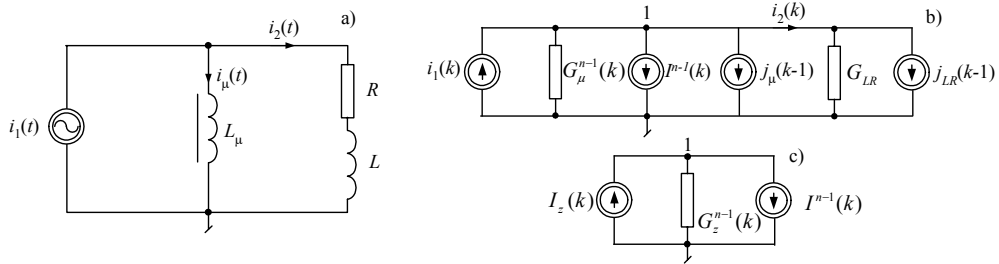


PRZYKŁAD 2.6

Zastosować cyfrowy model nieliniowej indukcyjności do symulacji stanu przejściowego w przekładniku prądowym według schematu jak na rys. 1. Zastosować model skojarzony indukcyjności według metody trapezów.

Obwód z rys. 1a odpowiada uproszczonemu schematowi zastępczemu przekładnika prądowego sprowadzonemu do strony wtórnej. Ze względu na znikomą impedancję źródła wymuszającego (w porównaniu z impedancją przekładnika), przyjęto, że wymuszeniem jest źródło prądowe. Podobnie, pominięto impedancję strony pierwotnej, a impedancję strony wtórnej połączono z impedancją obciążenia. Po podstawieniu w miejsce nieliniowej indukcyjności L_μ oraz gałęzi RL stosownych modeli cyfrowych, otrzymuje się schemat, jak na rys. 1b.

Schemat z rys. 1b można łatwo uprościć do postaci, jak na rys. 1c. Źródło $I_z(k)$ jest stałe w danym kroku czasowym, natomiast w procesie iteracyjnego poszukiwania rozwiązania bierze udział źródło $I^{n-1}(k)$. Zastosowanie metody potencjałów węzłowych w odniesieniu do tego zredukowanego obwodu prowadzi do następującego równania:



Rys. 1 Schemat obwodu z przekładnikiem prądowym

$$G_z^{n-1}(k)u_1^n(k) = I_z(k) - I^{n-1}(k) \quad (1)$$

gdzie: $G_z^{n-1}(k) = G_\mu^{n-1}(k) + G_{LR}$, $G_\mu^{n-1}(k) = \frac{T}{2L_\mu(i_\mu^{n-1}(k))}$, $G_{LR} = \frac{T}{2L + RT}$ - na podstawie (1.42),

$I_z(k) = i_1(k) - j_{LR}(k-1) - j_\mu(k-1)$ - ten prąd jest stały w każdym kroku modelowania,

$$I^{n-1}(k) = i_g^{n-1}(k) - G_\mu^{n-1}(k)u_1^{n-1}(k), \quad j_{LR}(k-1) = \frac{2L - RT}{2L + RT}i_{LR}(k-1) + G_{LR}u_1(k-1), \quad \text{przy}$$

czym, prąd: $i_g^{n-1}(k) = i_\mu^{n-1}(k) - j_\mu(k-1)$ jest tą częścią prądu magnesującego, który zmienia się w procesie iteracyjnym.

Dla dopełnienia, należy jeszcze uwzględnić odpowiednie zależności związane z modelami elementów:

$$i_\mu^n(k) = G_\mu^{n-1}(k)u_1^n(k) + j_\mu(k-1), \quad j_\mu(k-1) = i_\mu(k-1) + G_\mu(k-1)u_1(k-1),$$

$$i_{LR}(k) = G_{LR}u_1(k) + j_{LR}(k-1).$$

W celu określenia przewodności G_μ^{n-1} założmy, że charakterystyka magnesowania $\psi = f(i_\mu)$ jest określona za pomocą funkcji:

$$\psi = a \arctg(bi_\mu) + ci_\mu \quad (2)$$

gdzie: $a=0,9009$, $b=14,2$, $c=0,0012$.

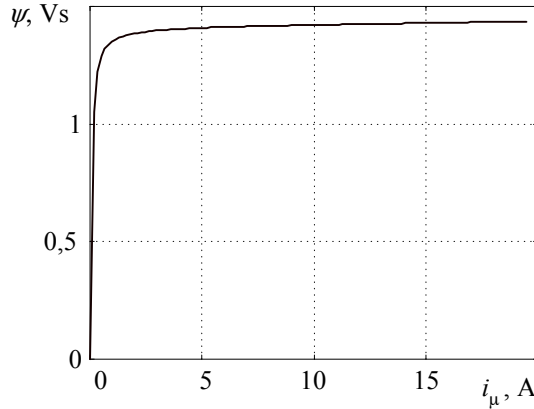
Przebieg charakterystyki magnesowania dla przyjętych parametrów jest pokazany na rys. 2.

Indukcja jest, zatem, określona następującą zależnością:

$$L_\mu(i_\mu) = \frac{d\psi}{di_\mu} = \frac{ab}{1 + (bi_\mu)^2} + c \quad (3)$$

Pozostałe parametry schematu z rys. 1a są następujące: $R = 8,0\Omega$, $L = 10,0 \text{ mH}$. Do symulacji przyjęto krok modelowania $T=0,0001\text{s}$. W charakterze prądu źródłowego przyjęto przebieg sinusoidalny ze składową aperiodyczną o czasie zanikania $T_a = 0,02 \text{ s}$:

$$i_1(t) = -100(\cos(\omega t) - \exp(-t/T_a)).$$



Rys. 2. Charakterystyka magnesowania rdzenia rozpatrywanego przekładnika prądowego

Obliczenia są wykonywane w następującym porządku.

1. Warunki początkowe do pętli symulacji w czasie zgodnie z krokiem k , $k=0$.
Określić: $u_1(0)$, $i_\mu(0)$, $G_\mu(0)$, T , T_a (stała czasowa zanikania składowej aperiodycznej), $a = 2\pi T f$ (kąt pomiędzy kolejnymi próbkami, $f=50\text{Hz}$), $\text{ampl}=100$,

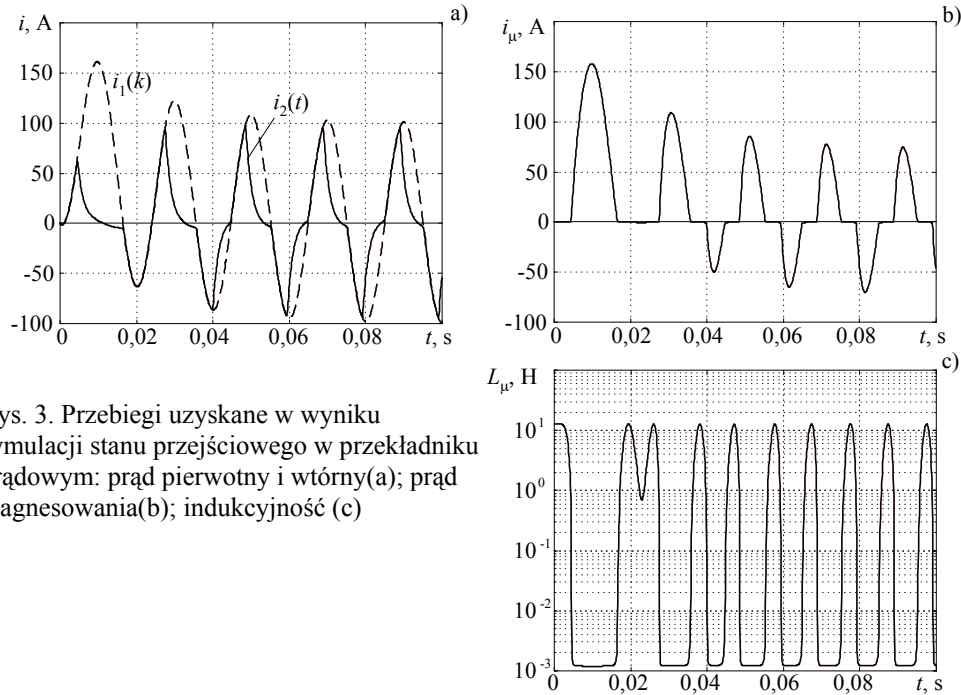
$$G_{LR} = \frac{T}{2L + RT}.$$
2. $k=k+1$.
3. $j_\mu(k-1) = i_\mu(k-1) + G_\mu(k-1)u_1(k-1)$,

$$j_{LR}(k-1) = \frac{2L - RT}{2L + RT} i_{LR}(k-1) + G_{LR}u_1(k-1).$$
4. $i_1(k) = -\text{ampl} \cdot (\cos(a(k-1)) - \exp(-(k-1)T/T_a))$ - nowa wartość źródła prądowego.
5. $I_z = i_1(k) - j_{LR}(k-1) - j_\mu(k-1)$.
6. Warunki początkowe do pętli iteracyjnego poprawiania rozwiązania:
 $u_1^0(k) = u_1(k-1)$, $n=0$,
 $i_g^0 = i_\mu^0(k) - j_\mu(k-1)$ - prąd w nieliniowej przewodności
7. $n=n+1$. - kolejny krok iteracyjny
8. Obliczyć:
 $G_z^{n-1}(k) = G_\mu^{n-1}(k) + G_{LR}$,
 $I^{n-1} = i_g^{n-1} - G_\mu^{n-1}(k)u_1^{n-1}(k)$, - źródło prądowe w procesie iteracyjnym
 $u_1^n(k) = \frac{I_z - I^{n-1}}{G_z^{n-1}(k)}$, - wg metody potencjałów węzłowych
 $i_\mu^n(k) = G_\mu^{n-1}(k)u_1^n(k) + j_\mu(k-1)$,
 $L_\mu(i_\mu^n) = \frac{ab}{1 + (bi_\mu^n)^2} + c$, $G_\mu^n(k) = \frac{T}{2L_\mu(i_\mu^n)}$,
 $i_g^n = G_\mu^n(k)u_1^n(k)$. - skorygowana wartość prądu
9. Jeśli $|u_1^n(k) - u_1^{n-1}(k)| > \varepsilon$ to przejdź do 7.
10. $i_{LR}(k) = G_{LR}u_1(k) + j_{LR}(k-1)$.
11. Jeśli $k < k_{\max}$ to przejdź do 2
12. Stop

Należy zauważyć, że wielkości bez indeksu k występują tylko w procesie iteracyjnym i spełniają lokalnie pomocniczą rolę.

Wyniki symulacji są pokazane na rys. 3. Szczegóły funkcjonowania procedury można śledzić w programie MATLAB zgodnie z programem umieszczonym w zbiorze *model2_6.m*. Widać, że wartość prądu magnesującego i_μ (rys. 3b) jest duża także po zaniku składowej aperiodycznej, co wynika z dużej amplitudy prądu wymuszającego i dużych zmian

indukcyjności L_μ (rys. 3c). Prąd wyjściowy przekładnika i_2 jest, zatem, silnie odkształcony (rys. 3a).



Rys. 3. Przebiegi uzyskane w wyniku symulacji stanu przejściowego w przekładniku prądowym: prąd pierwotny i wtórny(a); prąd magnesowania(b); indukcyjność (c)

Zbieżność procesu iteracyjnego w każdym kroku czasowym jest kontrolowana przez sprawdzenie wartości zmian napięcia w kroku 9. W rozpatrywanym przypadku przyjęto: $\varepsilon = 1E-4$. Liczba wymaganych iteracji do uzyskania zbieżności zależy od aktualnego obszaru pracy na nieliniowej charakterystyce magnesowania i jest największa w obszarze kolanowym. Dla małych i bardzo dużych prądów magnesujących, charakterystyka ta jest niemal liniowa i proces schodzi się po wykonaniu 3-4 iteracji.

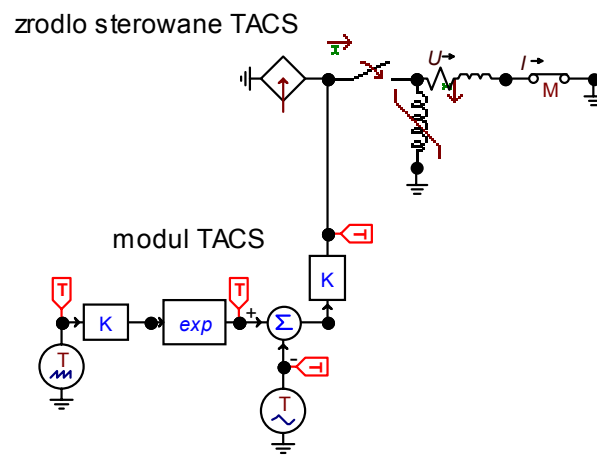
Dokładność symulacji i szybkość zbieżności procesu iteracyjnego zależą od wybranego kroku modelowania oraz od przyjętego sposobu całkowania.

Podobne wyniki można uzyskać analizując model ATP-EMTP. Schemat modelu ATPDraw jest pokazany na rys. 4. Źródło prądowe jest tu reprezentowane za pomocą modułu TACS (patrz DODATEK A). Łatwo prześledzić sposób generacji przebiegu o postaci:

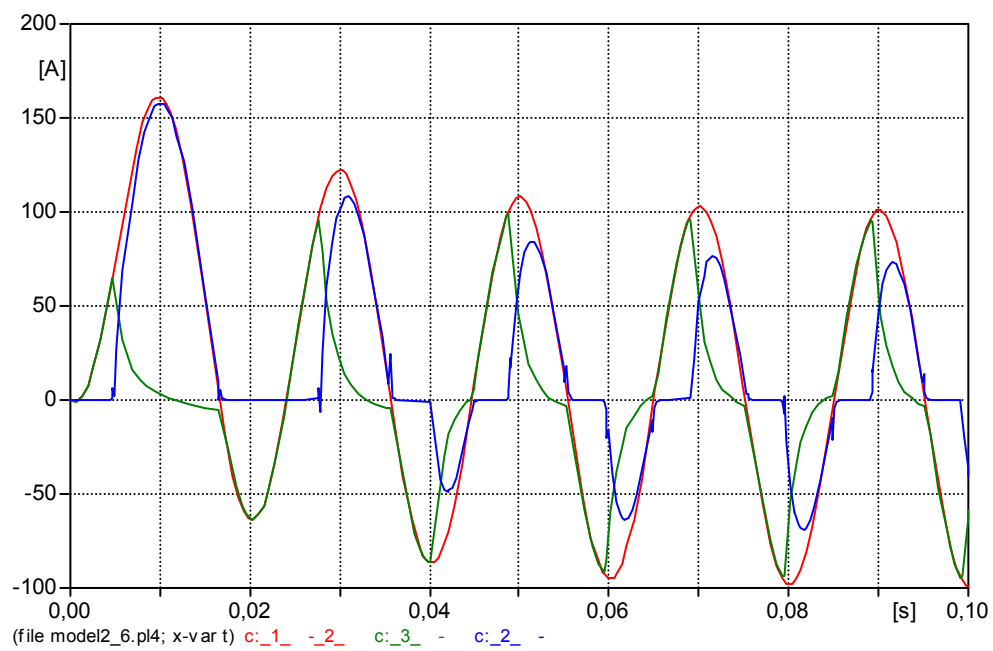
$$i(t) = 100(\cos(\omega t) - \exp(-t/T_a))$$

Który reprezentuje prąd na wejściu przekładnika. Rosnący czas t jest tu generowany za pomocą źródła liniowo narastającego sygnału (sygnał piłokształtny o dostatecznie dużym okresie).

Niektóre wyniki są pokazane na rys. 5. Widać, że obie rozpatrywane formy modelu dają zbliżone wyniki.



Rys. 4. Schemat modelu ATPDraw



Rys. 4. Przebiegi prądów uzyskane z modelu ATP-EMTP