

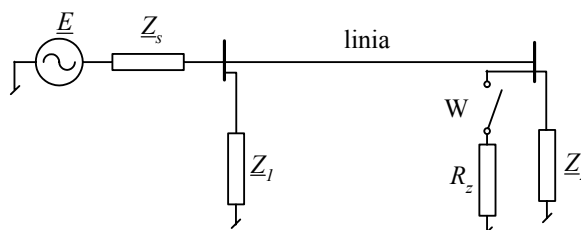
PRZYKŁAD 1.4

Przeprowadzić symulację stanu przejściowego w sieci omówionej w Przykładzie 1.3. Symulacja rozpoczyna się w warunkach stanu ustalonego, po czym, w czasie $t_z=0,02$ s następuje zwarcie na końcu linii przez rezystor o wartości $R_z=1 \Omega$. Określić warunki stanu ustalonego przed rozpoczęciem symulacji.

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.

W tym przypadku, wyłącznik W inicjuje zwarcie (rys. 1).



Rys. 1. Schemat sieci z modelem zwarcia na końcu linii

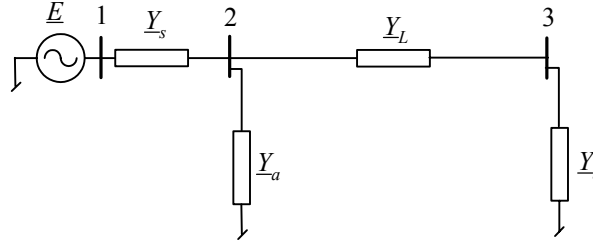
W celu zapisania równań potencjałów węzłowych dla stanu ustalonego, linia zostaje przedstawiona w postaci czwórnik, jak powyżej. Odpowiedni schemat jest pokazany na rys. 2. Admitancja $\underline{Y}_a=1/\underline{Z}_1+\underline{Y}_{pp}/2$, natomiast admitancja w węźle 3 reprezentuje wszystkie elementy przyłączone do tego węzła: $\underline{Y}_b=1/\underline{Z}_2+\underline{Y}_{pp}/2+1/R_z$, przy czym, zwarcie można modelować przez zmianę rezystancji R_z (nie ma to znaczenia przy obliczaniu stanu ustalonego, jeśli $t_z \geq 0$). Równanie potencjałów węzłowych dla tego przypadku jest następujące:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_s + \underline{Y}_a + \underline{Y}_L & -\underline{Y}_L & -\underline{Y}_s \\ -\underline{Y}_L & \underline{Y}_b + \underline{Y}_L & 0 \\ -\underline{Y}_s & 0 & \underline{Y}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Jest to zatem równanie zespolone, przy czym, ogólny algorytm obliczeń jest taki sam, jak w przypadku równań rzeczywistych.

Ostatnie równanie odnosi się do węzła 1, w którym znane jest napięcie \underline{E} , zatem tylko dwa pierwsze równania są niezależne. Po przekształceniu analogicznym do (1.81), otrzymamy:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_s + \underline{Y}_a + \underline{Y}_L & -\underline{Y}_L \\ -\underline{Y}_L & \underline{Y}_b + \underline{Y}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\underline{Y}_s \\ 0 \end{bmatrix} \underline{E}.$$



Rys. 2. Schemat sieci do określenia równań potencjałów węzłowych

W pierwszym kroku algorytmu Gaussa otrzymamy macierz trójkątną górną:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_s + \underline{Y}_a + \underline{Y}_L & -\underline{Y}_L \\ 0 & \frac{(\underline{Y}_s + \underline{Y}_a)(\underline{Y}_b + \underline{Y}_L) + \underline{Y}_b \underline{Y}_L}{\underline{Y}_s + \underline{Y}_a + \underline{Y}_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_s \underline{E} \\ \frac{\underline{Y}_s \underline{Y}_L \underline{E}}{\underline{Y}_s + \underline{Y}_a + \underline{Y}_L} \end{bmatrix}.$$

Stąd już bezpośrednio, w rezultacie odwrotnego podstawiania, otrzymujemy:

$$\underline{U}_3 = \frac{\underline{Y}_s \underline{Y}_L \underline{E}}{(\underline{Y}_s + \underline{Y}_a)(\underline{Y}_b + \underline{Y}_L) + \underline{Y}_b \underline{Y}_L}, \quad \underline{U}_2 = \frac{(\underline{Y}_b + \underline{Y}_L) \underline{Y}_s \underline{E}}{(\underline{Y}_s + \underline{Y}_a)(\underline{Y}_b + \underline{Y}_L) + \underline{Y}_b \underline{Y}_L}.$$

Prąd $\underline{I}_1 = \underline{I}_{12}$ można określić z trzeciego równania w (1.92): $\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} = \underline{Y}_s (\underline{E} - \underline{U}_2)$.

Podobnie, prądy w gałęziach określonych przez impedancje \underline{Z}_1 i \underline{Z}_2 :

$$\underline{I}_{z1} = \underline{U}_2 / \underline{Z}_1, \quad \underline{I}_{z2} = \underline{U}_3 / \underline{Z}_2.$$

Można również zauważyć, że: $\underline{I}_{32} = -\underline{I}_{23}$ (wyłącznik jest otwarty), natomiast prąd płynący w linii od strony węzła 2: $\underline{I}_{23} = \underline{I}_{12} - \underline{I}_1$ (jest to suma prądu wzdłużnego i poprzecznego linii).

Zakładając, że do dalszej symulacji brane są części rzeczywiste rozwiązania, należy teraz określić wartości początkowe prądów i napięć w modelach indukcyjności, pojemności oraz obu końców linii długiej (w tym ostatnim przypadku, wielkości początkowe odnoszą się do całej historii, zapisanej w rejestrach j_1, j_2 o długości m (1.65)).

Przyjmuje się, że pierwszy krok obliczeń stanu przejściowego odnosi się do czasu $t_k = 0$ ($k=0$), zatem, wszystkie zmienne początkowe odnoszące się do poprzedniego kroku ($t_{-1} = -T$) odpowiadają w przestrzeni zespolonej wektorom obróconym o kąt $\Delta\alpha = -\omega T$, co jest równoważne pomnożeniu przez liczbę $e^{-j\omega T}$, T – okres modelowania. Zatem, otrzymujemy:

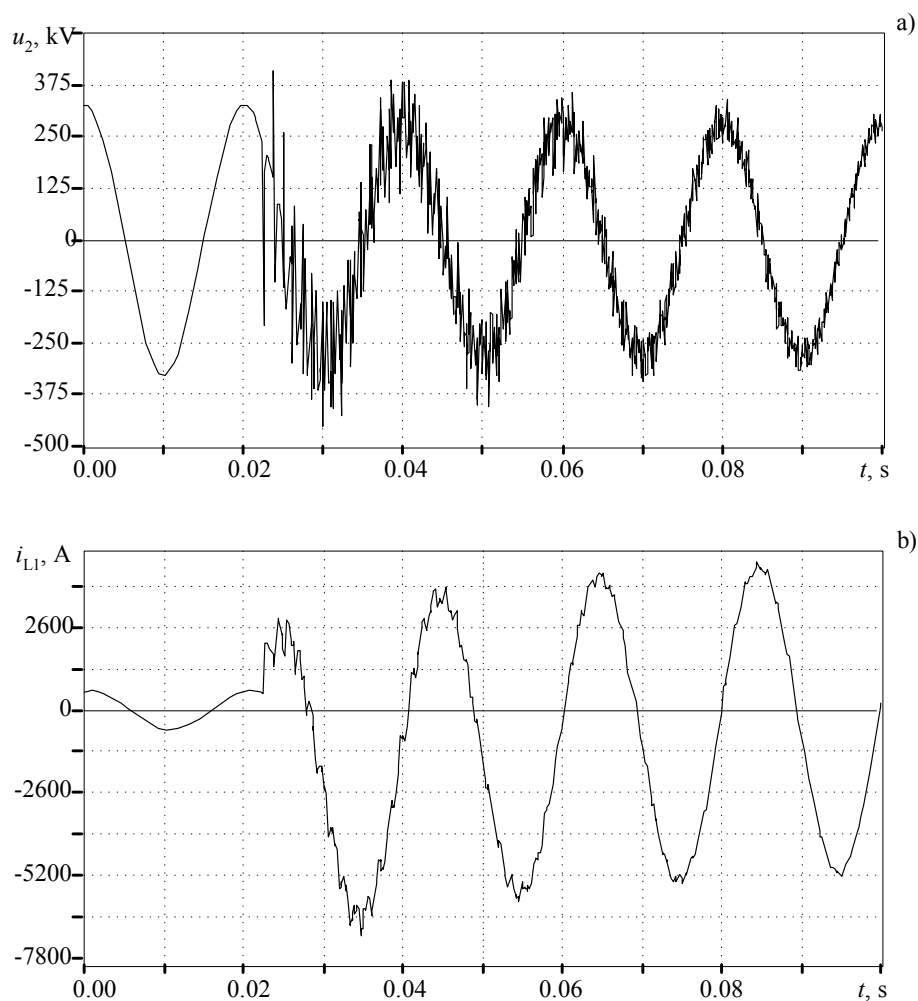
$$\begin{aligned} i_{12}(-1) &= \text{Re}\{\underline{I}_{12} e^{-j\omega T}\}, & u_{12}(-1) &= \text{Re}\{(\underline{E} - \underline{U}_2) e^{-j\omega T}\}, \\ i_{z1}(-1) &= \text{Re}\{\underline{I}_{z1} e^{-j\omega T}\}, & u_2(-1) &= \text{Re}\{\underline{U}_2 e^{-j\omega T}\}, \\ i_{z2}(-1) &= \text{Re}\{\underline{I}_{z2} e^{-j\omega T}\}, & u_3(-1) &= \text{Re}\{\underline{U}_3 e^{-j\omega T}\}. \end{aligned}$$

W celu obliczenia historii procesu w modelu linii: $j_1(-1), j_1(-2), \dots, j_1(-m)$, należy określić wartości prądów i napięć w odpowiednich chwilach poprzedzających pierwszy krok symulacji:

$$i_{32}(-l) = \operatorname{Re}\{I_{32}e^{-j\omega l}\}, u_3(-l) = \operatorname{Re}\{U_3e^{-j\omega l}\}, l = 1, 2, \dots, m$$

i podobnie dla drugiego końca linii.

Z wykorzystaniem obliczonych danych można rozpocząć symulację stanu przejściowego od ustalonego stanu początkowego. Obliczenia są prowadzone z wykorzystaniem programu MATLAB (zbiór dyskowy *modell_4.m*) zgodnie z równaniami przedstawionymi w Przykładzie 1.3 z odpowiednią modyfikacją wynikającą z obecności modelu zwarcia z rezystancją R_z . Uzyskane przebiegi napięcia i prądu są pokazane na rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi: a) napięcia oraz b) prądu na początku linii przy zwarciu na jej końcu

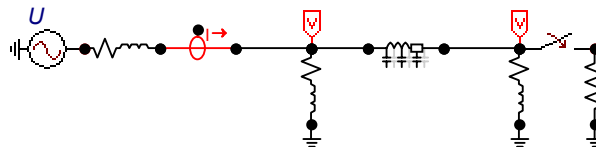
Przed wystąpieniem zwarcia sieć pracuje w stanie ustalonym, co można obserwować w postaci regularnej sinusoidalnej fali napięcia i prądu. Po zainicjowaniu zwarcia, widoczne są intensywne zakłócenia, szczególnie w przebiegu napięcia. Zwarcie nastąpiło poza szczytem ustalonego przebiegu napięciowego, co daje, w efekcie, zanikającą składową stałą w przebiegu prądu zwarciovego.

Należy zauważyć, że w przypadku modelu linii o parametrach rozłożonych, ustalony stan początkowy dostarcza informacji o historii przebiegu, zapisanej w m kolejnych komórkach rejestrów j_1 i j_2 modelu linii.

Jeśli wymuszenia w sieci nie są przebiegami harmonicznymi, to określenie stanu początkowego staje się kłopotliwe i zazwyczaj nie są w tym celu stosowane jakieś ogólne procedury. W przypadku obwodów prądu stałego, generalną zasadą jest 'oszukiwanie' programu przez podstawienie w miejsce źródeł o stałej wartości, ich odpowiedników o przebiegu harmonicznym o bardzo małej częstotliwości. Na przykład, źródło napięcia stałego U_1 może być reprezentowane do obliczenia stanu początkowego w sieci, przez źródło napięcia sinusoidalnego: $U_1 \cos(\omega t + \varphi)$, przy czym: $\varphi=0$, $\omega=10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

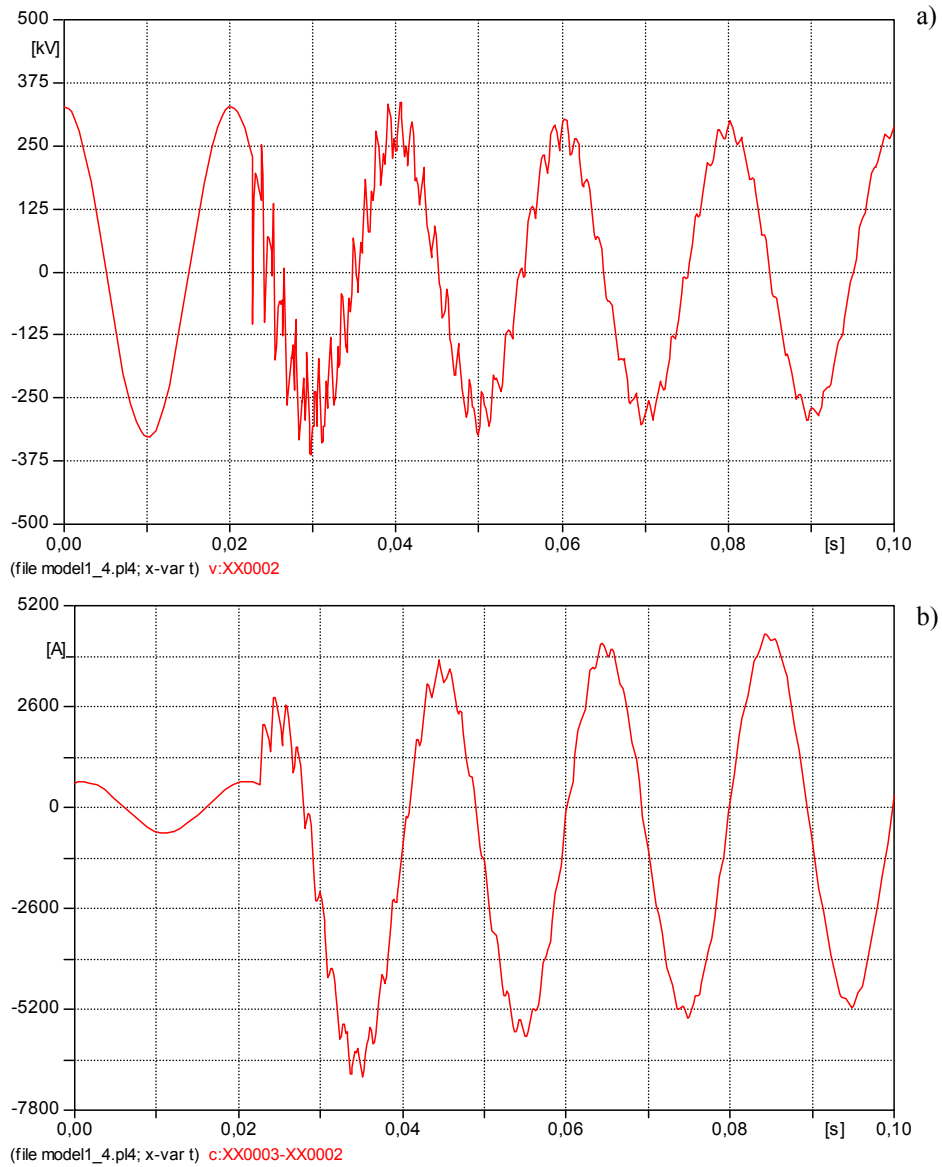
Dzięki temu, do obliczenia stanu ustalonego można korzystać z ogólnej procedury rozwiązywania obwodu za pomocą rachunku zespolonego. Przyjęta niska częstotliwość przebiegu i związane z tym przesunięcia kątowe, nie wprowadzają istotnych odchyłek od rzeczywistego obrazu rozplywu prądów w sieci prądu stałego.

Model tej samej sieci został także przygotowany za pomocą programu ATP-EMTP. Schemat modelu sieci utworzony za pomocą edytora graficznego ATPDraw jest pokazany na rys. 4 (odpowiada mu zbiór dyskowy *modell_4.acp*).



Rys. 4. Schemat modelu sieci w programie ATPDraw

Uzyskane przebiegi prądu i napięcia na początku linii są pokazane na rys. 5. Nieznaczne różnice w intensywności stanu przejściowego pomiędzy przebiegami pokazanymi na rys. 4 oraz rys. 5 wynikają stąd, że w programie ATP-EMTP stosowane jest tłumienie pasożytniczych oscylacji numerycznych (rys. 4). Problemy te są wyjaśnione w p. 1.5.



Rys. 5. Przebiegi uzyskane z modelu ATP-EMTP: a) napięcia oraz b) prądu na początku linii przy zwarcie na jej końcu