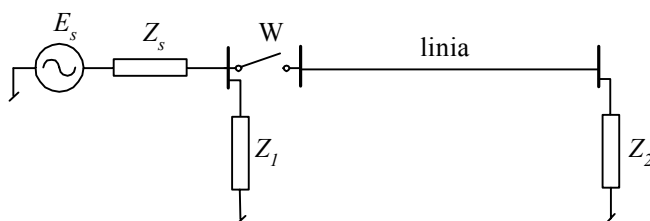


PRZYKŁAD 1.3

Utworzyć równanie macierzowe potencjałów węzłowych dla sieci pokazanej na rys. 1. Przedstawia on fragment sieci 400 kV dla składowej zgodnej. Przeprowadzić symulację stanu przejściowego w tej sieci. Założyć, że w stanie początkowym ($t < 0$) wszystkie napięcia i prądy w sieci są równe zero.

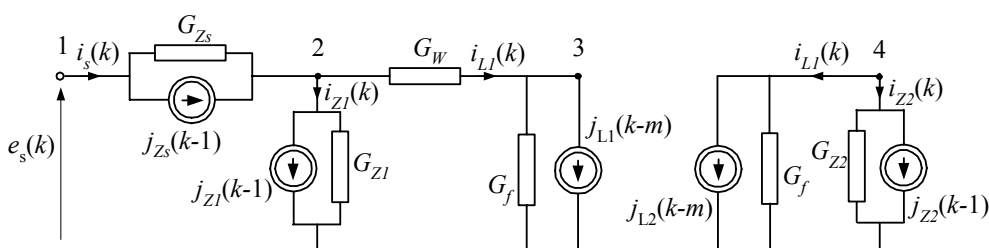
Parametry systemu: $E_s = 330$ kV, $Z_s = 0,5 + j10 \Omega$, $Z_1 = 4700 + j2800 \Omega$, $Z_2 = 415 + j200 \Omega$.

Linia: $R' = 0,0288 \Omega/\text{km}$, $L' = 1,0287$ mH/km, $C' = 11,232$ nF/km, długość $l = 180$ km.



Rys. 1. Schemat analizowanej sieci

W celu samodzielnej analizy problemu z wykorzystaniem programu MATLAB należy utworzyć odpowiednie równania sieci (patrz zbiór *modell_3.m*). Po uwzględnieniu modeli cyfrowych poszczególnych elementów z rys. 1, otrzymujemy schemat zastępczy sieci jak na rys. 2.



Rys.2. Model dyskretny sieci

Uzyskany schemat można jeszcze uprościć przez połączenie równoległych gałęzi przewodnościowych i odpowiednich źródeł prądowych. Przewodność G_W reprezentuje

wyłącznik, przyjmując wartość $G_W=10^6$ S – w stanie załączenia oraz $G_W=10^{-6}$ S w stanie otwarcia.

W celu sformułowania równań napięć węzłowych dla tej sieci, w charakterze węzła odniesienia wybieramy ziemię. Napięcie w węźle 1 jest określone przez źródło napięciowe $e_s(k)$. Zgodnie z (1.79) wektor napięć węzłowych jest zatem określony następująco (zauważmy, że numery wierszy odpowiednich macierzy nie pokrywają się z numerami węzłów w schemacie sieci):

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_A \\ \mathbf{u}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_4(k) \\ u_3(k) \\ u_2(k) \\ u_1(k) \end{bmatrix}, \text{ przy czym } u_1(k) = e_s(k).$$

Macierz przewodności:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{AA} & \mathbf{G}_{AB} \\ \mathbf{G}_{BA} & \mathbf{G}_{BB} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} G_{Z2} + G_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_f + G_W & -G_W & 0 \\ 0 & -G_W & G_{Z1} + G_{Zs} + G_W & -G_{Zs} \\ \hline 0 & 0 & -G_{Zs} & G_{Zs} \end{array} \right]$$

oraz wektor prądów węzłowych:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_A \\ \mathbf{i}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j_{Z2}(k-1) - j_{L2}(k-m) \\ -j_{L1}(k-m) \\ j_{Zs}(k-1) - j_{Z1}(k-1) \\ i_s - j_{Zs}(k-1) \end{bmatrix}.$$

Wyrażenie w ostatnim wierszu powyższej macierzy określa sumę prądów źródłowych dopływających do węzła 1.

Zauważmy, że w modelu linii długiej nie ma bezpośredniego połączenia pomiędzy obu końcami linii, czego konsekwencją jest, w tym przypadku, zerowa wartość przewodności pomiędzy węzłami 3 i 4 w macierzy $\mathbf{G}_{AA}$ (w pierwszym wierszu i w pierwszej kolumnie tej macierzy występuje tylko element diagonalny).

W celu określenia wartości powyższych parametrów należy przyjąć odpowiednie modele stowarzyszone oraz wielkość kroku modelowania. Zakładamy, że całkowanie numeryczne odbywa się zgodnie z formułą trapezów, natomiast krok modelowania $T=5 \cdot 10^{-5}$ s. Elementy macierzy przewodności przyjmują zatem następujące wartości:

$$G_{Z1} = \frac{T}{2L_{Z1} + TR_{Z1}}, \quad G_{Z2} = \frac{T}{2L_{Z2} + TR_{Z2}}, \quad G_{Zs} = \frac{T}{2L_{Zs} + TR_{Zs}}.$$

W modelu linii zakłada się, że rezystancja rozproszona jest reprezentowana za pomocą dwóch rezystancji skupionych. Zatem, zgodnie z (1.50), (1.65):

$$G_f = \frac{1}{Z_f + R/2}, \quad Z_f = \sqrt{\frac{L'}{C'}}, \quad R = lR'.$$

Prądy źródłowe można określić na podstawie (1.42). Dla gałęzi 1-2 otrzymamy:

$j_{zs}(k-1) = \frac{1-RG_L}{1+RG_L} i_s(k-1) + \frac{G_L}{1+RG_L} (u_1(k-1) - u_2(k-1))$, $G_{L_{zs}} = \frac{T}{2L_{zs}}$ i podobnie dla pozostałych dwóch gałęzi RL . Prądy źródłowe w modelu linii są określane zgodnie z (1.65):

$$j_{L1}(k-m) = -G_f u_3(k-m) - h_f i_3(k-m),$$

$$j_{L2}(k-m) = -G_f u_2(k-m) - h_f i_2(k-m),$$

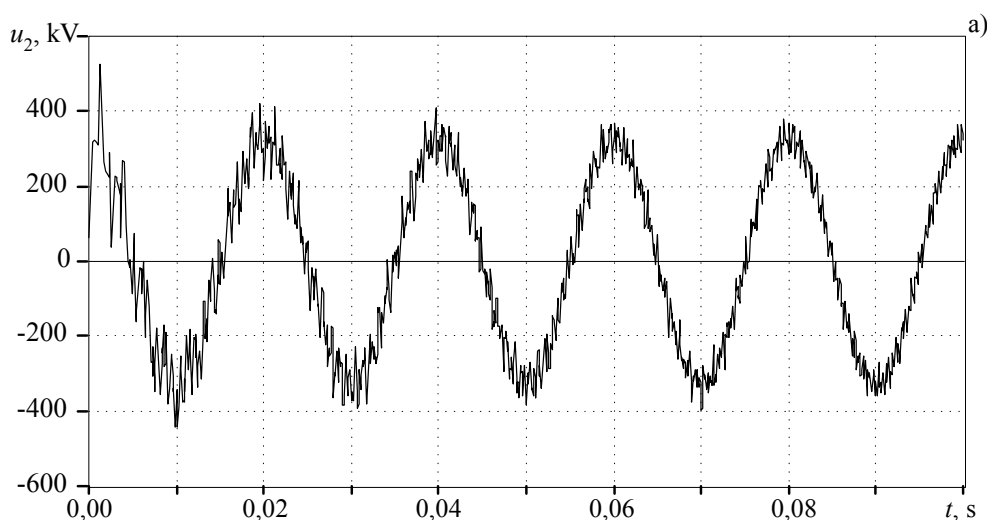
przy czym: $h_f = \frac{2Z_f - R}{2Z_f + R}$, $m = \frac{l}{T} \sqrt{L'C'}$.

Należy zauważyć, że parametr m jest reprezentowany przez liczbę całkowitą, wobec tego, wartość uzyskaną z powyższego wyrażenia należy zaokrąglić do najbliższej liczby całkowitej. W danym przypadku otrzymujemy: $m=12$. W ten sposób model jest gotowy do symulacji.

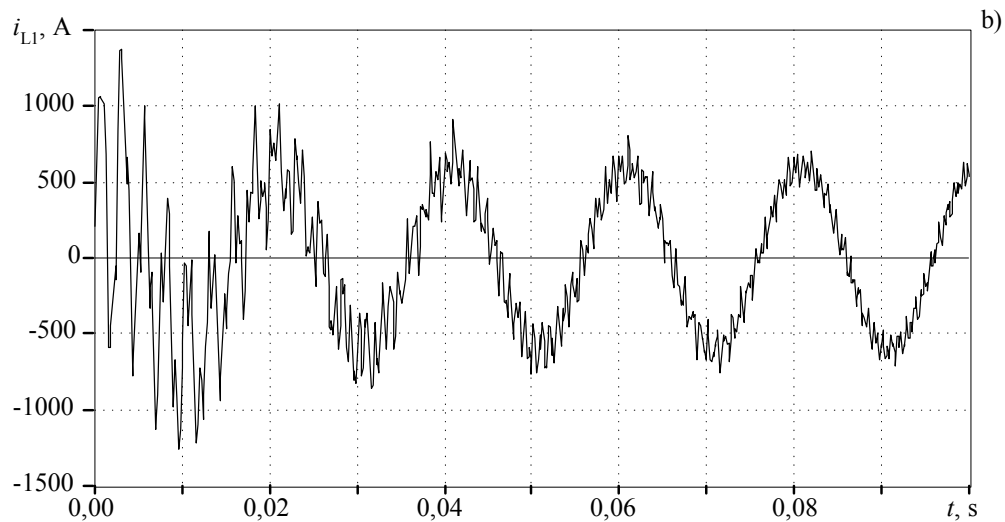
Wyłącznik W jest zamknięty ($G_w = 10^6$ S). Symulacja rozpoczyna się ($t=0$) od załączenia napięcia zasilania E_s , natomiast wyłącznik W jest zamknięty ($G_w = 10^6$ S).

Proces symulacji stanu przejściowego w rozpatrywanej sieci polega na rozwiązywaniu równań (1.81), (1.82) w kolejnych krokach modelowania. Algorytm ten należy uzupełnić o określanie nowych wymuszeń prądowych i napięcia $e_s(k)$ w kolejnych krokach.

Wybrane przebiegi prądów i napięć w rozpatrywanej sieci podczas załączenia źródła napięciowego są pokazane na rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi a) napięcia i b) prądu na początku linii

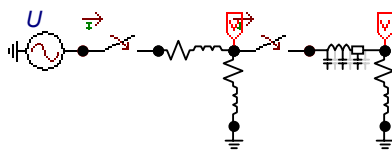


Rys. 3 (kontynuacja)

Można zauważyć intensywny stan przejściowy związany z ładowaniem linii przesyłowej w pierwszym okresie przebiegu. Okres występujących oscylacji pokrywa się z czasem przejścia fali elektromagnetycznej wzdłuż linii w obu kierunkach.

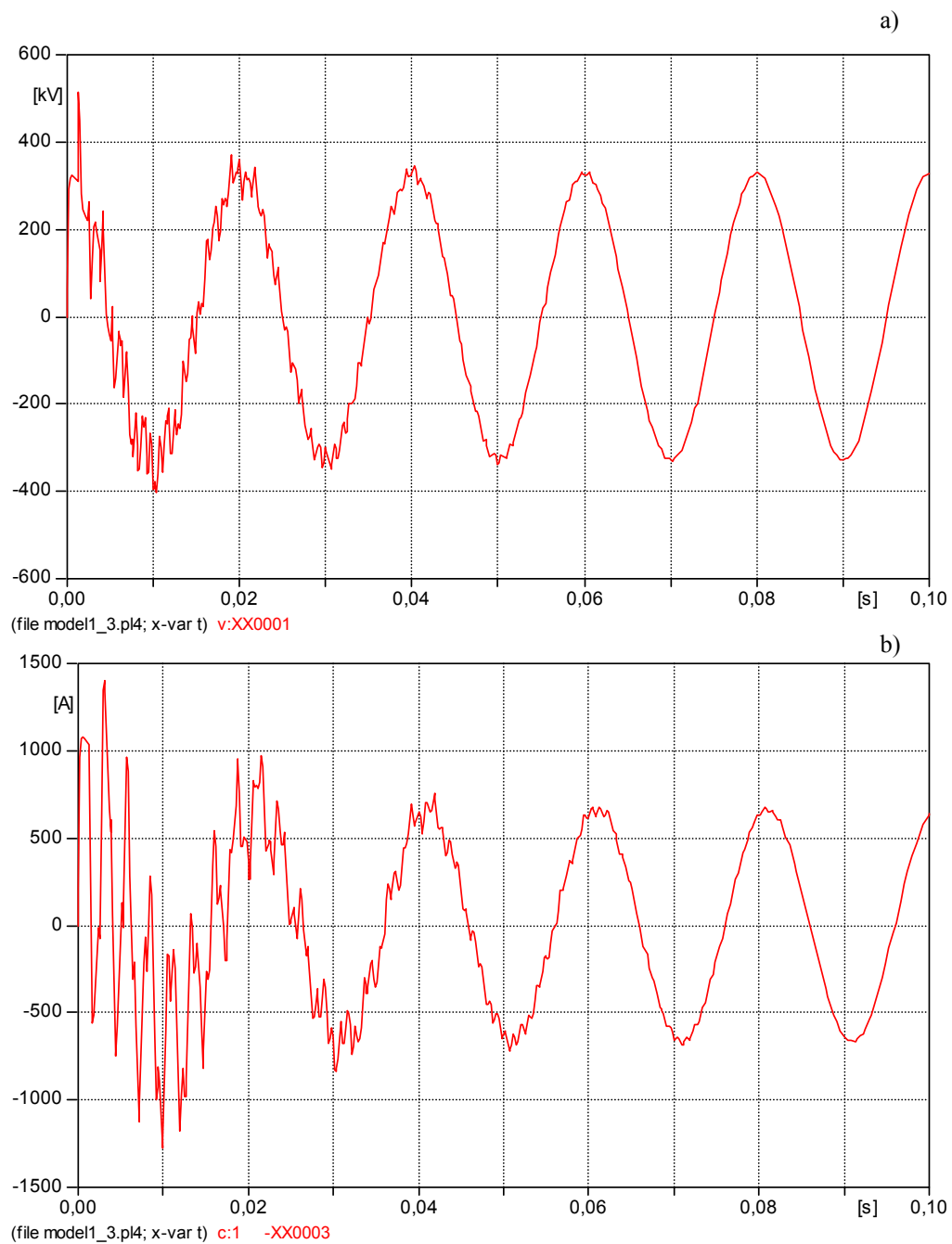
Stosunkowo wolne zanikanie oscylacji jest także wynikiem dużej wrażliwości zastosowanej metody całkowania (metoda trapezów) na gwałtowne wymuszenia w postaci odbitych fal prądowych i napięciowych. Problem oscylacji numerycznych jest analizowany w dalszej części rozdziału.

Ten sam obwód może być analizowany za pomocą programu ATP-EMTP. Schemat modelu przygotowanego za pomocą edytora ATPDraw jest pokazany na rys. 4.



Rys. 4. Model sieci w programie ATPDraw

Na kolejnych rysunkach (rys 5) pokazane są przebiegi prądu i napięcia na początku linii po zamknięciu wyłącznika W.



Rys. 5. Przebiegi a) napięcia i b) prądu na początku linii

Różnica w przebiegach prądów i napięć uzyskanych z zastosowaniem obu narzędzi obliczeniowych wynika stąd, że w programie ATP-EMTP standardowo jest stosowany mechanizm tłumienia oscylacji numerycznych w procesie obliczeniowym. Widoczne na rys. 3 słabo tłumione oscylacje w przebiegach prądu i napięcia są wynikiem numerycznej niestabilności. Jest to związane ze stosowaniem uproszczonych numerycznych modeli sieci, w której zachodzą procesy ciągłe w czasie. Problem ten jest dyskutowany w p. 1.5.