

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej

Dariusz SZYMAŃSKI  
ABB ZWUS Signal sp. z o.o., Katowice

### SCHEMATY ZASTĘPCZE TRANSFORMATORA 3-FAZOWEGO WE WSPÓLRZĘDNYCH 2-OSIOWYCH PRZY UWZGLĘDNIENIU ASYMETRII MAGNETYCZNEJ RDZENIA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę analizy transformatora 3-fazowego z uwzględnieniem asymetrii magnetycznej rdzenia. Została określona nowa macierz transformacji 2-osiowej, która umożliwia rozsprzężenie układu równań różniczkowych, co pozwala na sformułowanie schematu zastępczego transformatora 3-fazowego w postaci dwóch niezależnych schematów zastępczych transformatorów 1-fazowych. Jako przykład obliczeniowy rozpatrzono załączenie 3-fazowego transformatora na sieć.

### EQUIVALENT CIRCUITS OF 3-PHASE TRANSFORMER IN 2-AXIAL COORDINATES ALLOWING FOR MAGNETIC ASYMMETRY OF THE CORE

**Summary.** In this paper the method for analysing a 3-phase transformer with magnetic asymmetry of the core is presented. The new 2-axis transformation matrix is determined which enables to decouple the set of differential equations. This leads to formulating 3-phase transformer equivalent circuit consisting of two autonomous 1-phase transformer equivalent circuits. As an example the switch-on of a 3-phase transformer is considered at steady and transient state.

## 1. WSTĘP I ZAŁOŻENIA

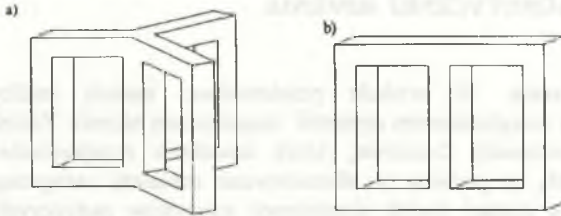
W klasycznej analizie pracy transformatora 3-fazowego przyjmuje się założenie upraszczające o pełnej symetrii magnetycznej rdzenia, które to założenie można wyrazić następująco:

$$\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = \Lambda_k \quad (1)$$

gdzie:

- $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$  - przewodności magnetyczne poszczególnych kolumn,
- $\Lambda_k$  - średnia przewodność magnetyczna kolumny.

Własności magnetyczne opisane równością (1) posiada rdzeń transformatora przedstawiony na rys. 1a .



Rys. 1. Rdzeń transformatora symetrycznego i asymetrycznego magnetycznie  
Fig. 1. Symmetrical and asymmetrical transformer core

W niniejszych rozważaniach zrezygnowano z założenia (1), przyjmując asymetrię magnetyczną rdzenia, charakterystyczną dla rzeczywistego transformatora:

$$\Lambda_1 = \Lambda_3 = \Lambda_k; \quad \Lambda_2 = k\Lambda_k, \quad (2)$$

gdzie:

- $\Lambda_1, \Lambda_3$  - przewodności magnetyczne kolumn skrajnych,
- $\Lambda_2$  - przewodność magnetyczna kolumny środkowej,
- $k > 1$  - współczynnik asymetrii magnetycznej.

Własności opisane równaniami (2) posiada rdzeń przedstawiony na rys. 1b.

Celem pracy jest określenie transformacji 2-osiowej  $K_k$ , umożliwiającej sformułowanie schematów zastępczych transformatora 3-fazowego z asymetrią magnetyczną rdzenia w nowym układzie współrzędnych  $\alpha_k, \beta_k, 0$ . W rozważaniach pominięto nieliniowość obwodu magnetycznego transformatora, co może być źródłem istotnych błędów; w obliczeniach technicznych nieliniowość obwodu magnetycznego można jednak uwzględnić w przybliżony sposób poprzez modyfikację wartości indukcyjności magnesującej za pomocą współczynnika szczytu prądu magnesującego  $\sigma_2$ . Dla ustalenia uwagi przyjęto przekładnię napięciową transformatora  $n_{12} = 1$ . Ponadto założono zerową wartość przewodności dla tzw. strumienia jarzmowego (strumienia zerowego zamykającego się pomiędzy kolumnami poprzez olej i każdą lub poprzez powietrze - poza obrębem rdzenia).

## 2. ZARYS TEORII TRANSFORMATORA Z RDZENIEM O SYMETRII MAGNETYCZNEJ

Transformator 3-fazowy opisany jest następującymi równaniami:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} u_1 &= [u_{1A}, u_{1B}, u_{1C}]^T && \text{- wektor napięć strony pierwotnej,} \\ u_2 &= [u_{2A}, u_{2B}, u_{2C}]^T && \text{- wektor napięć strony wtórnej,} \\ R_1 &= \text{diag}[R_1, R_1, R_1] && \text{- macierz rezystancji strony pierwotnej,} \\ R_2 &= \text{diag}[R_2, R_2, R_2] && \text{- macierz rezystancji strony wtórnej,} \end{aligned}$$

przy czym:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} L_{1\sigma} & 0 \\ 0 & L_{2\sigma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & M \\ M & M \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} L_{\sigma 1} &= \text{diag}[L_{\sigma 1}, L_{\sigma 1}, L_{\sigma 1}] && \text{- macierz indukcyjności rozproszeń strony pierwotnej,} \\ L_{\sigma 2} &= \text{diag}[L_{\sigma 2}, L_{\sigma 2}, L_{\sigma 2}] && \text{- macierz indukcyjności rozproszeń strony wtórnej,} \\ M &= \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} \end{bmatrix} && \text{- macierz indukcyjności własnych głównych i wzajemnych.} \end{aligned} \quad (5)$$

Przy uwzględnieniu założenia (1) otrzymuje się macierz indukcyjności własnych głównych i wzajemnych w następującej postaci:

$$M = \frac{2}{3} \Lambda_1 z^2 \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Podstawą dla wyznaczenia ortonormalnej macierzy transformacji  $K$  diagonalizującej macierz (6) jest równanie:

$$(M - \lambda_i I) X_i = 0 \quad i=1, 2, 3 \quad (7)$$

gdzie:

- $\lambda_i$  -  $i$ -ta wartość własna macierzy indukcyjności  $M$ ,
- $X_i$  - wektor własny macierzy indukcyjności  $M$  odpowiadający  $i$ -tej wartości własnej,

oraz warunki ortogonalności i unormowania wektorów własnych:

$$X_i^T X_j = 0 \quad i \neq j, \quad X_i^T X_i = 1. \quad (8)$$

Wartości własne wyznaczone z równania (7) wynoszą:

$$\lambda_1 = \frac{3}{2}, \lambda_2 = \frac{3}{2}, \lambda_3 = 0. \quad (9)$$

Wyznaczając wektory własne na podstawie relacji (6) ÷ (9) otrzymuje się macierz transformacji 2-osiowej  $K$  o postaci:

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

prowadzącą do diagonalizacji macierzy (6).

Wektory napięć, prądów i strumieni skojarzonych odpowiednio strony pierwotnej i wtórnej w nowym układzie współrzędnych (we współrzędnych  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0) wyznaczone są według relacji:

$$w_{1,2}^{\alpha,\beta} = K_k w_{1,2}, \quad w_{1,2} = u_{1,2}, \dot{i}_{1,2}, \psi_{1,2} \quad (11)$$

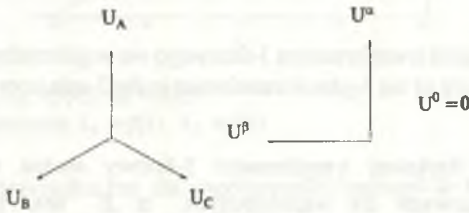
gdzie:

$$w_{1,2}^{\alpha,\beta} = [w_{1,2}^\alpha, w_{1,2}^\beta, w_{1,2}^0]^T, \quad w_{1,2} = [w_{1,2A}, w_{1,2B}, w_{1,2C}]^T.$$

Zgodnie z relacjami (11) dla 3-fazowego symetrycznego układu napięć otrzymuje się:

$$u_1^\alpha = \sqrt{3}U \sin(\omega t + \alpha), \quad u_1^\beta = \sqrt{3}U \cos(\omega t + \alpha), \quad u_1^0 = 0 \quad (12)$$

a więc 2-fazowy symetryczny układ napięć (gdzie:  $\alpha$  - kąt początkowy napięcia fazowego fazy A). Wskazy napięć symetrycznego układu 3-fazowego oraz układu 2-fazowego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wskazy napięć układu 3-fazowego A,B,C oraz układu 2-fazowego  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0  
Fig. 2. The A,B,C 3-phase and the  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0 2-phase phazors

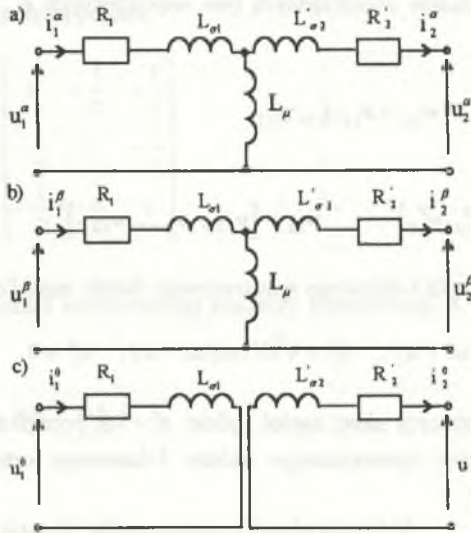
Równania transformatora (3), (4) po transformacji do współrzędnych 2-osiowych  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0 przy użyciu macierzy transformacji  $K$  (10) przyjmują postać:

$$\begin{bmatrix} u_1^{\alpha,\beta} \\ u_2^{\alpha,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1^{\alpha,\beta} \\ i_2^{\alpha,\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{\sigma 1} + L_\mu & 0 \\ 0 & L_{\sigma 2} + L_\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_1^{\alpha,\beta} \\ \dot{i}_2^{\alpha,\beta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

gdzie:

$$L_\mu = \begin{bmatrix} L_\mu & 0 & 0 \\ 0 & L_\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad L_\mu = \Lambda_k z^2. \quad (14)$$

Z równań (13), (14) wynikają schematy zastępcze transformatora przedstawione na rys. 3:



Rys. 3. Schematy zastępcze transformatora 3-fazowego we współrzędnych 2-osiowych  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0  
Fig. 3. Equivalent circuits of the 3-phase transformer in the 2-axis coordinates  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0

W interpretacji fizycznej transformator 3-fazowy można więc zastąpić dwoma transformatorami 1-fazowymi dla współrzędnych  $\alpha$ ,  $\beta$  oraz prostym obwodem dla współrzędnej 0.

### 3. TEORIA TRANSFORMATORA Z RDZENIEM O ASYMETRII MAGNETYCZNEJ

Przy uwzględnieniu założenia (2) otrzymuje się macierz indukcyjności własnych głównych i wzajemnych w następującej postaci:

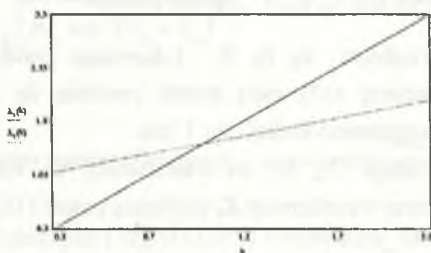
$$M = \frac{2}{k+2} \Lambda_k z^2 \begin{bmatrix} \frac{k+1}{2} & -\frac{k}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{k}{2} & k & -\frac{k}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{k}{2} & \frac{k+1}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Dla szczególnego przypadku, tzn. dla współczynnika asymetrii  $k=1$  (wzór 2), odpowiadającego symetrycznej budowie rdzenia (wzór 1), macierz indukcyjności własnych głównych i wzajemnych (15) przekształca się do macierzy (6).

Wartości własne wyznaczone z równania (7) przy uwzględnieniu (15) wynoszą:

$$\lambda_1 = \frac{3}{2}k, \quad \lambda_2 = \frac{k+2}{2}, \quad \lambda_3 = 0. \quad (16)$$

Przebieg wartości własnych w funkcji współczynnika asymetrii  $\lambda_1 = f(k)$ ,  $\lambda_2 = f(k)$ , przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wykres funkcji  $\lambda_1 = f(k)$ ,  $\lambda_2 = f(k)$

Fig. 4. Graph of the functions  $\lambda_1 = f(k)$ ,  $\lambda_2 = f(k)$

Dla szczególnego przypadku, tzn. dla współczynnika asymetrii  $k=1$ , wartości własne (16) przechodzą do postaci określonych wzorem (9). Wyznaczając wektory własne na podstawie relacji (15), (7), (8), (16) otrzymuje się macierz transformacji 2-osiowej  $K_k$  o postaci:

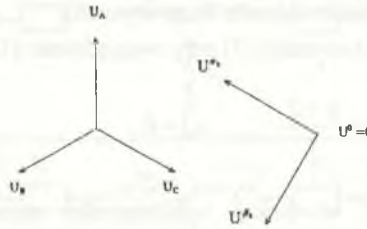
$$K_k = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

prowadzącą do diagonalizacji macierzy (15), jak i macierzy (6), będącej szczególnym przypadkiem macierzy (15) dla wartości współczynnika  $k=1$ . Macierz transformacji (17) zawiera te same elementy co macierz (10), ale w innym uporządkowaniu.

Zgodnie z relacjami (11) dla 3-fazowego symetrycznego układu napięć otrzymuje się:

$$u_1^{*a} = \sqrt{3}U \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}), \quad u_1^{*b} = \sqrt{3}U \cos(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}), \quad u_1^{*c} = 0. \quad (18)$$

Wskaźy napięć symetrycznego układu 3-fazowego oraz układu 2-fazowego - otrzymanego po transformacji - przedstawiono na rys. 5.



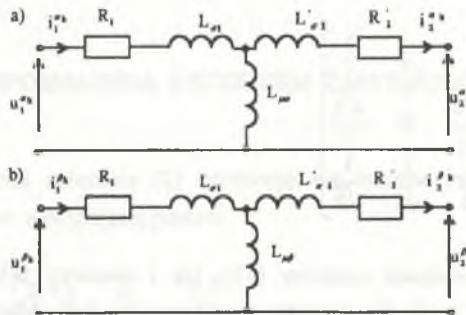
Rys. 5. Wskaźy napięć układu 3-fazowego oraz układu 2-fazowego  $\alpha_k, \beta_k, 0$   
Fig. 5. The A,B,C 3-phase and  $\alpha_k, \beta_k, 0$  2-phase phazors

Napięcia we współrzędnych  $\alpha_k, \beta_k, 0$  3-fazowego symetrycznego układu napięć, uzyskane za pomocą macierzy (17), mają postać podobną do (12) i różnią się tylko współczynnikiem  $\pi/3$  w argumencie funkcji sin i cos.

Równania transformatora (3), (4) po transformacji do współrzędnych 2-osiowych  $\alpha_k, \beta_k, 0$  przy użyciu macierzy transformacji  $K_k$  przyjmują postać (13), przy czym:

$$L_{\mu} = \begin{bmatrix} L_{\mu\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & L_{\mu\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, L_{\mu\alpha} = \frac{3k}{k+2} L_{\mu}, \quad L_{\mu\beta} = L_{\mu}. \quad (19)$$

Z równań (13) po uwzględnieniu relacji (19) wynikają schematy zastępcze transformatora przedstawione na rys. 6, przy czym schemat dla składowej 0 jest identyczny ze schematem przedstawionym na rys. 3c.



Rys. 6. Schematy zastępcze transformatora 3-fazowego we współrzędnych 2-osiowych  $\alpha_k, \beta_k$   
Fig. 6. Equivalent circuits of the 3-phase transformer in the 2-axis co-ordinates  $\alpha_k, \beta_k$

W przypadku transformatora z rdzeniem symetrycznym ( $k=1$ ) zachodzi:  $L_{\mu\alpha} = L_{\mu\beta} = L_{\mu}$ .



#### 4. ANALIZA PORÓWNAWCZA ZAŁĄCZANIA TRANSFORMATORA NA SIĘĆ BEZ UWZGLĘDNIENIA I PRZY UWZGLĘDNIENIU ASYMETRII RDZENIA

Analizie poddano przykładowy 3-fazowy transformator o następujących danych znamionowych:  $U_{1n}=110\text{kV}$ ,  $U_{2n}=33\text{kV}$ ,  $S_n=1\text{MV}\cdot\text{A}$ ,  $f_n=50\text{Hz}$ ,  $\Delta P_{\text{Cun}}=82\text{kW}$ ,  $\Delta P_{\text{Fem}}=25\text{kW}$ ,  $I_{0n\%}=3.2\%$ ,  $u_{2\%}=10.5\%$ ,  $Yy0$ ,  $R_1=R_2=4.8\Omega$ ,  $L_{\sigma 1}=L_{\sigma 2}=0.2\text{H}$ ,  $L_\mu=120\text{H}$ .

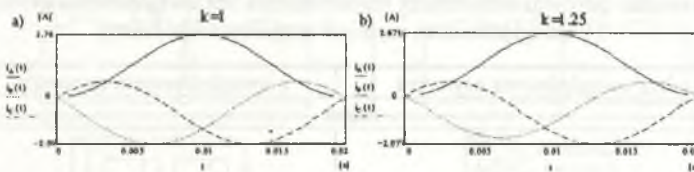
Przy wykorzystaniu wyrażenia na prąd stanu nieustalonego 1-fazowego transformatora załączanego na sieć:

$$i(t) = \frac{U_{1n} (\sin(\omega t + \alpha - \varphi_0) - \sin(\alpha - \varphi_0) e^{-\frac{t}{T_0}})}{\sqrt{3} \sqrt{[R_1^2 + \omega^2 (L_\sigma + L_\mu)^2]}}$$

gdzie:

$$\alpha - \text{kąt początkowy napięcia fazowego, } \varphi_0 = \arctg\left(\frac{\omega L_\sigma + \omega L_\mu}{R_1}\right), \quad T_0 = \frac{L_\sigma + L_\mu}{R_1},$$

oraz po wykorzystaniu zależności (18), (13), (19) i schematów zastępczych z rys. 6 uzyskano, dla załączenia 3-fazowego transformatora w chwili przejścia przez zero napięcia fazy A ( $\alpha=0$  - najniekorzystniejszy przypadek), przebiegi prądów fazowych przedstawione na rys. 7a (dla współczynnika asymetrii  $k=1$ ) i rys. 7b (dla współczynnika asymetrii  $k=1.25$ ).



Rys. 7. Wykres czasowy prądów fazowych przy załączaniu transformatora na sieć

Fig. 7. Current v. time curves during the 3-phase transformer switch-on

Jak widać z wykresów 7 a), b) wartości maksymalne prądów w poszczególnych fazach uzyskane przy uwzględnieniu asymetrii magnetycznej rdzenia ( $k=1.25$ ) są mniejsze niż wartości maksymalne uzyskane przy założonej symetrii rdzenia ( $k=1$ ) zarówno w stanie nieustalonym, jak i ustalonym. Uzyskane wyniki dla stanu nieustalonego i ustalonego zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1  
Stosunek wartości maksymalnych prądów fazowych przy  $k=1.25$   
do wartości maksymalnych prądów fazowych przy  $k=1$

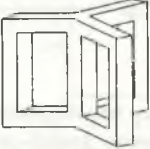
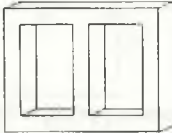
Stan nieustalony			Stan ustalony		
faza A	faza B	faza C	faza A	faza B	faza C
0.97	0.87	1	0.97	0.87	0.97

#### 4. PODSUMOWANIE

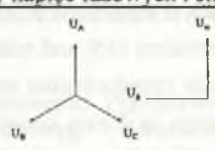
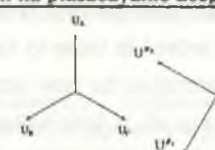
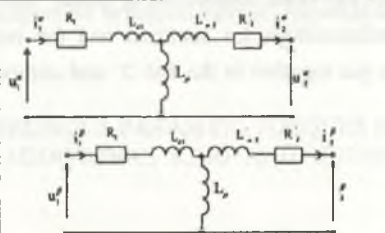
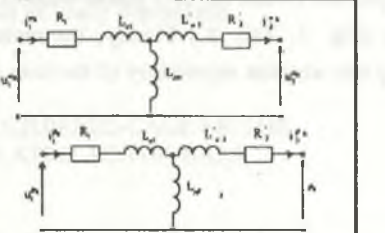
W niniejszym artykule przedstawiono sposób uwzględnienia asymetrii magnetycznej rdzenia transformatora 3-fazowego. Wykazano, iż przy rezygnacji z założenia o pełnej symetrii magnetycznej rdzenia można również określić macierz transformacji 2-osiowej  $K_k$  prowadzącej do rozsprężenia układu równań różniczkowych. Przy użyciu transformacji o macierzy  $K_k$  można sformułować schematy zastępcze transformatora 3-fazowego we współrzędnych  $\alpha_k, \beta_k, 0$  w postaci dwóch transformatorów 1-fazowych o różnych indukcyjnościach magnesujących  $L_{\mu\alpha}, L_{\mu\beta}$ . Zestawienie porównawcze analizy transformatora bez uwzględnienia asymetrii i z uwzględnieniem asymetrii magnetycznej rdzenia przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Zestawienie porównawcze analizy transformatora bez uwzględnienia asymetrii  
i z uwzględnieniem asymetrii magnetycznej rdzenia

bez uwzględnienia asymetrii	z uwzględnieniem asymetrii
rdzeń	
	
założenie	
$\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = \Lambda_k$	$\Lambda_1 = \Lambda_3 = \Lambda_k; \quad \Lambda_2 = k\Lambda_k,$
macierz indukcyjności własnych głównych i wzajemnych	
$M = \frac{2}{3} \Lambda_k z^2 \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$	$M = \frac{2}{k+2} \Lambda_k z^2 \begin{bmatrix} k+1 & -k & -1 \\ 2 & -2 & 2 \\ -k & k & -k \\ -1 & -k & k+1 \\ -2 & -2 & 2 \end{bmatrix}$

c.d. Tablicy 2

wartości własne	
$\lambda_1 = \frac{3}{2}, \lambda_2 = \frac{3}{2}, \lambda_3 = 0$	$\lambda_1 = \frac{3}{2}k, \lambda_2 = \frac{k+2}{2}, \lambda_3 = 0$
macierz transformacji 2-osiowej	
$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$	$K_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
napięcia 3-fazowego układu we współrzędnych 2-osiowych	
$u_1^0 = \sqrt{3}U \sin(\alpha t + \alpha),$ $u_1^{\beta} = \sqrt{3}U \cos(\alpha t + \alpha), u_1^{\gamma} = 0$	$u_1^{\alpha} = \sqrt{3}U \sin(\alpha t + \alpha + \frac{\pi}{3}),$ $u_1^{\beta} = \sqrt{3}U \cos(\alpha t + \alpha + \frac{\pi}{3}), u_1^{\gamma} = 0$
wskazy napięć fazowych i transformowanych na płaszczyźnie zespolonej	
	
schematy zastępcze	
	

## LITERATURA

1. Bajorek Z.: Modelowanie matematyczne transformatorów trójfazowych przy pracy niesymetrycznej. PWN, Warszawa 1983.
2. Kluszczyński K.: Składowe aktywne i zerowe prądu w obwodach elektromagnetycznych. Rozprawy Elektrotechniczne nr 27 z. 3, Warszawa 1981.

Recenzent: Dr hab. inż. Piotr Wach, prof. WSI Opole

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 marca 1996 r.

## Abstract

In the paper the method for analysing a 3-phase transformer with magnetic asymmetry of the core is presented. At the beginning on the base of the assumption (1) theory of a symmetrical core transformer is briefly presented. Basing on the transformer equations (3), (4) and transformer inductances matrices (5), (6) the equation (7) is obtained which enables - together with the ortogonality and normalization conditions (8) - to find the eigenvalues (9) and related eigenvectors. It results in determining the 2-axis transformation matrix  $K$  (10) which decouples the set of differential equations (3), (4). With the help of the transformation  $K$  the 2-axis voltage, current and flux coordinates (11) are found and the 3-phase transformer equivalent circuits (Fig. 3) are determined. In the next stage the asymmetrical core transformer theory is developed. On the base of the assumption (2) the transformer inductances matrix (15) is determined and the equation (7) with the supporting conditions (8) is solved in order to find the new eigenvalues (16) and related eigenvectors. This allows to determine the new (more general) 2-axis transformation matrix  $K_k$  (17) for matrix (15). Basing on it new voltage-current equations in 2-axis coordinates  $\alpha_k, \beta_k$  are obtained and the 3-phase transformer equivalent circuits are determined (Fig. 6). As an example the switch-on of 3-phase transformer has been considered at steady and transient states (Fig. 7, Tab. 1.) Finally, the main relationships for standard and the new theory taking into account asymmetry of the core are put together in the Tab 2. and compared.