

Roman MIKSIEWICZ

PRZYBLIŻONA PROCEDURA UWZGLĘDNIENIA NIELINIOWOŚCI OBWODU MAGNETYCZNEGO I NIESYMETRII RDZENIA W ANALIZIE NUMERYCZNEJ TRANSFORMATORA 3-FAZOWEGO

Streszczenie. Bazując na modelu strumieniowym transformatora 1-fazowego, zaproponowano przybliżoną procedurę obliczeń numerycznych dla transformatora 3-fazowego, z uwzględnieniem nieliniowości i niesymetrii obwodu magnetycznego. Dla różnych układów połączeń uzwojeń podano równania różniczkowe oraz związki prądowo-strumieniowe pozwalające na opracowanie programu komputerowego. Zamieszczono przykładowe wyniki symulacji komputerowej.

APPROXIMATED PROCEDURE REGARDING FOR NON LINEARITY AND ASYMMETRY OF MAGNETIC CIRCUIT FOR ANALYSIS OF 3-PHASE TRANSFORMER

Summary. A simplified approximative method of numerical calculations for 3-phase transformers is proposed. The method is based on the model 1-phase transformer with flux linkage variables and takes into account nonlinearity and asymmetry of a magnetic circuit. For different connections of windings, differential and algebraical equations, applied in the computer program, are given Results of computer simulation are presented.

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ПОМОЩИ ПРИБЛИЖЕННОГО МЕТОДА УЧЕТА НЕЛИНЕЙНОСТИ И АСИММЕТРИИ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ТРАНСФОРМАТОРА

Резюме. Используя математическую модель однофазного трансформатора создан алгоритм расчёта трехфазного трансформатора с учетом нелинейности и асимметрии магнитной цепи. Для разных способов соединения обмоток трансформатора представлены дифференциальные и алгебраические уравнения, положенные в основу компьютерной программы расчёта. Приведены результаты расчёта.

1. WPROWADZENIE

Uwzględnienie nieliniowości obwodu magnetycznego transformatora jest zasadniczym zagadnieniem dla prawidłowego wyznaczenia prądów udarowych przy załączeniu transformatora, zwłaszcza przy niewielkich obciążeniach. Tak więc istnieje konieczność zbudowania modelu matematycznego dogodnego z punktu widzenia rozwiązywania układu nieliniowych równań różniczkowych metodami numerycznymi. Model taki może być utworzony przy założeniu, że znane są parametry schematu zastępczego transformatora (w tym charakterystyka magnesowania), określone na podstawie danych konstrukcyjnych, zwykle możliwe tylko na etapie projektowania, lub parametry są wyznaczone na podstawie pomiarów. Model powinien być również dogodny do zastosowania w analizie stanów nieustalonych nie tylko samego transformatora ale również w połączeniu z linią przesyłową bądź odbiornikiem w postaci układu przekształtnikowego, maszyny elektrycznej itp. W zależności od przyjętych w modelu zmiennych stanu wykorzystywane są dwie metody podejścia: model "prądowy", w którym zmiennymi stanu są prądy fazowe, bądź model "strumieniowy" - zmiennymi stanu są strumienie sprzężone. Z licznych publikacji i dyskusji dotyczących przewagi jednej z metod wynika, że w ogólnym przypadku metody te są równoważne, chociaż niektórzy autorzy przy rozwiązywaniu konkretnych zagadnień symulacyjnych uznają wyższość zastosowanej przez siebie metody. W modelu matematycznym, w którym zmiennymi stanu są prądy fazowe, wykorzystuje się indukcyjność dynamiczną $L_d = d\Psi(i_m)/di_m$, natomiast w modelu "strumieniowym" - indukcyjność statyczną określoną wprost ze strumienia sprzężonego: $L_m = \Psi(i_m)/i_m$.

W niniejszej pracy dla transformatora 1-fazowego zaprezentowano model "prądowy" i "strumieniowy". Natomiast dla transformatora 3-fazowego analizę stanów nieustalonych przeprowadzono na podstawie modelu "strumieniowego". Przyjęto, że znane są parametry schematu zastępczego oraz charakterystyki magnesowania $\Psi_m = f(i_m)$ poszczególnych elementów obwodu magnetycznego, określone na podstawie pomiarów. Dla zastosowanego modelu założono ponadto:

- parametry wzdłużne ($R_1, R_2, L_{\sigma 1}, L'_{\sigma 2}$) schematu zastępczego transformatora (typu T) są stałe i niezależne od prądów płynących przez uzwojenia,
- pominięto zjawisko histerezy,
- pominięto straty w rdzeniu.

1. TRANSFORMATOR 1-FAZOWY

1.1. Model prądowy

Równania wyjściowe stanu nieustalonego mają postać:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + \frac{d\Psi_{1m}}{dt}, \\ u_2 &= -R_2 i_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + \frac{d\Psi_{2m}}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

Ψ_{1m}, Ψ_{2m} - strumienie główne sprzężone z uzwojeniami strony pierwotnej lub wtórnej.

Jeśli przyjąć, że

$$\frac{d\Psi_{1m}}{dt} = \frac{d\Psi_{1m}}{di_m} \frac{di_m}{dt} = L_d \frac{di_m}{dt}, \quad (2)$$

to przy obciążeniu odbiornikiem R_o, L_o i po sprowadzeniu uzwojenia strony wtórnej na stronę pierwotną otrzymuje się:

$$L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + L_d \frac{di_m}{dt} = u_1 - R_1 i_1, \quad (3)$$

$$(L'_{\sigma 2} + L'_o) \frac{di_1}{dt} + (-L'_{\sigma 2} - L_d - L'_o) \frac{di_m}{dt} = -(R'_2 + R'_o)(i_1 - i_m)$$

oraz

$$i_1 - i_2 = i_m. \quad (4)$$

Rozwiązanie układu równań (3) wymaga w każdym kroku całkowania wyznaczenia indukcyjności dynamicznej L_d na podstawie charakterystyki magnesowania dla danego prądu magnesującego i_m .

1.2. Model strumieniowy

Równania wyjściowe stanu nieustalonego mają postać:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}, \\ u_2 &= -R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

Ψ_1, Ψ_2 - strumienie sprzężone z uzwojeniami transformatora oraz dodatkowymi elementami indukcyjnymi zawartymi po stronie pierwotnej lub wtórnej.

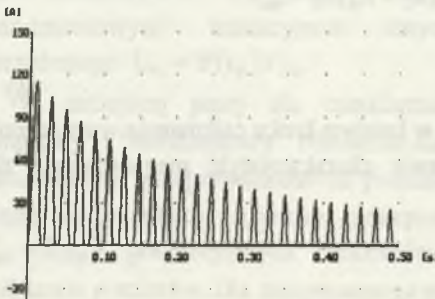
Po uporządkowaniu i sprowadzeniu odpowiednich wielkości na stronę pierwotną otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_1}{dt} &= u_1 - R_1 i_1, \\ \frac{d\Psi_2'}{dt} &= (R_2' + R_o') i_2'. \end{aligned} \quad (6)$$

Na każdym kroku całkowania prądy i_1, i_2' wyznacza się na podstawie znanych wartości strumieni sprzężonych Ψ_1, Ψ_2' ze związku między nimi:

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_m & -L_m \\ L_m & -L_{\sigma 2}' - L_o' - L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2' \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Natomiast indukcyjność główna L_m jest wyznaczana w kroku poprzednim dla znanego prądu magnesującego ze wzoru (4).



Rys.1. Przebieg czasowy prądu załączenia transformatora nieobciążonego $U = 1.2U_N$; $\Psi_{rem} = 1 \text{ Wb}$

Fig.1. Time plot of inrush current for unloaded transformer

Dla badanego transformatora 1-fazowego na podstawie modelu strumieniowego wykonano symulację stanu nieustalonego załączenia transformatora na biegu jałowym, którego przebieg czasowy przedstawia rys.1. Na podstawie wykonanych symulacji dla modelu prądowego i strumieniowego stwierdzono, że obydwa modele dają praktycznie identyczne wyniki. Niewielkie różnice pojawiają się przy dużych nasyceniach obwodu magnetycznego.

2. TRANSFORMATOR 3-FAZOWY

2.1. Model matematyczny

Celem pracy było zbudowanie takiego modelu matematycznego, który umożliwiłby symulację stanów nieustalonych transformatora, z uwzględnieniem nieliniowości obwodu magnetycznego dla strumienia głównego, o rdzeniu symetrycznym i niesymetrycznym dla różnych układów połączeń uzwojeń.

Model matematyczny transformatora 3-fazowego zawiera opis obwodu elektrycznego - równania więzów oraz opis nieliniowego obwodu magnetycznego, który najczęściej jest niesymetryczny. Równania opisujące obwód elektryczny zależą od sposobu skojarzeń poszczególnych uzwojeń. Przyjęto, że uzwojenia są symetryczne.

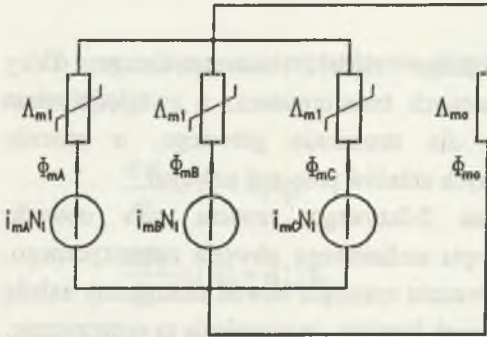
Model matematyczny (strumieniowy) transformatora 3-fazowego o nieliniowym obwodzie magnetycznym utworzono opierając się na założeniu, że tego typu transformator stanowią 3 transformatory 1-fazowe skojarzone ze sobą tylko elektrycznie. Dla takiego modelu przyjęto następnie, że znane są charakterystyki magnesowania każdego z obwodów magnetycznych i w związku z tym można dla znanych prądów magnesujących i_{mA}, i_{mB}, i_{mC} obliczyć odpowiednie indukcyjności magnesujące L_{mA}, L_{mB}, L_{mC} . Model taki nie odpowiada rzeczywistemu transformatorowi o wspólnym obwodzie magnetycznym. W celu uwzględnienia tego faktu zaproponowano uproszczoną procedurę obliczeń numerycznych, która w sposób przybliżony uwzględnia interakcję prądów płynących w poszczególnych uzwojeniach na indukcyjności magnesujące. Procedura obliczeń jest następująca:

- 1) w każdym etapie całkowania początkowo obliczane są strumienie skojarzone z uzwojeniami fazowymi (dla transformatora 1-fazowego zależność (6)),
- 2) na podstawie znanych strumieni określa się wartości prądów fazowych (dla transformatora 1-fazowego zależność (7)),
- 3) oblicza się następnie prądy magnesujące:

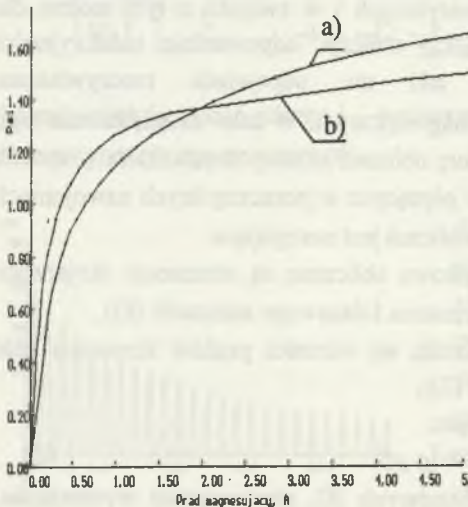
$$i_{mA} = i_A - i'_a; \quad i_{mB} = i_B - i'_b; \quad i_{mC} = i_C - i'_c \quad (8)$$

- 4) dla znanych wartości prądów magnesujących (8), stanowiących wymuszenia, oblicza się rozptył strumieni w poszczególnych kolumnach, wykorzystując obwód magnetyczny (rys.2), uwzględniający również drogę magnetyczną dla strumienia zamykającego się przez powietrze i kadź transformatora,
- 5) dla obliczonych wartości strumieni $\Psi_{mA}, \Psi_{mB}, \Psi_{mC}$, z charakterystyk magnesowania dla poszczególnych kolumn wyznacza się indukcyjności

magnesujące związane z poszczególnymi fazami: L_{mA} , L_{mB} , L_{mC} , których wartości są wykorzystywane w następnym kroku całkowania.



Rys.2. Zastępczy schemat obwodu magnetycznego transformatora 3-fazowego
Fig.2. Equivalent magnetic circuit of 3-phase transformer



Rys.3. Pomiarowe charakterystyki magnesowania kolumn:

a) skrajnej, b) środkowej

Fig.3. Measured magnetisation characteristics :

a) outer limb, b) inner limb

Dla rdzenia niesymetrycznego 3-kolumnowego ze względu na występującą symetrię rozłożenia kolumn skrajnych przyjęto, że charakterystyki magnesowania tych kolumn są identyczne. Przykładowe, zmierzone charakterystyki magnesowania kolumn skrajnych i kolumny środkowej przedstawia rys.3. Dla kolumny reprezentującej strumień dla składowej zerowej Φ_0 przyjęto liniową charakterystykę magnesowania.

Warunki początkowe na strumień remanentu $\Phi(0)$ (przy pominięciu zjawiska histerezy) w poszczególnych kolumnach określa się na podstawie zadawanej wartości strumienia dla wybranej kolumny skrajnej fazy A, a w pozostałych kolumnach oblicza się rozwiązując obwód magnetyczny z rys.2.

W kolejnych podrozdziałach dla wybranych układów połączeń uzwojeń transformatora przedstawiono kompletne równania różniczkowe oraz równania algebraiczne pozwalające na symulację różnych stanów nieustalonych transformatora przy obciążeniu symetrycznym odbiornikiem rezystancyjno-indukcyjnym R_o, L_o . Podano wyniki przykładowe

wych symulacji związanych ze stanem jałowym transformatora dla rdzenia symetrycznego i niesymetrycznego, gdyż wówczas najdobitniej ujawnia się zjawisko nasycania się obwodu magnetycznego.

2.2. Układ połączeń $Y_0 y_0$

Dla układu $Y_0 y_0$ równania różniczkowe mają postać:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{k1}}{dt} &= u_{k1} - R_1 i_{k1}, & k1=A,B,C, \\ \frac{d\Psi'_{k2}}{dt} &= -(R'_2 + R'_0) i'_{k2}, & k2=a,b,c, \end{aligned} \quad (9)$$

zaś związki między strumieniami skojarzonymi i prądami fazowymi:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi'_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mA} & -L_{mA} \\ L_{mA} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i'_a \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \Psi_B \\ \Psi'_b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mB} & -L_{mB} \\ L_{mB} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_B \\ i'_b \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \Psi_C \\ \Psi'_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mC} & -L_{mC} \\ L_{mC} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_C \\ i'_c \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Prądy płynące w przewodach zerowych wynoszą odpowiednio dla strony pierwotnej i wtórnej:

$$i_{o1} = \sum_{k1=A,B,C} i_{k1}, \quad i_{o2} = \sum_{k2=a,b,c} i'_{k2}. \quad (11)$$

2.3. Układ połączeń Y_0d :

Dla układu Y_0d utworzony jest układ 6 równań różniczkowych:

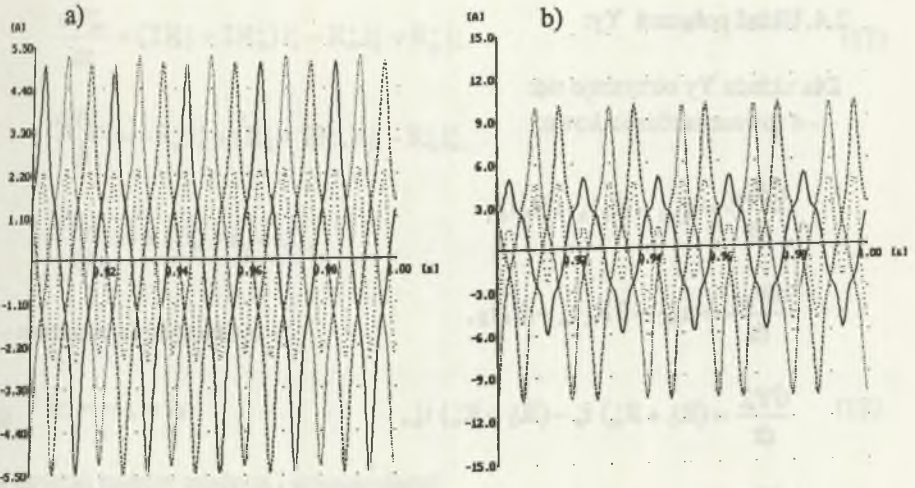
$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{kl}}{dt} &= u_{kl} - R_l i_{kl}, & k,l &= A, B, C, \\ \frac{d\Psi'_{a0}}{dt} &= (2R'_2 + 2R'_0) i'_a - R'_0 i'_b - R'_0 i'_c, \\ \frac{d\Psi'_{b0}}{dt} &= -R'_0 i'_a + (R'_2 + 2R'_0) i'_b - R'_0 i'_c, \\ \frac{d\Psi'_{abc}}{dt} &= R'_2 (i'_a + i'_b + i'_c) \end{aligned} \quad (12)$$

oraz związki między prądami i strumieniami skojarzonymi: (13)

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi'_{a0} \\ \Psi'_{b0} \\ \Psi'_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mA} & 0 & 0 & -L_{mA} & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma 1} + L_{mB} & 0 & 0 & -L_{mB} & 0 \\ 0 & 0 & L_{\sigma 1} + L_{mC} & 0 & 0 & -L_{mC} \\ L_{mA} & 0 & 0 & -L'_{\sigma 2} - 3L'_0 - L_{mA} & -L'_0 & -L'_0 \\ 0 & L_{mB} & 0 & L'_0 & -L'_{\sigma 2} - 3L'_0 - L_{mB} & L'_0 \\ L_{mA} & L_{mB} & L_{mC} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mA} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mB} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix},$$

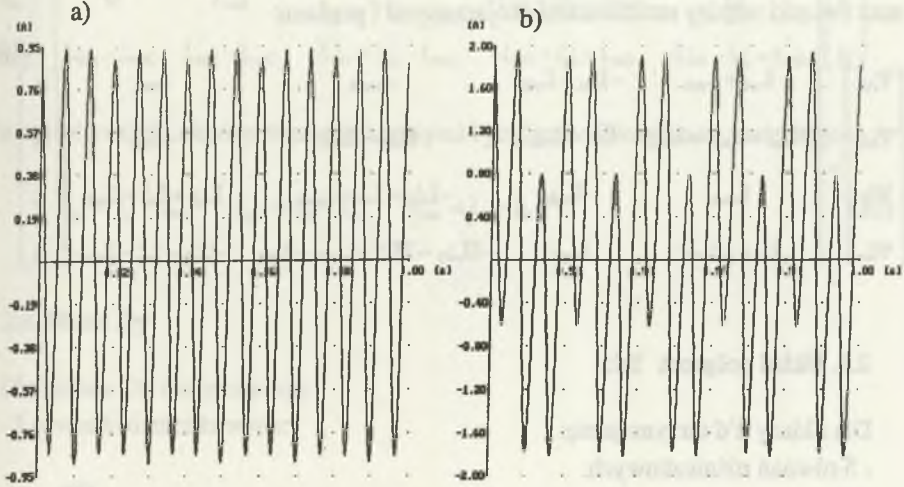
gdzie:

Ψ_{a0}, Ψ_{b0} - strumienie skojarzone z uzwojeniem strony wtórnej oraz elementem indukcyjnym odbiornika.



Rys.4. Przebiegi czasowe prądów fazowych w stanie jałowym transformatora Y_0d ;
 a) rdzeń symetryczny, b) rdzeń niesymetryczny

Fig.4. Time plots of currents in primary side windings in steady-state for unloaded transformer; a) symmetrical core, b) unsymmetrical core



Rys.5. Przebiegi czasowe prądów strony wtórnej w stanie jałowym transformatora Y_0d ;
 a) rdzeń symetryczny, b) rdzeń niesymetryczny

Fig.5. Time plots of currents in secondary side in steady-state for unloaded transformer:
 a) symmetrical core, b) unsymmetrical core

2.4. Układ połączeń Yy:

Dla układu Yy otrzymuje się:

- 4 równania różniczkowe:

$$\frac{d\Psi_{AB}}{dt} = u_{AB} - R_1 i_A + R_1 i_B,$$

$$\frac{d\Psi_{AC}}{dt} = u_{AC} - 2R_1 i_A - R_1 i_B,$$

$$\frac{d\Psi'_{ab}}{dt} = (R'_2 + R'_0) i'_a - (R'_2 + R'_0) i'_b, \quad (14)$$

$$\frac{d\Psi'_{ac}}{dt} = 2(R'_2 + R'_0) i'_a - (R'_2 + R'_0) i'_b,$$

-2 równania algebraiczne:

$$i_C = -i_A - i_B,$$

$$i_c = -i_a - i_b \quad (15)$$

oraz związku między strumieniami skojarzonymi i prądami:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{AB} \\ \Psi_{AC} \\ \Psi'_{ib} \\ \Psi'_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mA} & -L_{\sigma 1} - L_{mB} & -L_{mA} & L_{mB} \\ 2L_{\sigma 1} + L_{mA} + L_{mC} & L_{\sigma 1} + L_{mC} & -L_{mA} - L_{mC} & -L_{mC} \\ L_{mA} & -L_{mB} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mA} & L'_{\sigma 2} + L'_0 + L_{mB} \\ L_{mA} + L_{mC} & L_{mC} & -2L'_{\sigma 2} - 2L'_0 - L_{mA} - L_{mC} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i'_a \\ i'_b \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.5. Układ połączeń Yd:

Dla układy Yd otrzymuje się:

- 5 równań różniczkowych:

$$\frac{d\Psi_{AB}}{dt} = u_{AB} - R_1 i_A + R_1 i_B,$$

$$\frac{d\Psi_{AC}}{dt} = u_{AC} - 2R_1 i_A - R_1 i_B,$$

$$\frac{d\Psi'_{ao}}{dt} = (2R'_2 + 2R'_0)i'_a - R'_0 i'_b - R'_0 i'_c, \quad (17)$$

$$\frac{d\Psi'_{bo}}{dt} = -R'_0 i'_a + (R'_2 + 2R'_0)i'_b - R'_0 i'_c,$$

$$\frac{d\Psi'_{abc}}{dt} = R'_2(i'_a + i'_b + i'_c),$$

- równanie algebraiczne:

$$i_c = -i_A - i_B \quad (18)$$

oraz związki między prądami i strumieniami:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{AB} \\ \Psi_{AC} \\ \Psi'_{bo} \\ \Psi''_{bo} \\ \Psi'_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mA} & -L_{\sigma 1} - L_{mB} & -L_{mA} & L_{mB} & 0 \\ L_{\sigma 1} + L_{mA} & 0 & -L_{mA} & 0 & L_{mC} \\ L_{mA} & 0 & -L'_{\sigma 2} - 3L'_0 - L_{mA} & -L'_0 & -L'_0 \\ 0 & L_{mB} & L'_0 & -L'_{\sigma 2} - 3L'_0 - L_{mB} & L'_0 \\ L_{mA} - L_{mC} & L_{mB} - L_{mC} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mA} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mB} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Natomiast związki między prądami fazowymi i prądami odbiornika są następujące:

$$i_{oa} = i_a - i_c, \quad i_{ob} = i_b - i_a, \quad i_{oc} = i_c - i_b. \quad (20)$$

2.6. Układ Dy

Dla układu Dy otrzymuje się:

- 5 równań różniczkowych:

$$\frac{d\Psi_A}{dt} = u_{AB} - R_1 i_A,$$

$$\frac{d\Psi_B}{dt} = u_{BC} - R_1 i_B,$$

$$\frac{d\Psi_{ABC}}{dt} = -R_1(i_A + i_B + i_C), \quad (21)$$

$$\frac{d\Psi'_{ab}}{dt} = (R'_2 + R'_0) i'_a - (R'_2 + R'_0) i'_b,$$

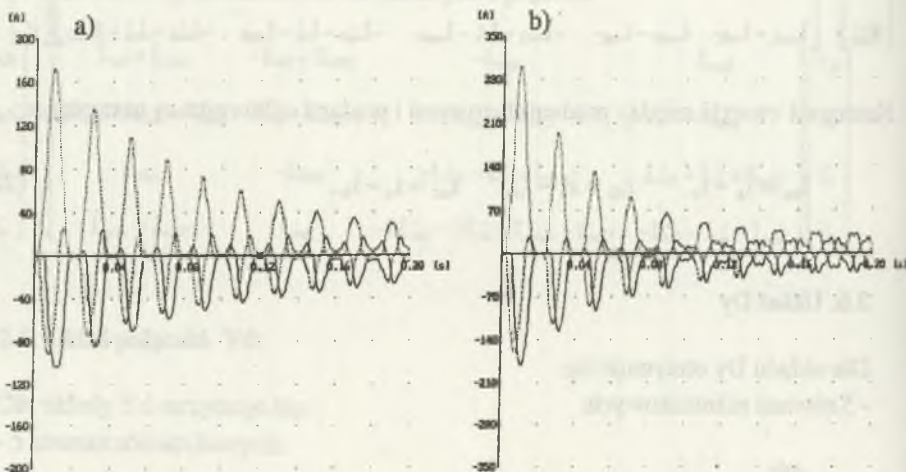
$$\frac{d\Psi'_{ac}}{dt} = 2(R'_2 + R'_0) i'_a - (R'_2 + R'_0) i'_b,$$

- równanie algebraiczne:

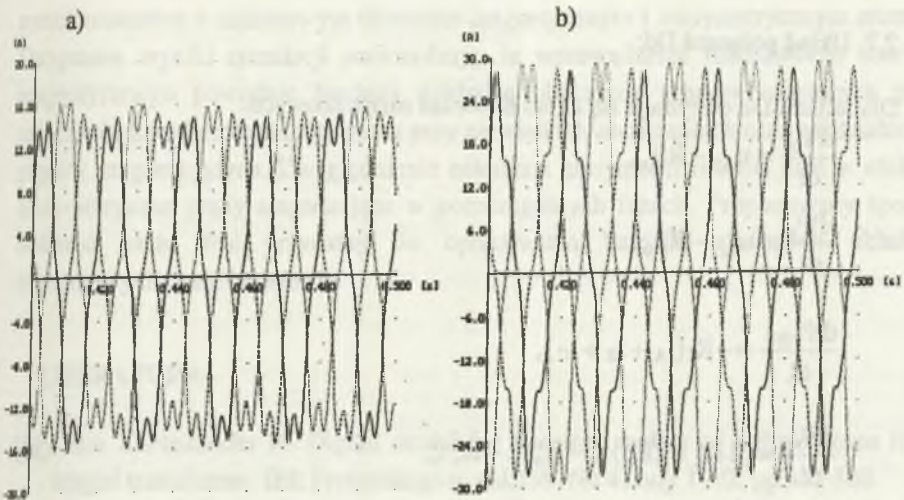
$$i_c = -i_a - i_b \quad (22)$$

oraz związki między strumieniami skojarzonymi i prądami fazowymi: (23)

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_{ABC} \\ \Psi'_{ab} \\ \Psi'_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mA} & 0 & -L_{mA} & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma 1} + L_{mB} & 0 & -L_{mB} & 0 \\ L_{\sigma 1} + L_{mA} & L_{\sigma 1} + L_{mB} & L_{\sigma 1} + L_{mC} & -L_{mA} + L_{mC} & -L_{mB} + L_{mC} \\ L_{mA} & -L_{mB} & 0 & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mA} & L'_{\sigma 2} + L'_0 + L_{mB} \\ L_{mA} & 0 & -L_{mC} & -2L'_{\sigma 2} - 2L'_0 - L_{mA} - L_{mC} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i'_a \\ i'_b \end{bmatrix}$$



Rys.6. Przebiegi czasowe prądów przewodowych połączeniowych transformatora nieobciążonego Dy; a) rdzeń symetryczny, b) rdzeń niesymetryczny
 Fig.6. Time plots of inrush currents in primary side windings for unloaded transformer; a) symmetrical core, b) unsymmetrical core

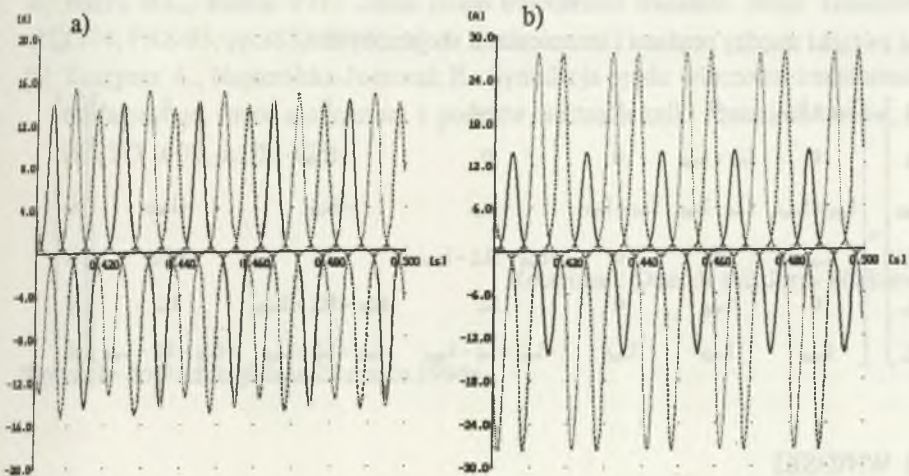


Rys.7. Przebiegi czasowe prądów przewodowych w stanie jałowym transformatora Dy;

a) rdzeń symetryczny, b) rdzeń niesymetryczny

Fig.7. Time plots of currents in steady-state for unloaded transformer;

a) symmetrical core, b) unsymmetrical core



Rys.8. Przebiegi czasowe prądów fazowych w stanie jałowym transformatora Dy;

a) rdzeń symetryczny, b) rdzeń niesymetryczny

Fig.8. Time plots of phases currents in steady-state for unloaded transformer;

a) symmetrical core, b) unsymmetrical core

2.7. Układ połączeń Dd:

Dla układu Dd otrzymuje się układ 6 równań różniczkowych:

$$\frac{d\Psi_A}{dt} = u_{AB} - R_1 i_A,$$

$$\frac{d\Psi_B}{dt} = u_{BC} - R_1 i_B,$$

$$\frac{d\Psi_{ABC}}{dt} = -R_1(i_A + i_B + i_C),$$

$$\frac{d\Psi'_{a0}}{dt} = (2R'_2 + 2R'_0)i'_a - R'_0 i'_b - R'_0 i'_c, \quad (24)$$

$$\frac{d\Psi'_{b0}}{dt} = -R'_0 i'_a + (R'_2 + 2R'_0)i'_b - R'_0 i'_c,$$

$$\frac{d\Psi'_{abc}}{dt} = R'_2(i'_a + i'_b + i'_c)$$

oraz związki między prądami i strumieniami skojarzonymi:

(25)

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_{ABC} \\ \Psi'_{a0} \\ \Psi'_{b0} \\ \Psi'_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_{mA} & 0 & 0 & -L_{mA} & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma 1} + L_{mB} & 0 & 0 & -L_{mB} & 0 \\ L_{\sigma 1} + L_{mA} & L_{\sigma 1} + L_{mB} & L_{\sigma 1} + L_{mC} & -L_{mA} & -L_{mB} & -L_{mC} \\ L_{mA} & 0 & 0 & -L'_{\sigma 2} - 3L'_0 - L_{mA} & -L'_0 & -L'_0 \\ 0 & L_{mB} & 0 & L'_0 & -L'_{\sigma 2} - 3L'_0 - L_{mB} & L'_0 \\ L_{mA} & L_{mB} & L_{mC} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mA} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mB} & -L'_{\sigma 2} - L'_0 - L_{mC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix}$$

3. WNIOSKI

Przedstawiony uproszczony i przybliżony sposób obliczeń numerycznych transformatorów 3-fazowych oraz podane kompletne układy równań różniczkowych i algebraicznych dla różnych układów połączeń uzwojeń pozwalają na opracowanie programu komputerowego, umożliwiającego symulację stanów nieustalonych

transformatorów o nieliniowym obwodzie magnetycznym i niesymetrycznym rdzeniu. Otrzymane wyniki symulacji potwierdzają, że wprowadzenie nieliniowego obwodu magnetycznego powoduje bardziej dokładne obliczanie prądów udarowych przyłączaniu transformatora, zwłaszcza przy niewielkich obciążeniach oraz odkształcenie prądów magnesujących. Uwzględnienie natomiast niesymetrii rdzenia daje w efekcie niesymetryczne prądy magnesujące w poszczególnych fazach. Proponowany sposób obliczeń może być przydatny do opracowania bardziej złożonych układów zawierających transformator.

LITERATURA

- [1] Chen X., Neudorfer P.: Digital model for transient studies of a three-phase five-legged transformer. IEE Proceedings-c, vol.139, No 4, July 1992, pp.351-358.
- [2] Hatzargyriou N.D., Prousalidis J.M., Papadias B.C.: Generalised transformer model based on the analysis of its magnetic core circuit. IEE Proceedings-c, vol.140, no 4, July 1993, pp.269-278.
- [3] Medina A., Arrilaga J.: Simulation of multilimb power transformers in the harmonic domain. IEE Proceedings-c, vol.139, No 3, May 1992, pp.269-276.
- [4] Nakra H.L., Barton T.H.: Three phase transformer transient. IEEE Transactions 1974, PAS-93, pp.1810-1819.
- [5] Tuszyner A., Napieralska-Juszczak E.: Symulacja prądu włączenia transformatora trójfazowego. Prace seminarium z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów, XIV SPETO 1991, ss.317-325.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994r

Abstract

Two models of a transformer used in analysis of transients which take into account nonlinearity of a magnetic circuit are described. At the beginning, differential equations

of a 1-phase transformer in which state variables are currents (eqns 1÷4) or flux linkages (eqns 5÷7), respectively, are presented. Results of computer simulation allow to state for both models very approximated results are obtained. Basing on the model with flux linkage variables the simplified approximative method of numerical calculations for 3-phase transformers is proposed. It was assumed, that 3-phase transformers can be considered as a system of three 1-phase transformers, whose windings are electrically connected in star or delta. Magnetizing inductances are calculated at each integration step using a real 3-phase magnetic circuit (Fig.2). It enables to take into account in approximative way magnetic couplings between windings. For the most often applied connections of windings differential and algebraical equations are given: Y_0y_0 (eqns 9÷11), Y_0d (eqns 12÷13), Yy (eqns 14÷16), Yd (eqns 17÷20), Dy (eqns 21÷23), Dd (eqns 24÷25). It allows to create a computer program for simulation of different transient states. The results of computer simulation of steady-states (Figs 4,5,7,8) and transient states (Fig.6) for a 3-phase transformer with an unsymmetrical core are presented and compared with the results of computer simulation for a transformer with a symmetrical core.