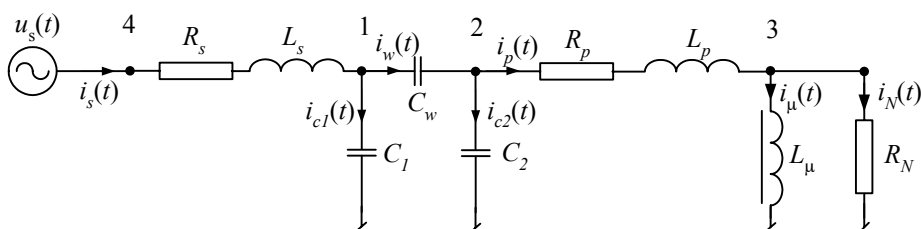


## PRZYKŁAD 2.8

Przeprowadzić symulację stanu przejściowego w obwodzie z rys. 1. Przyjąć, że warunki początkowe są zerowe. Zastosować modele skojarzone indukcyjności i pojemności według metody trapezów. Wartości parametrów obwodu i wymuszenia podane są poniżej.



Rys. 1. Schemat rozpatrywanego obwodu

$$u_s(t) = U \cos(\omega t), \quad U = 8300 \text{ V}, \quad \omega = 100\pi \text{ s}^{-1},$$

$$R_s = 0,4 \Omega, \quad L_s = 24 \text{ mH}, \quad C_s = 22 \text{ nF}, \quad C_1 = 8,7 \text{ nF}, \quad C_2 = 120 \text{ nF},$$

$$R_p = 0,2 \Omega, \quad L_p = 5 \text{ mH}, \quad R_N = 2,4 \text{ M}\Omega.$$

Charakterystyka magnesowania indukcyjności  $L_\mu$  jest określona zgodnie z równaniem:

$$\psi = a \arctg(bi_\mu) + ci_\mu \quad (1)$$

gdzie:

$$a=17,829, \quad b=7,5, \quad c=0,0149.$$

Przyjęto krok modelowania  $T = 10^{-5} \text{ s}$ .

Model tej sieci został opracowany w języku MATLAB zgodnie ze standardową procedurą według metody potencjałów węzłowych (zbiór dyskowy *model2\_8.m*). W obwodzie występują cztery węzły niezależne (numery widoczne są na rys. 1), przy czym, napięcie w węźle 4 jest znane. Równanie potencjałów węzłowych (2.47) przyjmie zatem postać:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{AA} & \mathbf{G}_{AB} \\ \mathbf{G}_{BA} & \mathbf{G}_{BB} \end{bmatrix}^{n-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_A \\ \mathbf{u}_B \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_A \\ \mathbf{i}_B \end{bmatrix}^n \quad (2)$$

przy czym:

$$\mathbf{G}_{AA}^{n-1} = \begin{bmatrix} g_{ls} + g_{c1} + g_{cs} & -g_{cs} & 0 \\ -g_{cs} & g_{cs} + g_{c2} + g_{lp} & -g_{lp} \\ 0 & -g_{lp} & g_{lp} + g_{\mu}^{n-1} + g_{rm} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_{AB}^{n-1} = \begin{bmatrix} -g_{ls} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{BA}^{n-1} = (\mathbf{G}_{AB}^{n-1})^T, \quad \mathbf{G}_{BB}^{n-1} = g_{ls},$$

$$g_{ls} = \frac{T}{2L_s + R_s T}, \quad g_{lp} = \frac{T}{2L_p + R_p T}, \quad g_{c1} = \frac{2C_1}{T}, \quad g_{c2} = \frac{2C_2}{T}, \quad g_{cw} = \frac{2C_w}{T}, \quad g_{rm} = \frac{1}{R_N},$$

$$g_{\mu} = \frac{T}{2L_{\mu}}, \quad \text{gdzie indukcyjność } L_{\mu} = L_{\mu}(i_{\mu}) \text{ jest określona zgodnie z (1).}$$

Pozostałe elementy równania (2) są następujące:

$$\mathbf{u}_A = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_B = u_4 = u_s, \quad \mathbf{i}_A = \begin{bmatrix} j_s - j_{c1} - j_{cs} \\ j_{cs} - j_{c2} - j_{lp} \\ j_{lp} - j_{\mu} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_B = i_s,$$

przy czym:

$$j_s = j_s(k-1) = k_{ls} i_s(k-1) + g_{ls} (u_s(k-1) - u_1(k-1)), \quad k_{ls} = \frac{2L_s - R_s T}{2L_s + R_s T},$$

$$j_{lp} = j_{lp}(k-1) = k_{lp} i_p(k-1) + g_{lp} (u_2(k-1) - u_3(k-1)), \quad k_{lp} = \frac{2L_p - R_p T}{2L_p + R_p T},$$

$$j_{c1} = j_{c1}(k-1) = -i_{c1}(k-1) - g_{c1} u_1(k-1), \quad j_{c2} = j_{c2}(k-1) = -i_{c2}(k-1) - g_{c2} u_2(k-1),$$

$$j_{\mu} = j_{\mu}(k-1) = i_{\mu}(k-1) + g_{\mu} (i_{\mu}(k-1)) u_3(k-1).$$

Można zauważyć, że w rozpatrywanym przypadku, wszystkie elementy wektora  $\mathbf{i}_A$  są określone w kroku  $k-1$ , zatem, wektor ten nie zmienia się w trakcie procesu iteracyjnego. Podobnie, macierz  $\mathbf{G}_{AB}$  jest także stała podczas obliczeń. Wektor  $\mathbf{u}_B = u_s(k)$  jest reprezentowany przez źródło napięciowe, które zmienia się wraz z krokiem  $k$  i też nie zależy od iteracyjnego przybliżania rozwiązania.

Podstawowa procedura obliczeniowa, wynikająca z (2), ma zatem następującą postać:

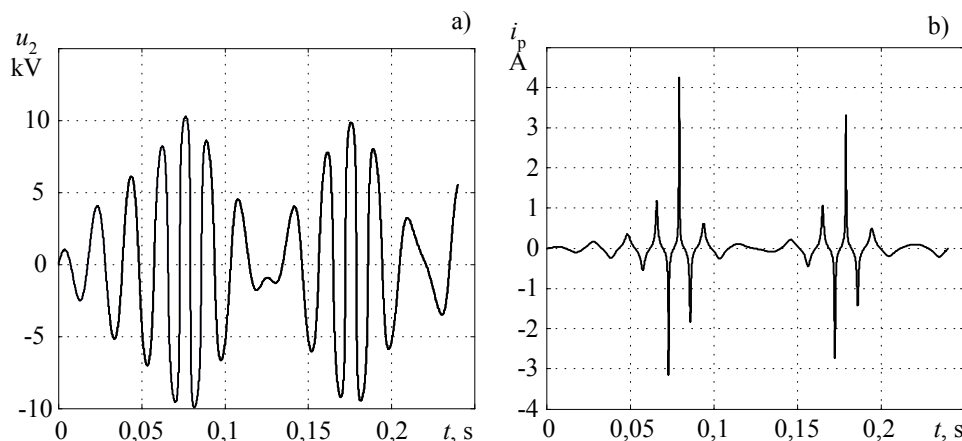
$$\mathbf{G}_{AA}^{n-1} \mathbf{u}_A^n = \mathbf{i}_A - \mathbf{G}_{AB} \mathbf{u}_B \quad (3)$$

przy czym, w procesie iteracyjnym zmienia się jedynie jeden element macierzy  $\mathbf{G}_{AA}$ :  $g_{\mu}$  natomiast w miejsce prądu  $j_{\mu} = j_{\mu}(k-1)$  w wektorze  $\mathbf{i}_A = \mathbf{i}_A^n$  należy zastosować wielkość  $I^{n-1}(k) = i_{\mu}^{n-1}(k) - G(i_{\mu}^{n-1}(k)) u_3^{n-1}(k)$ .

Formalnie, równanie (3) można rozwiązać zgodnie z zależnością:

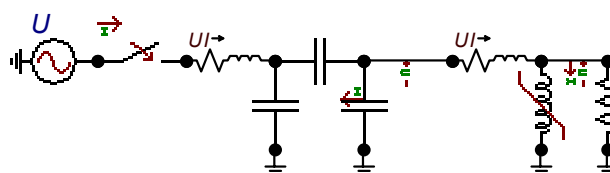
$$\mathbf{u}_A^n = (\mathbf{G}_{AA}^{n-1})^{-1} (\mathbf{i}_A^n - \mathbf{G}_{AB} \mathbf{u}_B) \quad (4)$$

W przypadku większych sieci należy jednak stosować bardziej efektywną metodę rozwiązywania równania (3). W odniesieniu do macierzy  $\mathbf{G}_{AA}$  można także wykorzystać fakt, że tylko nieliczne jej elementy zmieniają się w trakcie obliczeń (patrz Rozdział 1). Przebiegi napięcia w węzle 2 oraz prądu w gałęzi 2-3 są pokazane na rys. 2. Widać nieregularności charakterystyczne dla ferorezonansu, który powstaje w wyniku przemieszczania się energii pomiędzy nieliniową indukcyjnością i pojemnościami sieci.



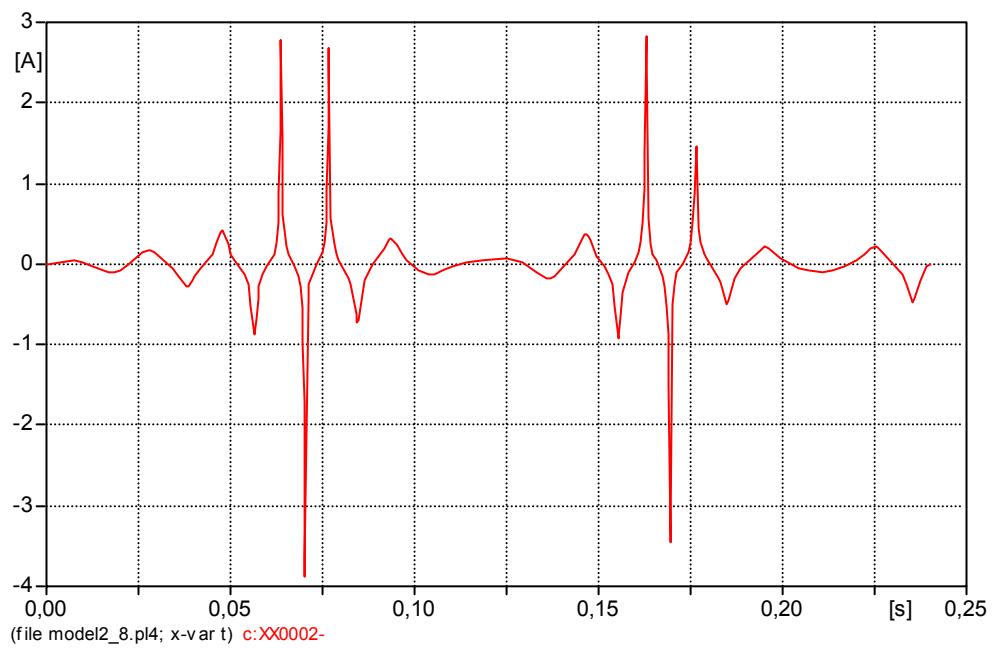
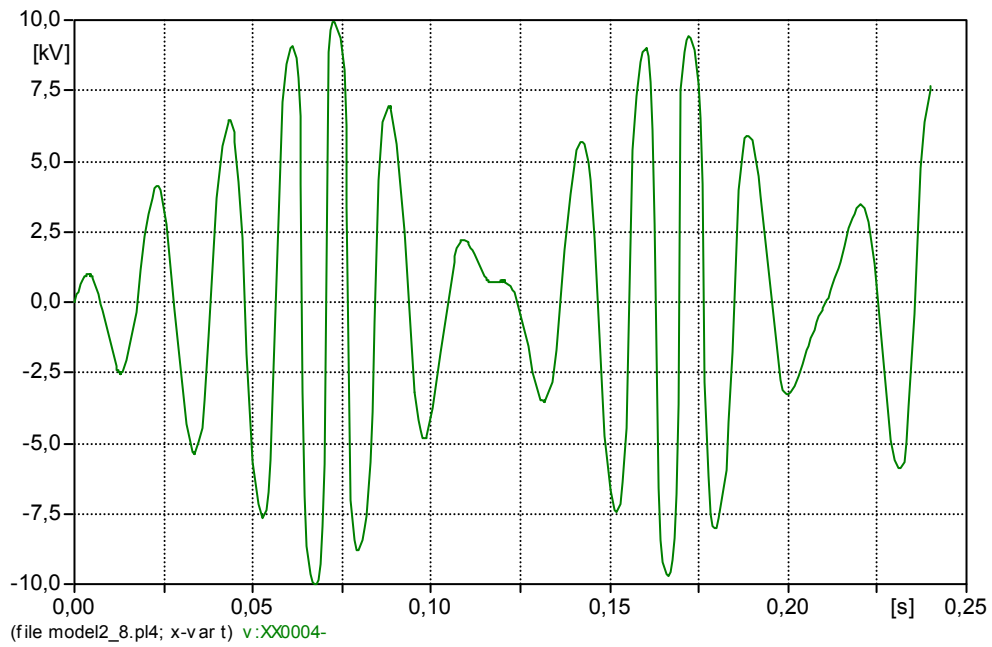
Rys. 2. Napięcie (a) i prąd (b) w analizowanej sieci

Ta sama sieć została także zamodelowana z wykorzystaniem programu ATP-EMTP (zbiór dyskowy *model2\_8.acp* z modelem ATPDraw i pokrewne zbiory wynikowe). Schemat modelu ATPDraw jest pokazany na rys. 3.



Rys. 3. Schemat modelu ATPDraw

Przebiegi prądu i napięcia analogiczne do tych z rys. 2 są pokazane na rys. 3. Widoczne różnice wynikają stąd, że w programie ATP-EMTP przyjęto uproszczony sposób reprezentacji charakterystyki magnesowania elementu z nieliniową indukcyjnością. Ma to, jak widać istotne znaczenie przy analizie tego typu drgań nieliniowych.



Rys. 4. Napięcie (a) i prąd (b) w analizowanej sieci uzyskane z modelu ATP-EMTP