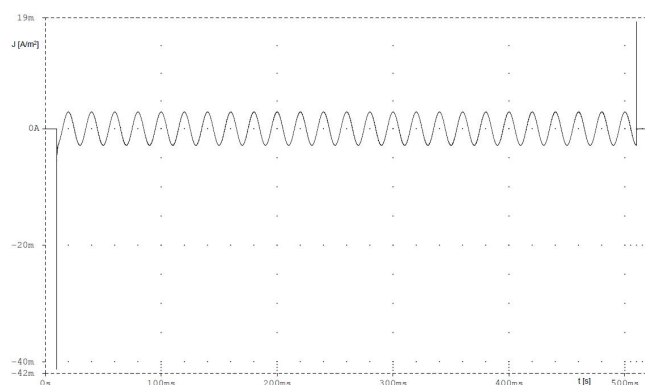
Rys. 7. Potencjał rurociągu ( $x = 6$  km,  $\varphi = -75^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)



Rys. 8. Potencjał rurociągu ( $x = 6$  km,  $\varphi = -45^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)

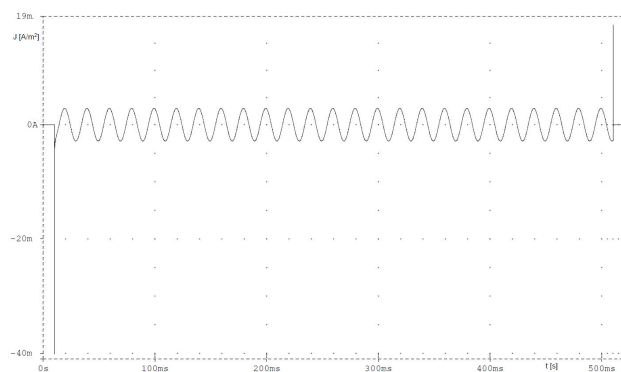


Rys. 9. Gęstość prądu upływu rurociągu  
( $x = 6$  km,  $\varphi = -90^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)

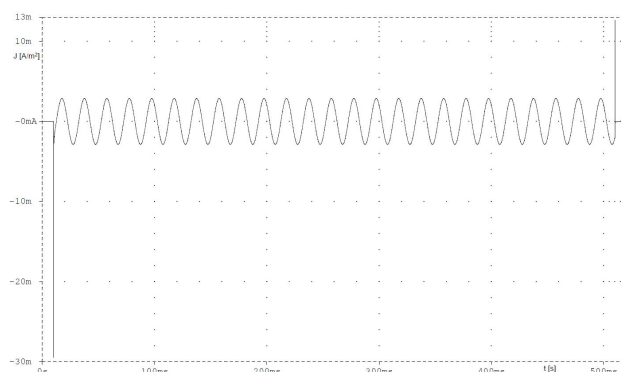


Rys. 10. Gęstość prądu upływu rurociągu  
( $x = 6$  km,  $\varphi = -90^\circ$ , model rurociągu obciążonego falowo)

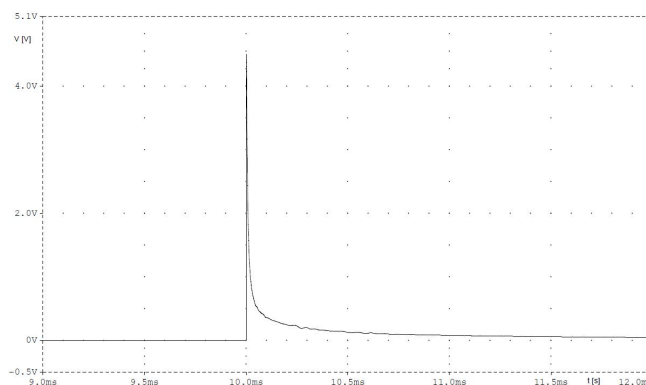




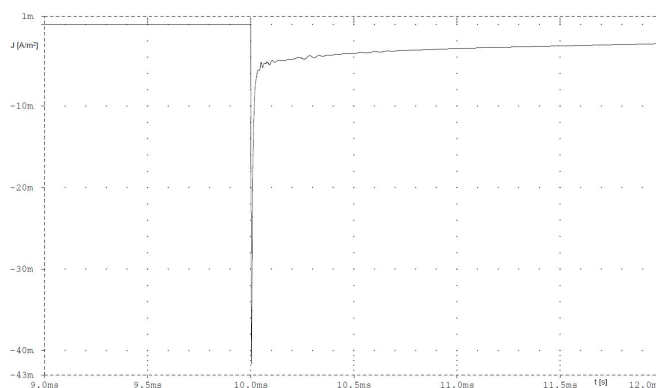
Rys. 11. Gęstość prądu upływu rurociągu  
( $x = 6 \text{ km}$ ,  $\varphi = -75^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)



Rys. 12. Gęstość prądu upływu rurociągu  
( $x = 6 \text{ km}$ ,  $\varphi = -45^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)



Rys. 13. Potencjał rurociągu w otoczeniu  $t_0 = 0,01\text{s}$  - chwila powstania stanu nieustalonego  
( $x = 6 \text{ km}$ ,  $\varphi = -90^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)



Rys. 14. Gęstość prądu upływu rurociągu w otoczeniu  $t_0 = 0,01s$  - chwila powstania stanu nieustalonego ( $x = 6 \text{ km}$ ,  $\varphi = -90^\circ$ , model rurociągu odizolowanego na końcach)

Wpływ momentu powstania zwarcia w linii WN na wielkość oddziaływania konduktancyjnego na pobliski rurociąg można ocenić porównując uzyskane przebiegi w zależności od wartości kąta  $\varphi$  (wzór (13)). Potencjał rurociągu osiąga największą początkową wartość przy  $\varphi = -90^\circ$  (rys. 5:  $V = 4,5 \text{ V}$ ) i zmniejsza się odpowiednio dla  $\varphi = -75^\circ$  (rys. 7:  $V = 4,4 \text{ V}$ ) i  $\varphi = -45^\circ$  (rys. 8:  $V = 3,2 \text{ V}$ ). Podobnie gęstość prądu upływu rurociągu uzyskuje następujące wartości: przy  $\varphi = -90^\circ$  (rys. 9:  $J = -41,5 \text{ mA/m}^2$ ),  $\varphi = -75^\circ$  (rys. 11:  $J = -40 \text{ mA/m}^2$ ) i  $\varphi = -45^\circ$  (rys. 12:  $J = -30 \text{ mA/m}^2$ ). Im dalej od maksimum sinusoidy składowej ustalonej prądu zwarcia doziemnego w LWN, tym mniejszy jest wpływ składowej przejściowej w oddziaływaniu konduktancyjnym na pobliski rurociąg.

Im dalej od uziomu ( $dl \neq 0$ ) tym wpływ oddziaływania konduktancyjnego na rurociąg jest mniejszy.

Warto również podkreślić, że uzyskane w symulacjach wartości odnoszą się do jednostkowego wymuszenia (wartość skuteczna prądu  $I = 1 \text{ A}$ ), a w przypadku zwarcia doziemnych prąd może być znacząco większy. Zatem pojawiające się w tych warunkach oddziaływanie na rurociąg może stanowić realne zagrożenie porażeniowe.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano model oddziaływania konduktancyjnego na obwody ziemnopowrotne. Przedstawiono metodę symulacji komputerowej z użyciem programu PSPICE, uwzględniającą oddziaływanie konduktancyjne LWN na pobliski rurociąg w stanie nieustalonym wywołanym powstaniem w linii zwarcia doziemnego. Bazując na zaprezentowanym modelu przeprowadzono

symulacje i przeanalizowano uzyskane wyniki dla potencjału oraz gęstości prądu upływu rurociągu.

Można stwierdzić, że prezentowana metoda jest efektywna i poprawna, ale wymaga znajomości zastępczych parametrów obwodu ziemnopowrotnego oraz modeli obliczeniowych. W przypadku niejednorodności gruntu model i sposób symulacji pozostaje bez zmian. Należy w nim jednak uwzględnić zmienność parametrów, co skutkuje koniecznością użycia większej ilości oczek z różnymi parametrami, a w efekcie większą pracochłonnością na etapie przygotowania modelu.

### LITERATURA

- [1] Krakowski M.: Obwody ziemnopowrotne. Warszawa, WNT 1979.
- [2] Sunde E.D.: Earth conduction effects in transmission system. New York, Dover 1968.
- [3] Czarnywojtek, P.; Machczyński W.: Analysis of power line transients on earth return circuits using simulation programs. 11<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zürich, March 7-9, 1995, pp. 69-72.
- [4] Machczyński W.: Oddziaływania elektromagnetyczne na obwody ziemnopowrotne - rurociągi podziemne. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [5] Czarnywojtek P., Machczyński W.: Computer simulation of responses of earth-return circuits to the a.c. and d.c. external excitation. European Transactions on Electrical Power, ETEP Vol. 13, No. 3, May/June 2003, pp. 173 - 184.

### SIMULATION OF CONDUCTIVE EFFECTS ON EARTH RETURN CIRCUITS

The use of the circuit simulation package SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) permits the complex analysis of the EMI (electromagnetic interference) on earth-return circuits (pipelines). In the approach presented, the earth-return circuit with conductive excitation by a.c. signals and transients is modelled as a large multinode electrical equivalent circuit. The circuit is a chain of basic circuits, which are equivalents of homogenous sections of the earth-return circuit with uniform exposure to the primary interfering electric field associated with the conductive influence. The application of voltage sources and switches in the basic circuits permit the modelling of transient coupling effects in systems considered. The SPICE simulation is an alternative and a useful approach to the analysis of EMI problems in earth-return circuits, when comparing with existing analytical and numerical solutions. The usefulness of the SPICE simulation has been illustrated by examples.

*(Received: 1. 02. 2016, revised: 7. 03. 2016)*