

Krzysztof Kluszczyński  
Zakład Maszyn Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej

ANALIZA OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO  
JEDNOFAZOWEGO INDUKCYJNEGO SILNIKA  
Z KONDENSATOREM PRACY O UZWOJENIACH STOJANA TYPU T

**Streszczenie.** Przeprowadzono zarys analizy obwodu elektromagnetycznego maszyny z uzwojeniami stojana typu T jako maszyny 4-fazowej strukturalnie symetrycznej z asymetrią zaciskową, zasilanej poprzez niesymetryczny układ z sieci jednofazowej. Podano schematy zastępcze i równania maszyny dla stanów nieustalonych.

### 1. Wstęp

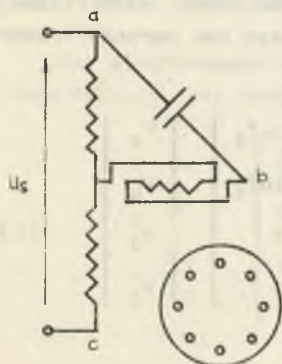
Celem artykułu jest zarys analizy obwodu elektromagnetycznego magnetycznie symetrycznej maszyny indukcyjnej jednofazowej z kondensatorem pracy, z uzwojeniami stojana w układzie T oraz wirnikiem klatkowym. Struktura uzwojeń stojana pozwala traktować rozważaną maszynę jako niesymetryczną maszynę 4-fazową, w której jedna z faz została przerwana, a jedna odwrócona.

Schemat połączeń takiego uzwojenia przedstawia rys. 1.

Zastosowana metoda analizy sprowadza się do rozłożenia niesymetrycznej maszyny 4-fazowej na 4-fazową maszynę strukturalnie symetryczną i asymetryczny, statyczny układ zasilający, poprzez który maszyna przyłączona jest do sieci jednofazowej.

W dalszej części pracy dla powyższego procesu przyjęto nazwę "symetryzacji strukturalnej".

Rys. 1. Schemat uzwojeń stojana typu T



Do dalszej analizy otrzymanej symetrycznej maszyny 4-fazowej zastosowano transformację dwuosiową, sprowadzając rozpatrywaną maszynę do 2-fazowej maszyny symetrycznej, reprezentowanej dalej przy pomocy dwóch zastępczych schematów elektrycznych dla osi  $\alpha$  i  $\beta$  oraz dwóch elektrycznych obwodów statycznych dla tzw. osi zerowych.

W toku analizy założono, że:

- 1) obwody magnetyczne maszyn wykonane są ze stali o prostoliniowej charakterystyce magnesowania (współczynnik przenikalności  $\mu = \text{const}$ );
- 2) układ prądowy poszczególnych uzwojeń fazowych posiada rozkład sinusoidalny, co jest tożsame z ograniczeniem analizy do zjawisk elektromagnetycznych, wywołanych przez pierwszą harmoniczną przestrzenną przepływu w rozpatrywanej maszynie.

## 2. Transformacja dwuosiowa 4-fazowego układu symetrycznego

Celem niniejszej transformacji jest znalezienie parametrów i sposobu zasilania takiego 2-fazowego zastępczego układu uzwojeń stojana i wirnika o nieruchomych, elektrycznie prostopadłych osiach  $\alpha$  i  $\beta$ , który wytwarzałby przepływ magnetyczny identyczny, jak w symetrycznej maszynie 4-fazowej. Warunek ten, który nazwano warunkiem równoważności przepływu magnetycznego, jest punktem wyjścia dla określenia równań transformacyjnych (macierzy transformacyjnej), które poprzez analogię stosujemy formalnie do pozostałych wielkości elektrycznych i magnetycznych. Ponadto żądamy spełnienia drugiego warunku wzajemnej jednoznaczności transformacji. Chodzi tu o to, by mając wielkości w układzie rzeczywistym, w sposób jednoznaczny określać wielkości stransformowane i odwrotnie - mając wartości stransformowane, móc odtwarzać jednoznaczne przebiegi w układzie rzeczywistym.

Macierzowe równanie transformacyjne dowolnej wielkości elektrycznej lub magnetycznej  $W(t)$  określone w oparciu o powyższe dwa warunki transformacji ma postać:

$$\begin{bmatrix} k_1 W_\alpha \\ k_1 W_\beta \\ k_2 W_0 \\ k_2 W_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_a^s & \cos\delta_b^s & \cos\delta_c^s & \cos\delta_d^s \\ -\sin\delta_a^s & -\sin\delta_b^s & -\sin\delta_c^s & -\sin\delta_d^s \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_a \\ W_b' \\ W_c' \\ W_d' \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

$$\delta_k^s = \int_0^t \omega_x(t) dt + \delta_{ok}^s + \delta^0$$

$\omega_x(t)$  - elektryczna prędkość kątowa wirowania osi faz zastępczego, nieruchomego układu  $\alpha, \beta$  względem osi faz symetrycznego układu 4-fazowego  $a, b, c, d'$  (dla stojana  $\omega_x = 0$ , dla wirnika  $\omega_x = \omega$ , gdzie  $\omega$  - prędkość wirowania wirnika względem stojana).

$$f_{ok} = \begin{cases} 0 & \text{dla fazy a} \\ -\frac{\pi}{2} & \text{dla fazy b} \\ -\pi & \text{dla fazy c} \\ -\frac{3\pi}{2} & \text{dla fazy d} \end{cases}$$

$f_0$  - kąt zawarty pomiędzy osią fazy a, a osią fazy  $\alpha$  w chwili  $t = 0$ ,  
 $k_1, k_2$  - współczynniki transformacji objaśnione w dalszym ciągu.

Wprowadzenie składowych 0,1, zwanych w dalszej części składowymi zerowymi, podyktowane zostało - z matematycznego punktu widzenia - koniecznością zapewnienia wzajemnej jednoznaczności transformacji. Istotne są jednak fizyczne konsekwencje występowania składowych 0,1, co wyraźnie widać na przykładzie składowych 0,1 prądów.

Mianowicie reprezentują one takie składowe, zawarte w przebiegach prądów fazowych, które nie partycypują w wytwarzaniu pola magnetycznego w szczelinie maszyny, niemniej jednak wywołują straty mocy czynnej na rezystancjach uzwojeń i dodatkowy strumień rozproszenia na indukcyjnościach rozproszonych. Składowe zerowe generowane są w układzie przez asymetrię wewnętrzną, względnie asymetrię zewnętrzną maszyny.

O ile jednak warunkiem koniecznym wystąpienia składowej "0" jest istnienie przewodu zerowego w układzie, którym prądy zerowe typu "0", dopływające do węzła - mogą odpłynąć, o tyle suma algebraiczna składowych "1" jest w węźle równa zero i brak przewodu zerowego nie wpływa na ich występowanie.

Stan elektromagnetyczny poszczególnych faz symetrycznego układu 4-fazowego opisany jest równaniem macierzowym:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U'_b \\ U'_c \\ U'_d \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_d \end{bmatrix} - R' \begin{bmatrix} i_a \\ i'_b \\ i'_c \\ i'_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

Po przetransponowaniu powyższego układu równań zgodnie ze wzorami (1) z układu wielkości  $a, b, c, d$  do układu wielkości  $\alpha, \beta, 0, 1$  otrzymujemy:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \\ U_1 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \\ \psi_0 \\ \psi_1 \end{bmatrix} - \omega_x \begin{bmatrix} \psi_\beta \\ \psi_\alpha \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R' \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Wprowadzając wielkości kompleksorowe (reprezentowane jako wskaźy na płaszczyźnie zespolonej o osiach rzeczywistej i urojonej, pokrywającej się od powiednio z osiami  $\alpha$  i  $\beta$ ) w oparciu o równanie:

$$\hat{W} = W_{\alpha} + jW_{\beta}$$

możemy równanie macierzowe (3) przekształcić do postaci:

$$\begin{bmatrix} \hat{U} \\ U_0 \\ U_1 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\psi} \\ \psi_0 \\ \psi_1 \end{bmatrix} + j\omega_x \begin{bmatrix} \hat{\psi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R' \begin{bmatrix} \hat{I} \\ i_0 \\ i_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Wskutek pełnej symetrii magnetycznej i elektrycznej rozpatrywanego układu 4-fazowego wielkości kompleksorowe generują wyłącznie wielkości kompleksorowe, składowe "0" - wielkości typu "0", a składowe "1" - wielkości typu "1".

Równania stanu elektromagnetycznego układu stransformowanego (4) niezależą od współczynników transformacji  $k_1$  i  $k_2$ , tak że powyższe współczynniki przyjąć można kierując się wygodą przekształceń.

Przyjmijmy:

$$k_1 = \frac{m}{2} = 2$$

$m$  - liczba faz układu.

Dzięki takiemu doborowi, przy symetrycznym zasilaniu, rzuty kompleksorów dowolnej wielkości  $W(t)$  na osie poszczególnych faz symetrycznego układu 4-fazowego są równe wartościom chwilowym tych wielkości w fazach.

Podobnie wygodnie jest przyjąć:

$$k_2 = m = 4$$

Przy zasilaniu wyłącznie składową zerową typu "0" lub "1", prądy fazowe symetrycznej maszyny 4-fazowej są wtedy równe wielkościom  $i_0$  i  $i_1$ , otrzymanym z transformacji. Równania macierzowe transformacji prostej i odwrotnej przybierają teraz postać:

$$\begin{bmatrix} 2 W_{\alpha} \\ 2 W_{\beta} \\ 4 W_0 \\ 4 W_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta'_a & \cos \delta'_b & \cos \delta'_c & \cos \delta'_d \\ -\sin \delta'_a & -\sin \delta'_b & -\sin \delta'_c & -\sin \delta'_d \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_a \\ W'_b \\ W'_c \\ W'_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

oraz

$$\begin{bmatrix} W_a \\ W'_b \\ W'_c \\ W'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_a & -\sin \delta_a & 1 & 1 \\ \cos \delta_b & -\sin \delta_b & 1 & -1 \\ \cos \delta_c & -\sin \delta_c & 1 & 1 \\ \cos \delta_d & -\sin \delta_d & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_\alpha \\ W_\beta \\ W_0 \\ W_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dla stojana ( $\omega_x = 0$ ), jeśli  $\delta_0 = 0$  równania macierzowe transformacji prostej i odwrotnej upraszczają się:

$$\begin{bmatrix} 2 W_\alpha \\ 2 W_\beta \\ 4 W_0 \\ 4 W_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_a \\ W'_b \\ W'_c \\ W'_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

oraz

$$\begin{bmatrix} W_a \\ W'_b \\ W'_c \\ W'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_\alpha \\ W_\beta \\ W_0 \\ W_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3. Symetryzacja strukturalna maszyny z uzwojeniami typu T

Analizowana maszyna jest 4-fazową maszyną bez przewodu zerowego o asymetrii zarówno wewnętrznej (nierówna liczba zwojów, niejednakowe rezystancje i indukcyjności rozproszeń poszczególnych faz stojana) jak i zewnętrznej (niesymetryczne zasilanie, przerwa w fazie d), lecz - jak wykażemy - da się przedstawić jako maszynę symetryczną wewnątrz z przewodem zerowym i z asymetrycznymi warunkami zaciskowymi.

Aby tego dokonać, wyodrębniamy indukcyjności rozproszeń poszczególnych faz stojana  $L_{sk}$  oraz ich rezystancje  $R_{sk}$  dla  $k = a, b, c, d$  i traktujemy je jako obciążenie zewnętrzne maszyny. Nieistniejącą w rzeczywistości fazę d obciążamy impedancją nieskończenie wielką, co odpowiada jej przerwanu.

Fazę a przyjmujemy jako fazę odniesienia. Zastępujemy uzwojenia faz b, c, d stojana oraz wirnik klatkowy uzwojeniami zastępczymi, sprowadzonymi do jednakowych warunków uzwojenia fazy odniesienia, zgodnie ze znanymi zasadami sprowadzania (równoważność uzwojeń rzeczywistych i zastępczych, co do wytwarzanego przez nie przepływu, strat mocy czynnej oraz

biernej). Parametry oraz wielkości związane z uzwojeniami zastępczymi wyróżniać będziemy znakiem "prim".

Zależności pomiędzy zwojami, prądami, napięciami i impedancjami w uzwojeniach rzeczywistych i zastępczych danej fazy  $k$  są następujące:

$$Z'_{ks} = Z_{as}$$

$$K_k = \frac{Z_{ks}}{Z'_{as}}$$

gdzie:

$Z_{ks}$  - liczba zwojów rzeczywistej fazy  $k$  stojana,

$Z'_{ks}$  - liczba zwojów zastępczej fazy  $k$  stojana,

$$\frac{i'_k}{i_k} = K_k \quad (9)$$

$$\frac{U'_k}{U_k} = \frac{1}{K_k}$$

$$\frac{R'_k}{R_k} = \frac{1}{K_k^2}$$

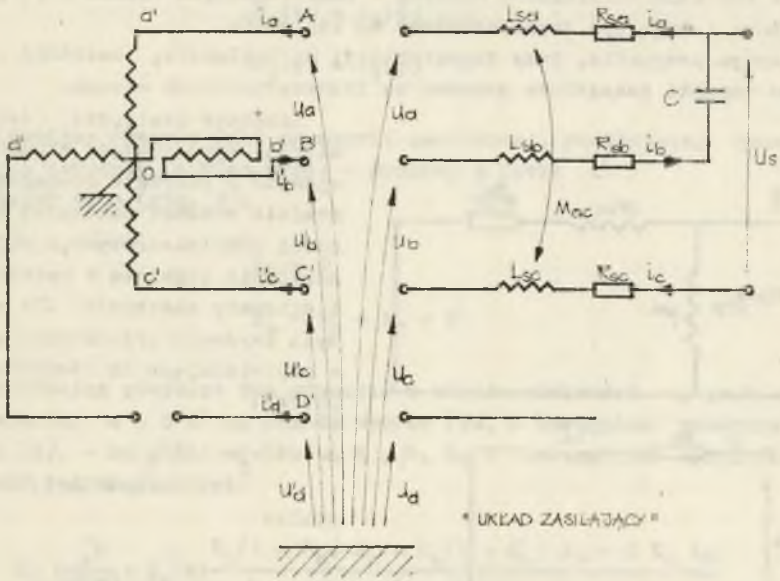
$$\frac{L'_k}{L_k} = \frac{1}{K_k^2}$$

dla  $k = a, b, c, d$

Obecnie po dokonaniu powyższych przekształceń można rzeczywistą maszynę z uzwojeniami typu T zastąpić wewnątrznie symetryzną, zastępczą maszyną 4-fazową  $AB'C'D'$  z przewodem zerowym, przyłączoną poprzez niesymetryczny układ zasilający do osi jednofazowej (rys. 2).

Konieczność wprowadzenia przewodu zerowego w zastępczej maszynie 4-fazowej wynika ze sposobu, w jaki I prawo Kirchoffa dla węzła 0 transformuje się z układu wielkości  $a, b, c, d$  do układu wielkości  $a', b', c', d'$ .

W układzie wielkości  $a, b, c, d$  suma prądów fazowych, dopływających do węzła 0 równała się zero, natomiast w układzie wielkości  $a', b', c', d'$  suma prądów  $\sum_{i=1}^4 i'_k$  (dla  $k = a, b, c, d'$ ) jest różna od zera, a więc musi istnieć dodatkowy przewód zerowy, którym suma owych prądów może z węzła odpłynąć.



Rys. 2. 4-fazowa wewnętrznie symetryczna maszyna AB'C'D' z "układem zasilającym"

Po transformacji Laplace'a równania układu zasilającego dla stanów nie ustalonych (zakładano zerowe warunki początkowe) przyjmują postać (rys.2):

$$U_a - U_b + (R_{as} + pL_{as}) I_a + (R_{bs} + pL_{bs} + \frac{1}{pC}) I_b - p M_{ac} I_c = 0 \tag{10}$$

$$U_a - U_c + [R_{as} + p(L_{as} + M_{ac})] I_a - [R_{as} + p(L_{ac} + M_{ao})] I_c = U_s$$

gdzie:

$M_{ac}$  - indukcyjność wzajemna pomiędzy indukcyjnościami rozproszonych faz a i c stojana.

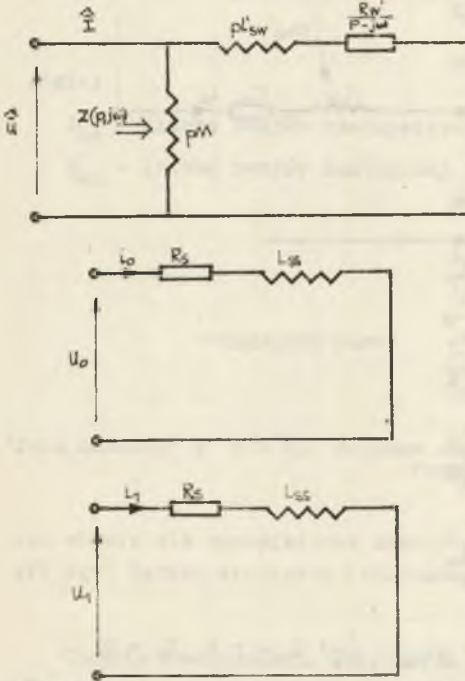
4. Schematy zastępcze 4-fazowej maszyny symetrycznej A B' C' D' z przerwą w fazie d'

Zarówno stojan, jak i wirnik analizowanej przez nas maszyny A B' C' D' o fazach a b' c' d' pozbawionych impedancji rozproszonych są symetrycznymi układami 4-fazowymi i mogą być transformowane do układu wielkości  $\alpha, \beta, 0, 1$ , zgodnie ze wzorami (3), (4), (5) i (7).

Jeśli założymy  $\mu = \text{const}$ , co uczyniono już na wstępie oraz  $\omega = \text{const}$ , wówczas równania różniczkowe maszyny w poszczególnych osiach  $\alpha, \beta, 0, 1$  są liniowe i mogą być transformowane wg Laplace'a.

W naszym przypadku, przy transformacji wg Laplace'a, założono ponadto zerowe warunki początkowe prądowe na indukcyjnościach układu.

Schematy zastępcze 4-fazowej maszyny symetrycznej zbudowane w oparciu o powyższe równania, a mianowicie schemat zastępczy dla wielkości kompleksorowych, ujmujący sumarycznie zjawiska w osiach  $\alpha$  i  $\beta$  i schematy zastępcze dla składowych zerowych przedstawia rys. 3, a odpowiadające im równania mają postać:



$$\hat{U}(p) = \hat{I}(p) Z(p, j\omega)$$

gdzie:

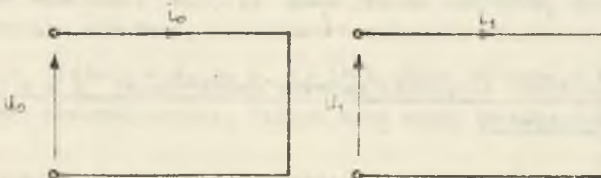
$$Z(p, j\omega) = \frac{(pL'_{sw} + \frac{R'_w}{p-j\omega}) pM}{p(L'_{sw} + M) + \frac{R'_w}{p-j\omega}} \quad (11)$$

$$U_0(p) = (R_S + pL_{SS}) i_0(p)$$

$$U_1(p) = (R_S + pL_{SS}) i_1(p)$$

Rys. 3. Schematy zastępcze 4-fazowej maszyny symetrycznej dla wielkości kompleksorowych oraz składowych zerowych 0, 1

W naszym przypadku maszyny AB'C'D' z przewodem zerowym i z uzwojeniami stojana, pozbawionymi rezystancji i indukcyjności rozproszeń - schematy zastępcze dla osi "0" i "1" degenerują się do postaci jak na rys. 4.



Rys. 4. Schematy zastępcze 4-fazowej symetrycznej maszyny AB'C'D' o fazach stojana, pozbawionych impedancji rozproszeń dla składowych zerowych 0, 1



Równania w osiach zerowych przybierają wówczas postać:

$$\begin{aligned} U_0(p) &= i_0(p) \cdot 0 \\ U_1(p) &= i_1(p) \cdot 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Uwzględnijmy obecnie fakt asymetrii zaciskowej, powodującej generację składowych zerowych, a mianowicie - przerwę w fazie d'.

Na skutek tego (rys. 2):

$$\begin{aligned} i_d &= 0 \\ i_a - i_b + i_c &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Transformując powyższe dwa równania z układu wielkości a, b, c, d na układ wielkości a b' c' d' za pomocą wzorów (9), a następnie wykorzystując równanie (8), - na układ wielkości  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0, 1 otrzymujemy wyrażenia na składowe 0, 1 a mianowicie:

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{K_b(1 - K_c) i_\alpha - K_b(1 + K_c) i_\beta - 2 K_c i_\beta}{2 K_b(1 + K_c)} \\ i_1 &= \frac{K_b(1 - K_c) i_\alpha + K_b(1 + K_c) i_\beta - 2 K_c i_\beta}{2 K_b(1 + K_c)} \end{aligned} \quad (14)$$

Określmy rozpiływ prądów w fazach stojana maszyny, korzystając z macierzy transformacji odwrotnej (8):

$$\begin{aligned} i_a &= i_\alpha + i_0 = i_1 = i_\alpha + \Delta \\ i'_b &= -i_\beta + i_0 - i_1 = -2 i_\beta \\ i'_c &= -i_\alpha + i_0 + i_1 = -i_\alpha + \Delta \\ i'_d &= i_\beta + i_0 - i_1 = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie:

$$\Delta = i_0 + i_1 = \frac{1 - K_c}{1 + K_c} i_\alpha + \frac{2 K_c}{K_b(1 + K_c)} i_\beta$$

Tak więc w fazach stojana a i c' maszyny A B' C' D' pojawi się składowa zerowa prądów "0", "1".

W wirniku składowe "0" i "1" nie pojawią się, ponieważ wirnik jest układem strukturalnie symetrycznym, a pole magnetyczne, dostarczające energię do obwodu wirnika, również nie zawiera składowych zerowych.

#### 4. Uwagi końcowe

Otrzymane wyniki umożliwiają nam analizę stanu nieustalonego 4-fazowej maszyny niesymetrycznej, o określonych na wstępie stopniach asymetrii przy kolejnym wykorzystaniu wzorów (9) na transformację z układu wielkości  $a, b, c, d$  na układ wielkości  $a' b' c' d'$  równań (10) niesymetrycznego "układu zasilającego", wzorów transformacyjnych (5) i (7) z układu wielkości  $a' b' c' d'$  na układ wielkości  $\alpha, \beta, 0, 1$  oraz schematów zastępczych (rys. 3 i 4) i równań (3), (4), opisujących zjawiska elektromagnetyczne w poszczególnych osiach  $\alpha, \beta, 0, 1$ .

Mimo liniowości zagadnienia, wynikowe zależności ogólne, określające nieustalony stan elektromagnetyczny są skomplikowane, nawet przy stałej prędkości obrotowej maszyny. Komplikacje są spowodowane wysokim stopniem wielomianów transmitancji, wchodzących w równanie macierzowe. Przy zmiennej prędkości wirowania równania elektromechanicznego stanu nieustalonego są nieliniowe z uwagi na związki iloczynowe  $\omega \psi$  i możliwe do rozwiązania tylko dla konkretnych danych maszyny, najwygodniej przy wykorzystaniu ETQ.

Powyższa metoda nadaje się z powodzeniem do analizy stanów ustalonych sinusoidalnych.

Jeśli sinusoidalne napięcia wymuszające, przyłożone do zacisków stojana mają częstotliwość  $\omega_0$ , również i prądy fazowe w stojanie rzeczywistym, jak i po transformacji - w zastępczym - muszą posiadać częstotliwość  $\omega_0$ .

Zakładamy, że przebiegi czasowe prądów w fazach stojana zastępczej maszyny 2-fazowej o fazach  $\alpha$  i  $\beta$  mają postać:

$$i_{\alpha}(t) = I_{\alpha} \cos(\omega_0 t + \alpha) \hat{=} \hat{I}_{\alpha}$$

$$i_{\beta}(t) = I_{\beta} \cos(\omega_0 t + \beta) \hat{=} \hat{I}_{\beta}$$

gdzie:

$I_{\alpha}, I_{\beta}$  - amplitudy prądów w fazach  $\alpha$  i  $\beta$

$\alpha, \beta$  - przesunięcia fazowe prądów w fazach  $\alpha$  i  $\beta$

$\hat{I}_{\alpha}, \hat{I}_{\beta}$  - wielkości symboliczne (fazory) prądów w fazach  $\alpha$  i  $\beta$ .

Określamy związane z powyższymi przebiegami kompleksory maszyny, a następnie związki pomiędzy wielkościami symbolicznymi przebiegów  $\hat{I}_{\alpha}, \hat{I}_{\beta}, \hat{U}_{\alpha}$  i  $\hat{U}_{\beta}$ , a kompleksorami tych samych wielkości w maszynie. Korzystając ze znalezionych związków przekształcamy równania kompleksorowe (11), (12),

opisujące zachowanie się 2-fazowej maszyny symetrycznej o fazach  $\alpha$  i  $\beta$ , w równanie dla wielkości symbolicznych. Następnie, stosując wzory transformacyjne (5), znajdujemy napięcia i prądy w 4-fazowej maszynie symetrycznej o fazach  $a, b, c, d$ , a dalej, wykorzystując wzory (9) - w maszynie o fazach  $a, b, c, d$ .

Mając obliczone napięcia  $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c, \hat{U}_d$  (rys. 2) w funkcji niewiadomych prądów  $\hat{I}_\alpha$  i  $\hat{I}_\beta$  oraz równanie układu zasilającego (10), wiążącego owe napięcia z napięciem wymuszającym sieci  $\hat{U}_S$ , obliczamy niewiadome prądy  $\hat{I}_\alpha$  i  $\hat{I}_\beta$ .

Znalezienie tych prądów pozwala nam po zastosowaniu wzorów transformacyjnych odtworzyć rzeczywiste prądy oraz rozkład napięć w poszczególnych fazach maszyny rzeczywistej.

Metoda analizy sinusoidalnych stanów ustalonych silnika z uzwojeniami stojana typu T, której tok został pokrótce naszkicowany, zostanie szerzej omówiona w osobnym artykule.

#### LITERATURA

- [1] Adamienko A.I.: Odnofaznyje kondensatornyje dwigatieli. Kijew 1960.
- [2] Messerle H.K.: Dynamic circuit theory. Perg. Press 1965.
- [3] Pustoła J., Śliwiński T.: Budowa i działanie silników jednofazowych. WNT 1964.
- [4] Wagner C.F., Evans R.D.: Symmetrical components. Mc Graw-Hill Book Company 1933.

Przyjęto do druku w czerwcu 1974 r.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЦЕПИ ИНДУКЦИОННОГО  
ОДНОФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ С РАБОЧИМ КОНДЕНСАТОРОМ,  
ВКЛЮЧЕННЫМ К ОБМОТКАМ ПО СХЕМЕ Т

#### Р е з ю м е

Проведен анализ электромагнитной цепи индукционной однофазной машины с рабочим конденсатором с обмотками статора типа Т как машины 4-фазной внутренне симметричной с асимметрией на зажимах при питании через несимметричную систему с однофазной сети. Приведены схемы замещения и уравнения машины для неустановившегося режима.

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC CIRCUIT  
OF THE INDUCTION SINGLE-PHASE CAPACITOR MOTOR WITH  
A T-TYPE STATOR WINDING

S u m m a r y

The electro-magnetic circuit of the machine with the T-type stator winding was analysed as the four-phase symmetrical machine with the unsymmetrical terminal connection and unsymmetrical supplying network. Equivalent circuit and equations for the machine transient state were obtained.

