



**MODELOWANIE ODDZIAŁYWANIA
LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH NA RUROCIĄGI
PODZIEMNE Z UWZGLĘDNIENIEM MODELU KOROZJI
PRZEMIENNOPRĄDOWEJ**

**MODELING OF THE INDUCTIVE INTERFERENCE
OF POWER LINES ON UNDERGROUND PIPELINES
WITH AC CORROSION TAKING INTO ACCOUNT**

Krzysztof Budnik, Piotr Czarnywojtek, Wojciech Machczyński

Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej

Słowa kluczowe: linia elektroenergetyczna, rurociąg, sprzężenie indukcyjne, korozja przemiennoprądowa

Keywords: power line, pipeline, inductive interference, AC corrosion

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie modelowania oddziaływania indukcyjnego linii elektroenergetycznej na pobliski rurociąg podziemny z uwzględnieniem korozji przemiennoprądowej. Przedstawiono schemat zastępczy rurociągu podziemnego ze sprzężeniem indukcyjnym. Omówiono schemat zastępczy korozji AC. Zaprezentowano sposób modelowania w pakiecie Matlab – Simulink. Przedstawiono wyniki przykładowych symulacji.

Summary

The paper presents AC corrosion on the metallic pipelines under the inductive influence of power lines. An electrical equivalent diagram is presented and the corrosion current, the pipeline potential to the adjacent earth and corrosion rate are calculated. The use of a platform for multidomain simulation and model-based-design of dynamic systems Matlab – Simulink permits the complex analysis of the electromagnetic interference on pipelines, whereas the electrochemical phenomena on the interface metal – soil are taken into account. The block connected with the AC corrosion in which the electrochemical phenomena are represented by the non-linear Butler-Volmer equations has been implemented in the simulation package.

1. Wprowadzenie

W rejonach zbliżenia tras rurociągów podziemnych i napowietrznych linii elektroenergetycznych prądu przemiennego istnieje niebezpieczeństwo indukowania się w rurociągu napięć przemiennych o wartościach, które mogą stanowić zagrożenie porażeniowe i korozyjne. Intensywność zjawiska wiąże się ze stosowaniem coraz doskonalszych powłok izolacyjnych rurociągów i nasila się ze wzrostem wartości prądów roboczych linii elektroenergetycznych oraz długości odcinków, na jakich następuje zbliżenie tras [1, 2].

Pierwsze przypadki uszkodzeń rurociągów podziemnych korozją prądu przemiennopięciowego (AC) zaobserwowano na latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Charakterystyczną cechą uszkodzenia są lejkowate wżery w ścianie rurociągu. Badania i analiza tego zjawiska pozwoliły stwierdzić, że pierwsze przypadki uszkodzeń i realne zagrożenie korozyjne rurociągów pojawiły się wraz ze wzrostem jakości powłok izolacyjnych. W przypadku nowoczesnych powłok, na przestrzeni wielu kilometrów występują nieliczne punktowe uszkodzenia izolacji. Rejestrowane gęstości prądu przemiennego upływającego z rurociągu w miejscu tych uszkodzeń stały się na tyle duże, że zaczęło stanowić to realne zagrożenie [3, 4].

Niniejszy artykuł rozszerza zagadnienie modelowania obwodów ziemnopowrotnych o zjawisko korozji AC, tzn. wywołanej przepływem prądu przemiennego z części stalowej rurociągu mającej kontakt z ziemią.

2. Schemat zastępczy rurociągu podziemnego

Rurociąg podziemny znajdujący się w zasięgu zewnętrznego pola elektromagnetycznego, pochodzącego np. od prądu przepływającego w pobliskiej linii elektroenergetycznej, jest obwodem ziemnopowrotnym stykającym się z ziemią przez niedoskonałą izolację. W modelowaniu stosuje się teorię linii długiej. W linii długiej znajdującej się w zewnętrznym polu elektromagnetycznym indukuje się siła elektromotoryczna, która powoduje przepływ prądu wzdłuż linii [1, 2].

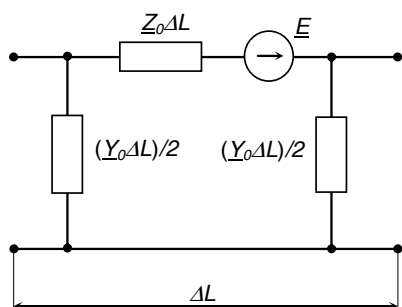
Na rys. 1 przedstawiono schemat zastępczy elementarnego odcinka linii długiej o długości ΔL w postaci czwórnik symetrycznego typu π o parametrach skupionych. Wielkości \underline{Z}_0 i \underline{Y}_0 to odpowiednio jednostkowa impedancja wzdłużna oraz jednostkowa admitancja poprzeczna rurociągu podziemnego, które zależą od parametrów rurociągu (wymiarów geometrycznych przekroju poprzecznego rurociągu oraz materiałów, z jakich jest wykonany), właściwości otaczającego gruntu, głębokości ułożenia rurociągu, częstotliwości czynników wymuszających itp. \underline{E} jest siłą elektromotoryczną indukowaną w odcinku rurociągu o długości ΔL przez czynniki zewnętrzne. Obwód zastępczy rurociągu podziemnego dla warunków quasi-stacjonarnych, powstaje poprzez łańcuchowe połączenie n obwodów elementarnych [1, 2].

Obliczanie siły elektromotorycznej indukowanej w rurociągu wymaga obliczenia impedancji wzajemnej \underline{Z}_m w układzie rurociąg podziemny napowietrzna linia elektroenergetyczna oraz znajomości prądów roboczych I . Impedancja wzajemna zależy od geometrii zbliżenia tras oraz konduktywności gruntu [5, 6].

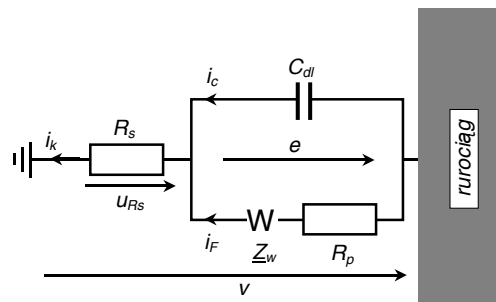
3. Korozja prądu przemiennopięciowego

Na rys. 2 przedstawiono obwód zastępczy Randlesa dla korozji AC, nieosłoniętej części stalowej rurociągu, narażonej na bezpośredni kontakt z elektrolitem glebowym [7, 8, 9, 10].

Jako e oznaczono potencjał rurociągu względem ziemi bliskiej, v to potencjał rurociągu względem ziemi dalekiej. Wypadkowy prąd wypływający z uszkodzenia i_k jest sumą dwóch składowych: i_c składowej związanej z obecnością podwójnej warstwy elektrycznej i i_F prądu faradajowskiego związanego z kinetyką procesu korozji. Małe litery oznaczają, że są to sygnały zależne od czasu.



Rys. 1. Schemat zastępczy elementarnego odcinka rurociągu podziemnego



Rys. 2. Obwód Randlesa dla korozji AC

Rezystancja przejścia R_s (rezystancja rozptywu), związana jest z upływem prądu z rurociągu do otaczającego środowiska jest funkcją konduktywności gruntu γ , pola powierzchni uszkodzenia izolacji rurociągu A oraz geometrii uszkodzenia i wyraża się wzorem [11]:

$$R_s = \frac{0,266}{\gamma \sqrt{A}} \quad (1)$$

Obecność w schemacie zastępczym kondensatora C_{dl} związana jest ze zjawiskiem rozdzielania ładunków na granicy elektroda – elektrolit. Takie rozdzielanie ładunków jest, w uproszczeniu, równoważne modelowi kondensatora płasko-równoległego, którego jedną okładkę stanowi naładowana powierzchnia metalu, drugą zaś pewna płaszczyzna w roztworze elektrolitu, na której zgromadził się ładunek przeciwnego znaku. W większości przypadków pojemność PWE jest wartością z zakresu 20–60 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ pola powierzchni uszkodzenia pokrycia izolacyjnego rurociągu [7, 9].

Impedancja Warburga Z_w związana jest ze zjawiskiem dyfuzji, czyli transportem reagentów z głębi roztworu do miejsca reakcji, objawiającym się również gradientem stężeń. Zjawisko dyfuzji oraz odpowiadająca jej na schemacie zastępczym impedancja Warburga, jest czynnikiem ograniczającym, tłumiącym reakcję elektrodową, a w konsekwencji prąd reakcji. W dalszej części pracy zakłada się, że w symulacjach oddziaływania o częstotliwości 50 Hz wpływ dyfuzji na przebieg reakcji elektrodowej jest pomijalnie mały [7, 8, 9].

Rezystancja przeniesienia elektronu R_p reakcji elektrodowych, związana jest z kinetyką procesu korozji. Charakterystyki prądowo napięciowe reakcji towarzyszących korozji AC są opisane wykładniczymi równaniami Volmera–Butlera. W dalszej części pracy przyjmuje się równanie Volmera–Butlera dla korozji żelaza, opisujące anodową reakcję rozpuszczania stali i katodową reakcję depolaryzacji w postaci [8, 9]:

$$j_F = j_0 \left(e^{\frac{2.303(E-E_k)}{\beta_a}} - e^{-\frac{2.303(E-E_k)}{\beta_c}} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- E_k – wypadkowy potencjał korozji (potencjał spoczynkowy),
- E – potencjał rurociągu względem ziemi bliskiej,
- j_0 – wypadkowy prąd wymiany (gęstość prądu korozji),
- j_F – gęstość prądu faradajowskiego,
- β_a – stała Tafela reakcji anodowej,
- β_c – stała Tafela reakcji katodowej.

Szybkość korozji

Szybkość korozji r definiowana jest jako ubytek materiału z powierzchni elektrody znajdującej się w elektrolicie, np. konstrukcji stalowej rurociągu narażonego na bezpośredni kontakt z elektrolitem glebowym, wyrażana w milimetrach na rok [mm/a] [9, 10].

$$r = 3,2766 \frac{I_{Fa} \cdot a}{A \cdot n \cdot D} \cdot 10^3 \quad (3)$$

gdzie:

- 3,2766 – bezwymiarowy współczynnik konwersji jednostek, bazujący na stałej Faradaya,
- A – powierzchnia elektrody,
- D – gęstość stali ($7,87 \text{ g/cm}^3$),
- a – masa atomowa żelaza (55,8 g),
- n – wartościowość (2),
- I_{Fa} – wartość średnia składowej anodowej prądu faradajowskiego.

4. Modelowanie rurociągu podziemnego z uwzględnieniem korozji AC

Symulacje przeprowadza się w pakiecie Matlab–Simulink. Zakłada się, że rurociąg ma długość L , na całej długości występuje sprzężenie indukcyjne z napowietrznym przewodem. Rurociąg modeluje się za pomocą n połączonych łańcuchowo podstawowych oczek (rys. 1). Długość elementarnego odcinka rurociągu (podziałka rurociągu) ΔL . Zakłada się, że rurociąg pracuje w stanie jałowym (odizolowane końce rurociągu). Oddziaływanie indukcyjne w rozpatrywanym obwodzie modeluje się jako siły elektromotoryczne e_k umieszczone w gałęziach wzdłużnych (rys. 3) [12, 13].

Na rys. 3 prądy podłużne oznaczono i_k , prądy upływu i_{0k} , potencjały względem ziemi dalekiej – potencjały węzłów v_k , numerując je od lewej do prawej.

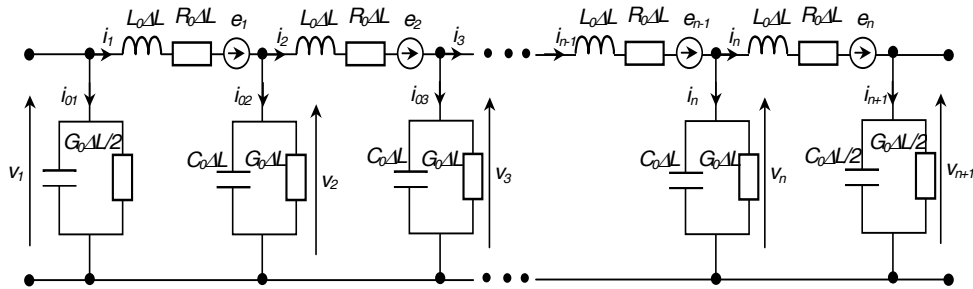
Dla układu jak na rys. 3, prądowe i napięciowe prawa Kirchhoffa dla poszczególnych oczek przyjmują postać:

$$\frac{di_k}{dt} = -\frac{R_0}{L_0} i_k + \frac{1}{L_0 \Delta L} v_k - \frac{1}{L_0 \Delta L} v_{k+1} + \frac{1}{L_0 \Delta L} e_k \quad \text{dla } k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\frac{dv_1}{dt} = -\frac{2}{C_0\Delta L}i_1 - \frac{G_0}{C_0}v_1$$

$$\frac{dv_k}{dt} = \frac{1}{C_0\Delta L}i_{k-1} - \frac{1}{C_0\Delta L}i_k - \frac{G_0}{C_0}v_k \quad \text{dla } k = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$\frac{dv_{n+1}}{dt} = \frac{2}{C_0\Delta L}i_n - \frac{G_0}{C_0}v_{n+1}$$



Rys. 3. Schemat zastępczy rurociągu podziemnego ze sprzężeniem indukcyjnym

Zależności (4) zostają uporządkowane do równań stanu w postaci normalnej (5) [14]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

- x** – wektor zmiennych stanu, którego wymiar zależy od liczby cewek i kondensatorów w obwodzie,
- y** – wektor odpowiedzi,
- u** – wektor wymuszeń, którego wymiar zależy od liczby oczek z wymuszeniami,
- A** – macierz stanu, której wymiar zależy od geometrii rozpatrywanego obwodu oraz wartości elementów,
- B** – macierz uwzględniająca fizyczne umiejscowienie wymuszeń w obwodzie oraz będąca funkcją wartości elementów obwodu,
- C, D** – macierze wiążące obliczone zmienne stanu **x** oraz wymuszenia **u** z wektorem odpowiedzi **y**.

Współczynniki równań stanu są przygotowywane w skryptach napisanych w języku programowania Matlab. Przykładowo przedstawiono zależności niezbędne do oprogramowania macierzy **A**. Macierz stanu **A** jest macierzą kwadratową o wymiarze $[2n+1 \times 2n+1]$ rzadką pasmową. W celu ułatwienia i zautomatyzowania wprowadzania danych, macierz została podzielona na podmacierze **A₁**, **A₂**, **A₃** i **A₄** (6) [12, 13, 15]:

| | | | |
|-----------|-----------|-----------------|---------------------|
| | | $i_1 \dots i_n$ | $u_1 \dots u_{n+1}$ |
| $A =$ | i_1 | | |
| \vdots | \vdots | A_1 | A_2 |
| i_n | i_n | | |
| u_1 | u_1 | A_3 | A_4 |
| \vdots | \vdots | | |
| u_{n+1} | u_{n+1} | | |

| | | | | | | |
|----------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|-------------------|
| | | i_1 | i_2 | i_3 | \dots | i_n |
| $A_1 =$ | i_1 | $-\frac{R_0}{L_0}$ | | | | |
| i_2 | i_2 | | $-\frac{R_0}{L_0}$ | | | |
| i_3 | i_3 | | | $-\frac{R_0}{L_0}$ | | |
| \vdots | \vdots | | | | \ddots | |
| i_n | i_n | | | | | $\frac{R_0}{L_0}$ |

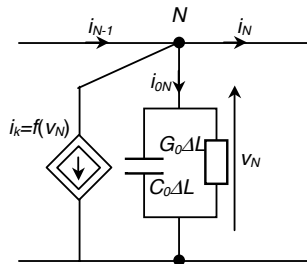
(6)

gdzie np.: \mathbf{A}_1 – macierz kwadratowa o wymiarze $[n \times n]$; elementy niezerowe leżą na przekątnej diagonalnej:

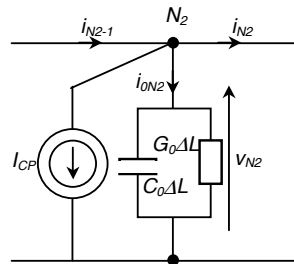
$$A_1(k, k) = -\frac{R_0}{L_0} \quad \text{dla } k = 1, 2, 3 \dots n \quad (7)$$

Uwzględnienie korozji AC

W celu uwzględnienia korozji AC, schemat zastępczy rurociągu zostaje zmodyfikowany jak na rys. 4. W węźle N , w którym nastąpiło uszkodzenie powłoki izolacyjnej, umieszcza się źródło prądu sterowane potencjałem względem ziemi dalekiej v_N węzła N , przedstawiające w sposób schematyczny obwód zastępczy elektryczny korozji przemiennoprądowej (obwód *Randlesa*) [12, 13, 15].



Rys. 4. Modyfikacja schematu zastępczego rurociągu



Rys. 5. Stacja ochrony katodowej w węźle N_2

Prąd i_k jest prądem upływającym z miejsca uszkodzenia do otaczającego środowiska, uwzględniając oznaczenia jak na rys. 2:

$$i_k = i_C + i_F \quad (8)$$

W równaniach (4) wynikających z prądowego prawa Kirchhoffa dla węzła N należy uwzględnić, że:

$$\frac{dv_N}{dt} = \frac{1}{C_0\Delta L} i_{N-1} - \frac{1}{C_0\Delta L} i_N - \frac{G_0}{C_0} v_N - \frac{1}{C_0\Delta L} i_k \quad (9)$$

Liczba zmiennych stanu, wymiar wektora zmiennych stanu \mathbf{x} oraz macierz współczynników stanu \mathbf{A} pozostają bez zmian.

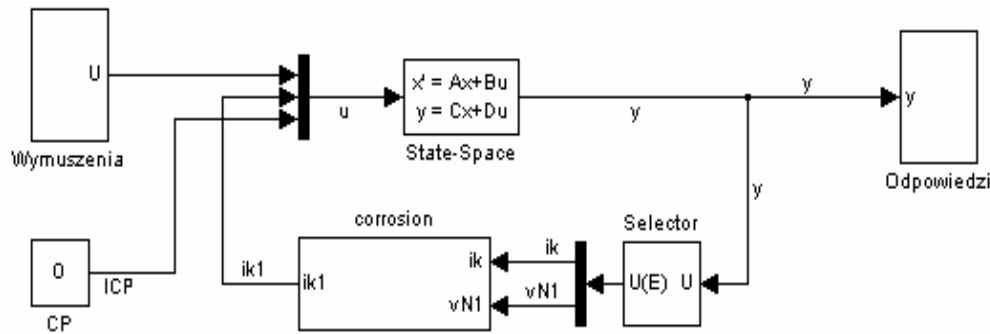
Dla potrzeb modelowania w Simulinku określono umiejscowienie prądu korozji i_k oraz potencjału względem ziemi dalekiej v_N węzła z korozją, w wektorze odpowiedzi \mathbf{y} :

$$i_k = y(3n + 3), \quad v_N = y(n + N) \quad (10)$$

W dalszej części zostanie rozpatrzony model, w którym uwzględnia się ochronę katodową rurociągu z zewnętrznego źródła prądu.

Zakłada się, że uszkodzenie izolacji rurociągu nastąpiło w węzle N , a stacja ochrony katodowej z prądem I_{CP} dołączona jest do węzła N_2 . Schemat zastępczy rurociągu zostaje zmodyfikowany jak na rys. 5.

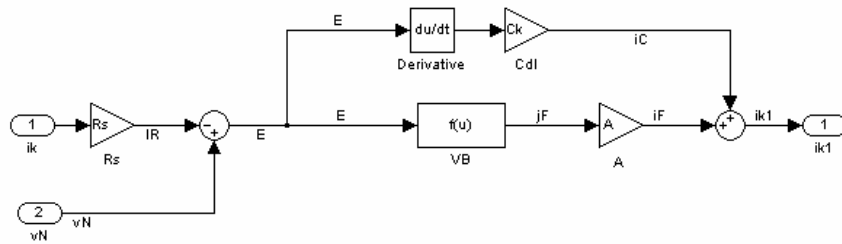
Na rys. 6 przedstawiono okno programu Simulink. Blok *State – Space* służy do opisu liniowych układów, do którego zostały wpisane współczynniki \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} równań stanu. Blok *Wymuszenia* zawiera wektor wymuszeń \mathbf{u} . Natomiast odpowiedzi układu zostają zapisane w bloku *Odpowiedzi*. Zjawisko korozji AC jako nieliniowe, nie może zostać opisane w bloku *State – Space*, w tym celu dodano pętlę sprzężenia zwrotnego [12, 13, 15].



Rys. 6. Okno programu Simulink

Na rys. 7 przedstawiono blok *Korozja*. Blok *VB* zawiera równanie Volmera – Butlera. Górna gałąź modeluje pojemność podwójnej warstwy elektrycznej C_{dl} , R_s to rezystancja przejścia, A powierzchnia uszkodzenia [13, 15].

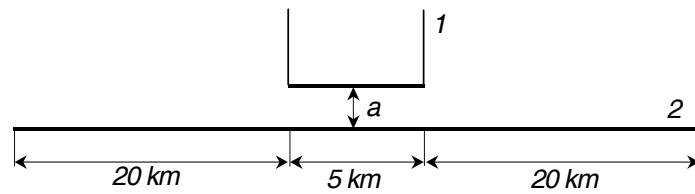
Analiza czasowa rozpatrywanego układu w programie Simulink jest rozwiązywana metodą Rungego – Kutty rzędu 4 i 5 [14].



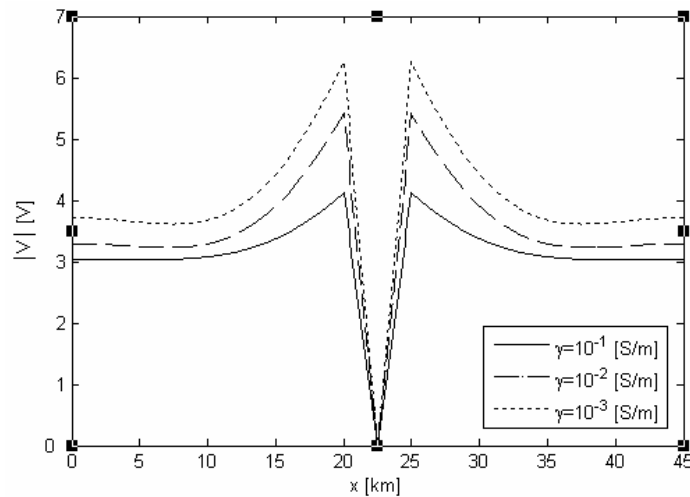
Rys. 7. Blok Korozja

5. Przykładowe obliczenia

Zakłada się, że rurociąg podziemny jest sprzężony indukcyjnie z zawieszonym na wysokości $h=10$ m przewodem z prądem przemiennym $I=10$ A, jak na rys. 9.



Rys. 9. Napowietrzny przewód z prądem (1) rurociąg podziemny(2) (widok z góry)



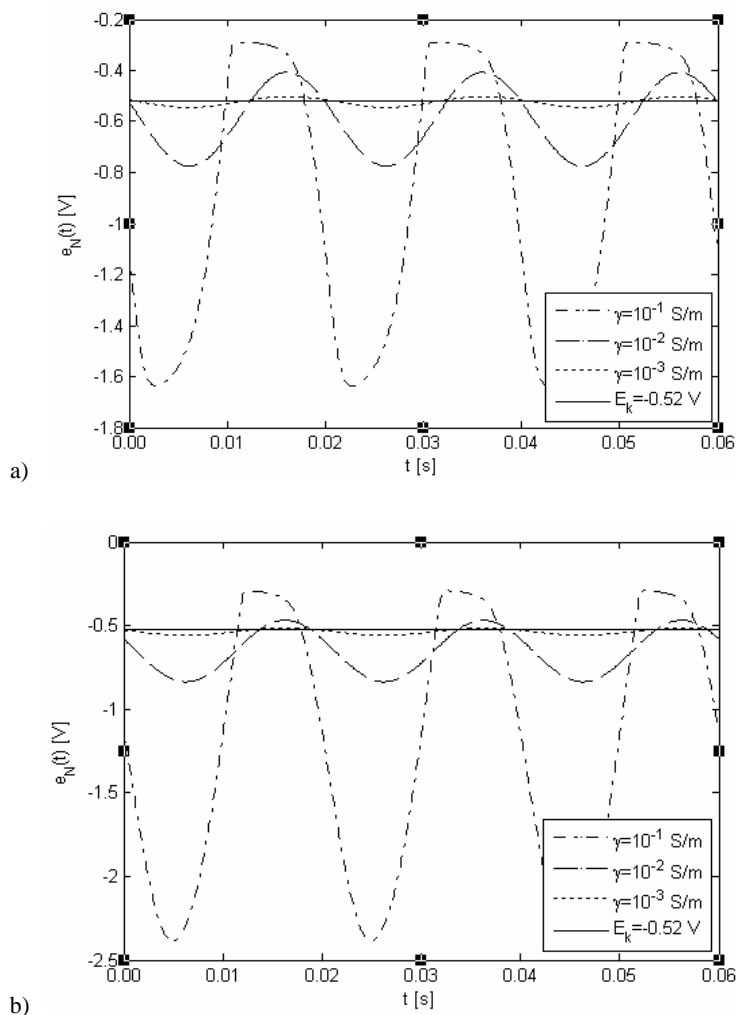
Rys. 10. Rozkład wartości skutecznej potencjału

Rurociąg umieszczony jest na głębokości $d=1,2$ m, w odległości $a=5$ m od trasy linii, długość rurociągu $L=45$ km, średnica zewnętrzna rurociągu $D=0,5$ m. Długość elementarnego odcinka rurociągu $\Delta L=0,1$ km. Jednostkowa rezystancja powłoki izolacyjnej rurociągu

$r_u=10^5 \Omega\text{m}^2$. Wartości jednostkowych parametrów R_0 , G_0 , L_0 , C_0 i impedancji wzajemnej przyjęto na podstawie [1, 2, 5, 6]. Obliczenia wykonano dla wybranych konduktywności gruntu $\gamma=10^{-1}$, 10^{-2} , 10^{-3} S/m.

Na rysunku 10 przedstawiono rozkład wartości skutecznej potencjału względem ziemi dalekiej wzdłuż rurociągu w zależności od konduktywności gruntu.

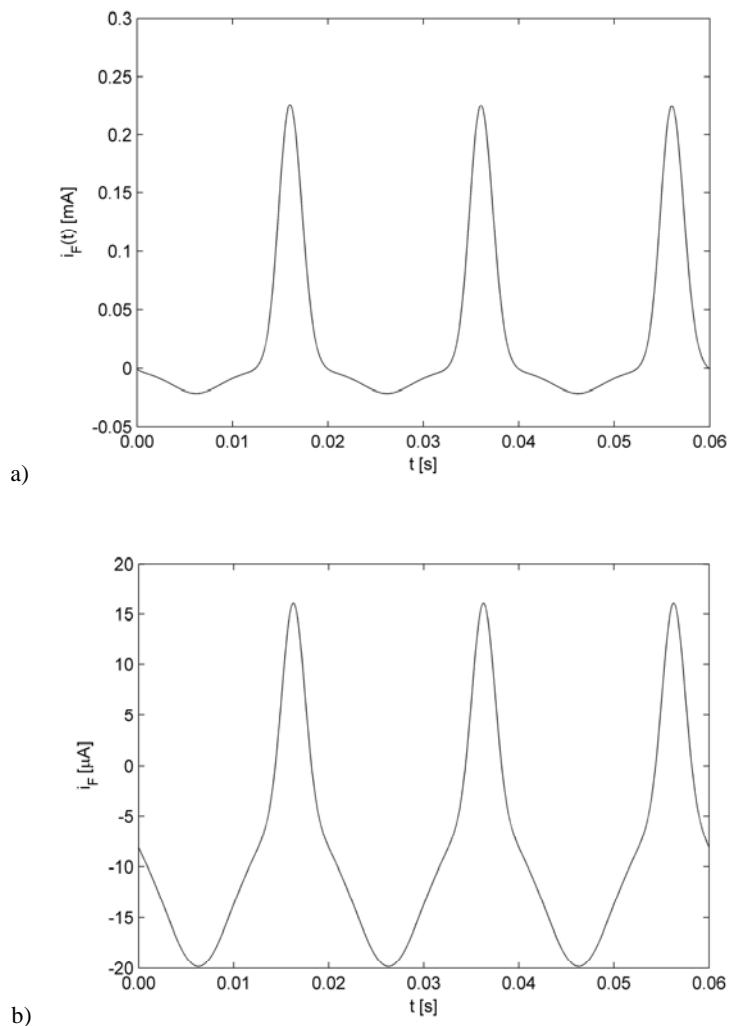
Zakłada się, że na 20 km rurociągu (punkt N) występuje uszkodzenie powłoki izolacyjnej rurociągu o powierzchni $A=1 \text{ cm}^2$. Wartości elementów schematu zastępczego korodującego ogniwa: $C_{dl}=50 \mu\text{F}$, R_s – obliczono na podstawie zależności (1), prąd faradajowski jest obliczany z równania Volmera–Butlera (3), współczynniki równania: $E_k = -0.52 \text{ V}$, $j_0=3 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $\beta_a=0,06 \text{ V/dekadę}$, $\beta_k=0,3 \text{ V/dekadę}$ [15].



Rys. 11. Potencjał rurociągu względem ziemi bliskiej w miejscu uszkodzenia powłoki izolacyjnej (punkt N) w funkcji konduktywności gruntu: a) rurociąg bez ochrony, b) rurociąg z ochroną katodową

Na rysunku 11 przedstawiono przebieg czasowy potencjału rurociągu względem ziemi bliskiej w miejscu uszkodzenia powłoki izolacyjnej (punkt N) w funkcji konduktywności gruntu. Prąd faradajowski i_F , który decyduje o szybkości korozji, przedstawiono na rys. 12.

Rysunki 11a i 12a dotyczą przypadku braku ochrony katodowej rurociągu; przebiegi na rys. 11b i 12b otrzymano zakładając, że na 25 km (punkt N_2) rurociągu pracuje stacja ochrony katodowej z prądem $I_{CP} = 100$ mA.



Rys. 12. Prąd faradajowski w miejscu uszkodzenia powłoki izolacyjnej dla $\gamma = 10^{-2}$ S/m: rurociąg bez ochrony, b) rurociąg z ochroną katodową

6. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono model symulacyjny oddziaływania indukcyjnego linii elektroenergetycznej prądu przemiennego na rurociąg podziemny uwzględniający zjawisko korozji AC oraz pozwalający na ocenę wpływu instalacji ochrony katodowej w miejscu uszkodzenia powłoki izolacyjnej. Na podstawie równań Volmera–Butlera opracowano schemat zastępczy korodującego ogniwa i zaimplementowano go w pakiecie Matlab–Simulink. Obliczono prąd korozji i potencjał rurociągu względem ziemi bliskiej w miejscu uszkodzenia powłoki izolacyjnej rurociągu.

Opracowany model symulacyjny w środowisku Matlab–Simulink może być przydatny dla praktyki antykorozyjnej jako narzędzie wspomagające ocenę zagrożenia korozją AC rurociągów, których trasy są projektowane w sąsiedztwie linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

Literatura

- [1] Machczyński W., *Wprowadzenie do kompatybilności elektromagnetycznej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [2] Machczyński W., *Oddziaływania elektromagnetyczne na obwody ziemnowrotne – rurociągi podziemne*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [3] Heim G., Peez G., *Wechselstrombeeinflussung einer kathodisch geschützten Erdgashochdruckleitung*, 3R International, nr 5, 1998.
- [4] Prinz W., *AC induced corrosion on cathodically protected pipelines*, UK Corrosion, vol. 1, 1992.
- [5] Krakowski M., *Obwody ziemnowrotne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
- [6] Budnik K., Machczyński W., *Mutual impedance of angled conductors with earth return*, XXX Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, IC-SPETO 2007, Gliwice–Ustroń, 23-26.05.2007, s. 11–12.
- [7] Kiszka A., *Elektrochemia II – Elektrodyka*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2001.
- [8] Nielsen L.V., Cohn P., *AC – Corrosion and Electrical Equivalent Diagrams*. CEOCOR, Committee on the Study of Pipe Corrosion and Protection, 5th International Congress, Bruxelles 2000.
- [9] Yunovich M., Thompson N. G., *AC – Corrosion: Mechanism and Proposed Model*. Proceedings of IPC 2004, International Pipeline Conference, October 4–8, 2004, Calgary, Alberta, Canada.
- [10] *Electrochemical Impedance Spectroscopy Primer* – www.gamry.com.
- [11] Nielsen L.V., *Investigation of Area – Dependent Spread Resistance Using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*, AC Corrosion on Cathodically Protected Pipelines, Guidelines for risk assessment and mitigation measures, CEOCOR 2001.
- [12] Budnik K., Machczyński W., *Modelowanie sprzężonych indukcyjnie obwodów ziemnowrotnych w programie Matlab – Simulink*, X Konferencja Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, ZKwE, Poznań, 18-20.04.2005, s. 165–166.
- [13] Budnik K., Machczyński W., *Modeling of electrochemical effects in earth – return circuits*, XXXI Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, IC-SPETO 2008, Gliwice–Ustroń, 28-31.05.2008, s. 49–50.

- [14] Zalewski A., Cegła R., *Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowanie*, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1998.
- [15] Budnik K., *Modelowanie indukcyjnego oddziaływania linii elektroenergetycznych WN na rurociągi podziemne z uwzględnieniem zjawisk elektrochemicznych na granicy faz metal – elektrolit glebowy*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Poznań 2008.