

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Roman MIKSIEWICZ

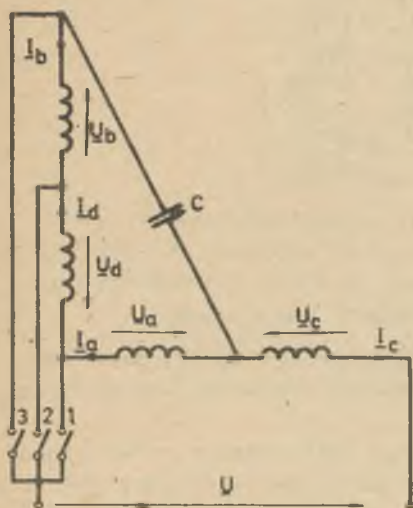
Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki ŚląskiejMETODA OBLICZEŃ OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO
SILNIKA JEDNOFAZOWEGO Z PRZEŁĄCZALNYMI UZWOJENIAMI
STOJANA

Streszczenie. W oparciu o metodę składowych symetrycznych przeprowadzono analizę indukcyjnego silnika jednofazowego z kondensatorem pracy z przełączalnymi uzwojeniami stojana jako niesymetrycznej maszyny 4-fazowej. Przedstawiono tok obliczeń obwodu elektromagnetycznego wspólny dla różnych układów połączeń faz stojana.

1. WSTĘP

Jednofazowe silniki indukcyjne z przełączalnymi uzwojeniami stojana znajdują zastosowanie w sprzęcie gospodarstwa domowego tam, gdzie wymagana jest możliwość nastawiania różnych prędkości obrotowych. Typowy przykład stanowi wentylator, w którym poprzez zmianę prędkości obrotowej silnika napędowego uzyskuje się różne wydatki powietrza. W kraju silniki takie z przeznaczeniem do napędu wentylatorów stołowych produkuje na licencji japońskiej Fabryka Silników Elektrycznych Małej Mocy SILMA w Sosnowcu.

Przykładowo, schemat uzwojenia stojana silnika typu DF-711 przedstawiono na rys. 1. Kolejnym zaczeptom 1, 2, 3 odpowiadają trzy układy połączeń faz stojana i w konsekwencji - trzy różne charakterystyki momentu elektromagnetycznego silnika.



Rys. 1. Schemat połączeń uzwojeń stojana indukcyjnego silnika jednofazowego typu DF-711

2. OBLICZENIA OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA PRZY RÓŻNYCH UKŁADACH POŁĄCZEŃ UZWOJEŃ STOJANA

Układy połączeń faz stojana, odpowiadające poszczególnym położeniom przełącznika, można sprowadzić do różnych przypadków niesymetrycznej pracy maszyny 4-fazowej. Analizę maszyny 4-fazowej w stanie ustalonym i przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym przeprowadzono w oparciu o metodę składowych symetrycznych [3] dla układów 4-fazowych przy założeniu liniowej charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego, pominięciu strat w żelazie i strat mechanicznych oraz ograniczeniu analizy do harmonicznym przestrzennym pola magnetycznego, generowanych przez uzwojenia stojana. Ponadto uwzględniono, że wszystkie współczynniki indukcyjności głównych własnych i wzajemnych, odpowiadające parzystym harmonicznym pola magnetycznego, są - ze względu na symetrię budowy uzwojeń - równe zero.

Macierze transformacji, określające składowe symetryczne prądów i napięć mają postać:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_{O1} \\ I_{O2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j\psi_b & -\psi_c & j\psi_d \\ 1 & j\psi_b & -\psi_c & -j\psi_d \\ \sqrt{2} & 0 & \sqrt{2}\psi_c & c \\ 0 & \sqrt{2}\psi_b & 0 & \sqrt{2}\psi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_{O1} \\ U_{O2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\psi_b} & -\frac{1}{\psi_c} & \frac{1}{\psi_d} \\ 1 & \frac{1}{\psi_b} & -\frac{1}{\psi_c} & -\frac{1}{\psi_d} \\ \sqrt{2} & 0 & \sqrt{2}\psi_c & 0 \\ 0 & \sqrt{2}\psi_b & 0 & \sqrt{2}\psi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$$\psi_b = \frac{z_b}{z_a}, \quad \psi_c = \frac{z_c}{z_a}, \quad \psi_d = \frac{z_d}{z_a},$$

z_a, z_b, z_c, z_d - liczby zwojów poszczególnych faz stojana.

Współrzędna o indeksie 1 wyznacza w nowym układzie współrzędnych składową zgodną, współrzędna o indeksie 2 - składową przeciwną, zaś współrzędne O1 i O2 - składowe zerowe.

Układ równań maszyny 4-fazowej, dla której wyodrębniono z faz stojana rezystancje i reaktancje rozproszeń, traktując je jako dodatkowe impedancje zewnętrzne $\underline{z}_a, \underline{z}_b, \underline{z}_c, \underline{z}_d$ - przyjmuje dla składowych symetrycznych postać:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{01} \\ \underline{U}_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & & & \\ & \underline{Z}_2 & & \\ & & 0 & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_{01} \\ \underline{I}_{02} \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

$$\underline{Z}_1 = \sum_{\nu} \underline{Z}_1^{(\nu)}; \quad \underline{Z}_1^{(\nu)} = \frac{\left(\frac{R_w^{(\nu)}}{s_{\nu}} + jX_{sw}^{(\nu)} \right) jX_m^{(\nu)}}{\frac{R_w^{(\nu)}}{s_{\nu}} + jX_{sw}^{(\nu)} + jX_m^{(\nu)}}$$

$$\underline{Z}_2 = \sum_{\nu} \underline{Z}_2^{(\nu)}; \quad \underline{Z}_2^{(\nu)} = \frac{\left(\frac{R_w^{(\nu)}}{2-s_{\nu}} + jX_{sw}^{(\nu)} \right) jX_m^{(\nu)}}{\frac{R_w^{(\nu)}}{2-s_{\nu}} + jX_{sw}^{(\nu)} + jX_m^{(\nu)}}$$

$$s_{\nu} = \begin{cases} \nu s - (\nu - 1) & \text{dla } \nu = 4n + 1 \\ -\nu s + (\nu + 1) & \text{dla } \nu = 4n + 3 \end{cases} \quad \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N$$

$R_w^{(\nu)}$, $X_{sw}^{(\nu)}$, $X_m^{(\nu)}$ - rezystancja i reaktancja rozproszenia wirnika oraz reaktancja magnesująca dla ν -tej harmonicznej przestrzennej, wprowadzona na liczbę zwojów fazy a stojana,

p_b - liczba par biegunów,

s - poślizg,

ω_0 - synchroniczna prędkość kątowna.

Na podstawie układu równań (3) oraz równań więzów wynikających z praw Kirchhoffa, odpowiadających różnym położeniom przełącznika na rys. 1, wprowadzono wzory na składową zgodną i przeciwną prądu:

$$\underline{I}_1 = 2U \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}\underline{Z}_{21}} \quad (4)$$

$$\underline{I}_2 = -2U \frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}\underline{Z}_{21}} \quad (5)$$

oraz na składowe zerowe \underline{I}_{01} i \underline{I}_{02} .

Poszczególnym układom połączeń faz stojana odpowiadają różne impedancje charakterystyczne Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} , Z_{22} we wzorach (4) i (5) oraz różne składowe zerowe prądów I_{01} i I_{02} :

przełącznik w pozycji 1

$$Z_{11} = (1 + \vartheta_c)Z_1 + \frac{2}{(\vartheta_b + \vartheta_d)(1 + \vartheta_c)} \left[(\vartheta_b + \vartheta_d - j\vartheta_c)Z_a + (\vartheta_b + \vartheta_d + j)Z_c \right]$$

$$Z_{12} = (1 + \vartheta_c)Z_2 + \frac{2}{(\vartheta_b + \vartheta_d)(1 + \vartheta_c)} \left[(\vartheta_b + \vartheta_d + j\vartheta_c)Z_a + (\vartheta_b + \vartheta_d - j)Z_c \right]$$

$$Z_{21} = (1 - j\vartheta_b - j\vartheta_d)Z_1 + \frac{2}{(\vartheta_b + \vartheta_d)(1 + \vartheta_c)} \left[(\vartheta_b + \vartheta_d - j\vartheta_c)Z_a - j(1 + \vartheta_c)(Z_b + Z_d + j\omega_0 C) \right]$$

$$Z_{22} = (1 + j\vartheta_b + j\vartheta_d)Z_2 + \frac{2}{(\vartheta_b + \vartheta_d)(1 + \vartheta_c)} \left[(\vartheta_b + \vartheta_d + j\vartheta_c)Z_a + j(1 + \vartheta_c)(Z_b + Z_d + j\omega_0 C) \right]$$

$$I_{01} = - \frac{\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + 2j\vartheta_c - \vartheta_b - \vartheta_d}{\sqrt{2}(\vartheta_b + \vartheta_d)(1 + \vartheta_c)} I_1 - \frac{\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d - 2j\vartheta_c - \vartheta_b - \vartheta_d}{\sqrt{2}(\vartheta_b + \vartheta_d)(1 + \vartheta_c)} I_2$$

$$I_{02} = j \frac{\vartheta_b - \vartheta_d}{\sqrt{2}(\vartheta_b + \vartheta_d)} I_1 - j \frac{\vartheta_b - \vartheta_d}{\sqrt{2}(\vartheta_b + \vartheta_d)} I_2$$

przełącznik w pozycji 2

$$Z_{11} = (1 - j\vartheta_d + \vartheta_c)Z_1 + \frac{2}{\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b} \left[(\vartheta_b - j\vartheta_c)(Z_a + Z_d) + (\vartheta_b + \vartheta_d + j)Z_c \right]$$

$$Z_{12} = (1 + j\vartheta_d + \vartheta_c)Z_2 + \frac{2}{\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b} \left[(\vartheta_b + j\vartheta_c)(Z_a + Z_d) + (\vartheta_b + \vartheta_d - j)Z_c \right]$$

$$Z_{21} = (1 - j\vartheta_b - j\vartheta_d)Z_1 + \frac{2}{\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b} \left[-(j\vartheta_c + \vartheta_d + j)(Z_b + j\omega_0 C) + (\vartheta_b - j\vartheta_c)(Z_a + Z_d) \right]$$

$$Z_{22} = (1 + j\vartheta_b + j\vartheta_d)Z_2 + \frac{2}{\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b} \left[(j\vartheta_c - \vartheta_d + j)(Z_b + j\omega_0 C) + (\vartheta_b + j\vartheta_c)(Z_a + Z_d) \right]$$

$$I_{01} = - \frac{\vartheta_c \vartheta_d + 2j\vartheta_c + \vartheta_b \vartheta_c - \vartheta_b}{\sqrt{2}(\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b)} I_1 - \frac{\vartheta_c \vartheta_d - 2j\vartheta_c + \vartheta_b \vartheta_c - \vartheta_b}{\sqrt{2}(\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b)} I_2$$

$$I_{02} = \frac{2\vartheta_b \vartheta_d - j\vartheta_c \vartheta_d + j\vartheta_b \vartheta_c + j\vartheta_b}{\sqrt{2}(\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b)} I_1 + \frac{2\vartheta_b \vartheta_d + j\vartheta_c \vartheta_d - j\vartheta_b \vartheta_c - j\vartheta_b}{\sqrt{2}(\vartheta_b \vartheta_c + \vartheta_c \vartheta_d + \vartheta_b)} I_2$$

przełącznik w pozycji 3

$$\underline{Z}_{11} = (1 - j\varphi_b + \varphi_c - j\varphi_d) \underline{Z}_1 + \frac{2}{\varphi_c(\varphi_b + \varphi_d)} \left[-j\varphi_c(\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_d) + (\varphi_b + \varphi_d + j) \underline{Z}_c \right]$$

$$\underline{Z}_{12} = (1 + j\varphi_b + \varphi_c + j\varphi_d) \underline{Z}_2 + \frac{2}{\varphi_c(\varphi_b + \varphi_d)} \left[j\varphi_c(\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_d) + (\varphi_b + \varphi_d - j) \underline{Z}_c \right]$$

$$\underline{Z}_{21} = (1 - j\varphi_b - j\varphi_d) \underline{Z}_1 + \frac{2}{\varphi_c(\varphi_b + \varphi_d)} \left[-j\varphi_c(\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_d) - (\varphi_b + \varphi_d + j + j\varphi_c) \frac{1}{j\omega_0 C} \right]$$

$$\underline{Z}_{22} = (1 + j\varphi_b + j\varphi_d) \underline{Z}_2 + \frac{2}{\varphi_c(\varphi_b + \varphi_d)} \left[j\varphi_c(\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_d) - (\varphi_b + \varphi_d - j - j\varphi_c) \frac{1}{j\omega_0 C} \right]$$

$$\underline{I}_{01} = - \frac{\varphi_b + \varphi_d + 2j}{\sqrt{2}(\varphi_b + \varphi_d)} \underline{I}_1 - \frac{\varphi_b + \varphi_d - 2j}{\sqrt{2}(\varphi_b + \varphi_d)} \underline{I}_2$$

$$\underline{I}_{02} = j \frac{\varphi_b - \varphi_d}{\sqrt{2}(\varphi_b + \varphi_d)} \underline{I}_1 - j \frac{\varphi_b - \varphi_d}{\sqrt{2}(\varphi_b + \varphi_d)} \underline{I}_2$$

gdzie:

$$\underline{Z}_a = R_a + jX_{sa}; \quad \underline{Z}_b = R_b + jX_{sb}; \quad \underline{Z}_c = R_c + jX_{sc}; \quad \underline{Z}_d = R_d + jX_{sd}$$

$R_a, R_b, R_c, R_d, X_{sa}, X_{sb}, X_{sc}, X_{sd}$ - rezystencje i reaktancje rozprożeń poszczególnych faz stojana,

C - pojemność kondensatora pracy.

Znając składową zgodną i przeciwną prądu stojana, można przy zadanym poślizgu s wyznaczyć moment elektromagnetyczny silnika według wzoru:

$$M = M_1^{(1)} - M_2^{(1)} - M_1^{(3)} + M_2^{(3)} + M_1^{(5)} - M_2^{(5)} - \dots \pm M_1^{(\nu)} \mp M_2^{(\nu)} + \dots \quad (6)$$

gdzie:

$$M_1^{(\nu)} = \frac{\nu P_b}{\omega_0} I_1^2 \operatorname{Re} \left\{ \underline{Z}_1^{(\nu)} \right\}$$

$$M_2^{(\nu)} = \frac{\nu P_b}{\omega_0} I_2^2 \operatorname{Re} \left\{ \underline{Z}_2^{(\nu)} \right\}$$

Rozpływ prądów oraz rozkład napięć fazowych wyznacza się ze składowych symetrycznych prądów (4) (5) i napięć (3) za pomocą transformacji odwrotnej:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \\ \underline{I}_d \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_{O1} \\ \underline{I}_{O2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \\ \underline{I}_d \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 \\ j\sqrt{2} & -j\sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} \\ -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 \\ -j\sqrt{2} & j\sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{O1} \\ \underline{U}_{O2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki analizy jednofazowego silnika z przełączalnymi uzwojeniami stojana. Traktując układy połączeń faz stojana, odpowiadające poszczególnym położeniom przełącznika, jako różne przypadki niesymetrycznej pracy tej samej maszyny 4-fazowej, otrzymano wzory na składowe symetryczne prądu - zgodną i przeciwną o identycznej budowie formalnej. Pozwoliło to na opracowanie takiego algorytmu obliczeń obwodu elektromagnetycznego, w którym dla poszczególnych położeniach przełącznika odmiennie wyznacza się wyłącznie impedancje charakterystyczne \underline{Z}_{11} , \underline{Z}_{12} , \underline{Z}_{21} i \underline{Z}_{22} oraz prądy składowych zerowych \underline{I}_{O1} i \underline{I}_{O2} . Wszystkie pozostałe wzory, a w szczególności podprogram obliczeń obwodu magnetycznego są wspólne. Prowadzi to do uproszczenia programu oraz skrócenia czasu obliczeń na maszynie cyfrowej.

LITERATURA

- [1] Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Projektowanie indukcyjnych silników jednofazowych z kondensatorem pracy przy pomocy maszyny cyfrowej. Materiały IX Sympozjum nt. Metody Matematyczne w Elektrotechnice. Opole 1980.
- [2] Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Algorytm obliczeń obwodów elektromagnetycznych indukcyjnych silników jednofazowych z kondensatorem pracy. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka 61, Gliwice 1978.
- [3] Wagner C.F., Evans R.D.: Symmetrical components. Mc Graw - Hill Book Company, 1933.

Wpłynęło do redakcji 8 VI 1981 r.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

**МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА**

Р е з ю м е

Используя метод симметрических составляющих для несимметрической 4-фазной машины, проведен анализ индукционного однофазного двигателя с рабочим конденсатором с переключающимися обмотками статора. Предложен метод общего расчета электромагнитной цепи для различных схем соединений фаз статора.

**THE METHOD OF THE CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC
CIRCUIT OF THE SINGLE-PHASE THREE-SPEED CAPACITOR MOTOR**

S u m m a r y

An induction single-phase three-speed capacitor motor was analysed as a four-phase unsymmetrical machine. The presented course of calculations of electromagnetic circuit is common for the various connections of the stator windings.