

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Roman MIKSIEWICZ

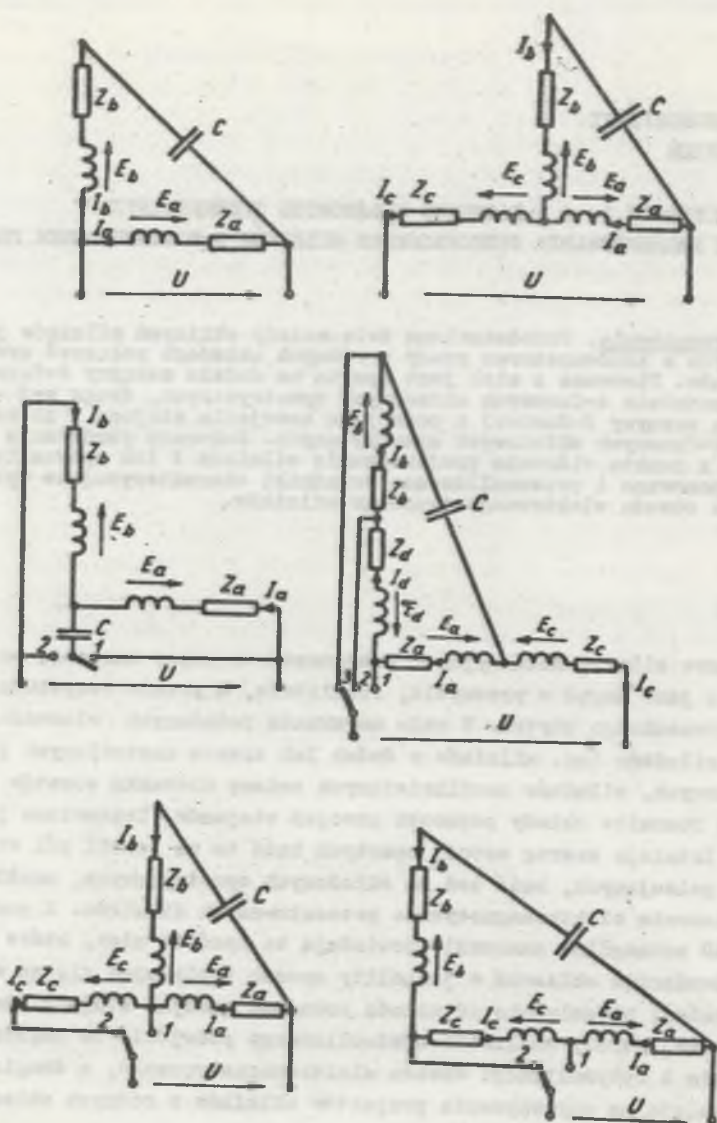
**ZASTOSOWANIE METODY 2- i 4-FAZOWYCH SKŁADOWYCH SYMETRYCZNYCH
DO ANALIZY I PROJEKTOWANIA JEDNOFAZOWYCH SILNIKÓW Z KONDENSATOREM PRACY**

Streszczenie. Przedstawiono dwie metody obliczeń silników jednofazowych z kondensatorem pracy o różnych układach połączeń uzwojeń stojanów. Pierwsza z nich jest oparta na modelu maszyny 4-fazowej i na metodzie 4-fazowych składowych symetrycznych, druga zaś - na modelu maszyny 2-fazowej o podwójnym uzwojeniu stojana i na metodzie 2-fazowych składowych symetrycznych. Dokonano porównania obu metod z punktu widzenia projektowania silników i ich optymalizacji. Zaproponowano i przeanalizowano wskaźniki charakteryzujące wykorzystanie obwodu elektromagnetycznego silników.

1. Wstęp

Jednofazowe silniki indukcyjne z kondensatorem pracy znajdują szerokie zastosowanie jako napęd w przemyśle, rolnictwie, a przede wszystkim w sprzęcie powszechnego użytku. W celu uzyskania pożądanych własności eksploatacyjnych silników (np. silników o dwóch lub trzech nastawianych prędkościach obrotowych, silników umożliwiających zmianę kierunku obrotów itp.) stosuje się rozmaite układy połączeń uzwojeń stojanów. Zestawiono je na rys. 1. Istnieje szereg metod, opartych bądź to na teorii pół wirujących i pół pulsujących, bądź też na składowych symetrycznych, umożliwiających obliczenia elektromagnetyczne prezentowanych silników. Z punktu widzenia CAD szczególne znaczenie posiadają te spośród nich, które pozwalają na prowadzenie obliczeń w jednolity sposób (opierając się na wspólnym algorytmie), niezależnie od układu połączeń uzwojeń stojana. Dają one bowiem z jednej strony możliwość ujednoczonego podejścia do zagadnień projektowania i optymalizacji obwodu elektromagnetycznego, z drugiej zaś strony pozwalają na porównywanie projektów silników o różnych układach połączeń.

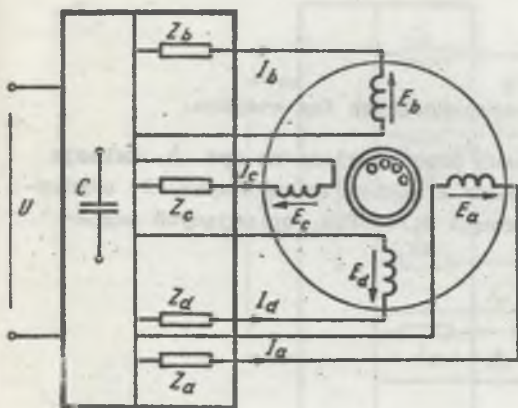
Metoda, czyniąca zadość powyższym wymaganiom, jest metoda obliczeń silników jednofazowych z kondensatorem roboczym, oparta na składowych symetrycznych 4-fazowych [1], [2]. Głównym osłem niniejszej pracy jest przedstawienie równoważnej metody obliczeń, opartej na składowych symetrycznych 2-fazowych i na modelu maszyny 2-fazowej o podwójnym uzwojeniu stojana.



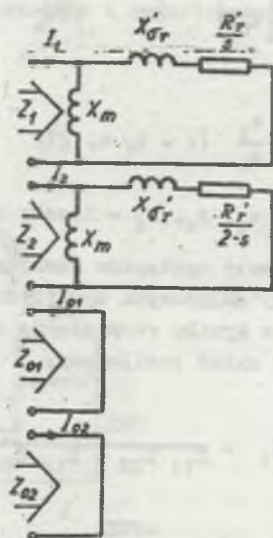
Rys. 1. Różne układy połączeń uzwojeń stojanów silników jednofazowych
 Fig. 1. Various connections of stator windings of single-phase capacitor motors

2. Metoda składowych symetrycznych 4-fazowych

Metoda ta została omówiona szczegółowo w publikacjach [1], [2]. Stąd też w niniejszej pracy zostanie przedstawiona w pobieżny sposób z wyeksponowaniem tych elementów, które różnią ją lub upodabniają do metody składowych symetrycznych 2-fazowych.



Rys. 2. Silnik jednofazowy jako niesymetryczna maszyna 4-fazowa
Fig. 2. Single-phase motor as asymmetrical four-phase machine



Rys. 3. Schematy zastępcze maszyny 4-fazowej dla poszczególnych składowych symetrycznych

Fig. 3. Equivalent circuits of four-phase machine for symmetrical components

Wszystkie silniki jednofazowe o układach połączeń uzwojeń stojanów z rys. 1 można traktować jako niesymetryczne maszyny 4-fazowe. Wyodrębnienie rezystancji i reaktancji rozproszonych stojana pozwala analizować niesymetryczne maszyny 4-fazowe jako symetryczne maszyny 4-fazowe (niesymetrię zwojową można usunąć na drodze transformacji zwojowej), przyłączone do sieci jednofazowej poprzez asymetryczny układ zasilający (sawiera on pródc kondensatora pracy wyodrębnione wcześniej rezystancje i reaktancje rozproszonych stojanów).

4-fazowe składowe symetryczne prądów wprowadza się opierając się na macierzy będącej iloczynem macierzy składowych symetrycznych i macierzy transformacji zwojowej:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_{01} \\ I_{02} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j\psi_b & -\psi_c & j\psi_d \\ 1 & j\psi_b & -\psi_c & -j\psi_d \\ \sqrt{2} & 0 & \sqrt{2}\psi_c & 0 \\ 0 & \sqrt{2}\psi_b & 0 & \sqrt{2}\psi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

$$\psi_i = \frac{z_i}{z_a} \quad (i = b, c, d),$$

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

Schematy zastępcze maszyny 4-fazowej przedstawiono na rys. 3. Relacje pomiędzy składowymi symetrycznymi prądów a napięciem zasilania U uzyskuje się w wyniku rozwiązania układu równań Kirchoffa, opisujących asymetryczny układ zasilający:

$$I_1 = \frac{2UZ_{22}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$

$$I_2 = \frac{-2UZ_{21}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$

(2)

$$I_{01} = f_1(I_1, I_2)$$

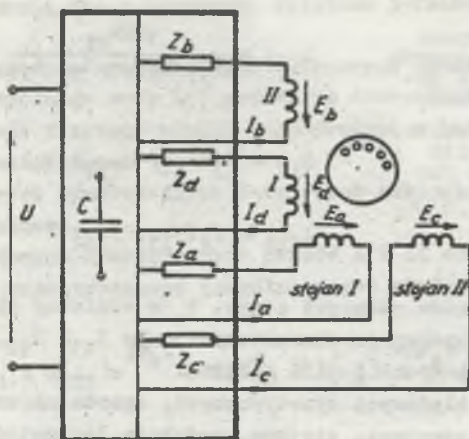
$$I_{02} = f_2(I_1, I_2)$$

Dla poszczególnych układów połączeń uzwojeń stojanów w odmienny sposób oblicza się wyłącznie impedancje charakterystyczne $Z_{11}, Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}$ oraz prądy składowych zerowych I_{01}, I_{02} . Wszystkie pozostałe wielkości elektryczne i magnetyczne wyznacza się na podstawie tych samych wzorów [2].

Wskaźniki, charakteryzujące wykorzystanie obwodu elektromagnetycznego, można sformułować opierając się na prądach składowych symetrycznych. Wiąże się one z interpretacją fizyczną poszczególnych składowych [3]. W maszynie o sinusoidalnym rozkładzie przepływu składowa zgodna I_1 wytwarza pole magnetyczne współbieżne, składowa przeciwna I_2 - pole magnetyczne przeciwbieżne, a składowe zerowe I_{01}, I_{02} - nie wytwarzają pola magnetycznego w szczelinie powietrznej i tym samym nie uczestniczą w przemianie elektromechanicznej (przy uwzględnieniu wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu uzwojeń można wykazać, że wiążą się one wyłącznie z elektromagnetycznymi momentami pasożytniczymi).

3. Metoda składowych symetrycznych 2-fazowych

Silniki jednofazowe o układach połączeń uzwojeń stojanów podanych na rys. 1 można również rozważać jako niesymetryczne maszyny 2-fazowe o podwójnym uzwojeniu stojana. Uzwojenie stojana I składa się z uzwojeń fazowych a i b, a uzwojenie stojana II - z uzwojeń fazowych c i d. Również i w tym przypadku celowe jest wyodrębnienie rezystancji i reaktancji rozproszonych stojana i formalny podział niesymetrycznej maszyny na symetryczną maszynę 2-fazową o podwójnym uzwojeniu stojana i asymetryczny układ zasilający (rys. 4).



Rys. 4. Silnik jednofazowy jako maszyna 2-fazowa o podwójnym uzwojeniu stojana

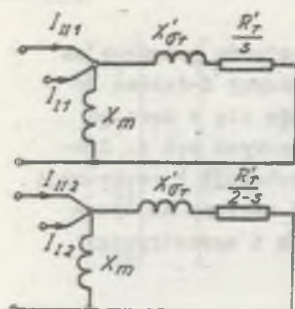
Fig. 4. Single-phase motor as two-phase machine with double stator windings

Składowe symetryczne prądów I i II uzwojenia stojana określają macierze, będące iloczynem macierzy składowych symetrycznych 2-fazowych i macierzy transformacji zwojowych:

$$\begin{bmatrix} I_{I1} \\ I_{I2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} \\ 1 & -j\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{II1} \\ I_{II2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j\sqrt{2} \\ 0 & -j\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_d \end{bmatrix}$$

(3)



Rys. 5. Schematy zastępcze dla składowych symetrycznych dla maszyny 2-fazowej o podwójnym uzwojeniu stojana

Fig. 5. Equivalent circuits of two-phase machine with double stator windings for symmetrical components

Schematy zastępcze dla składowych symetrycznych dla 2-fazowej maszyny o podwójnym uzwojeniu stojana przedstawia rys. 5. Relacje, wiążące składowe symetryczne prądów z napięciem zasilania U , wynikają z równań, opisujących układ zasilający. Można im nadać ogólną postać:

$$I_{II1} = \frac{2UZ_{22}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$

$$I_{III1} = \frac{-2UZ_{21}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$

(4)

$$I_{II2} = f_3(I_{II1}, I_{III1})$$

$$I_{III2} = f_4(I_{II1}, I_{III1})$$

Dla poszczególnych układów połączeń z rys. 1 w odmienny sposób wyznacza się wyłącznie cztery impedancje charakterystyczne Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} , Z_{22} oraz prądy składowych przeciwnych I i II stojana.

Metoda 2-fazowych składowych symetrycznych, oparta na modelu maszyny 2-fazowej o podwójnym uzwojeniu stojana, podobnie jak metoda 4-fazowych składowych symetrycznych, oparta na modelu maszyny 4-fazowej, obejmuje wszystkie silniki jednofazowe z kondensatorem pracy. Z punktu widzenia obliczeń elektromagnetycznych i komputerowo wspomaganego projektowania metody te są równoważne. W przypadku metody składowych symetrycznych 2-fazowych wzory, określające impedancje charakterystyczne oraz prądy składowych symetrycznych odpowiednio zerowych i przeciwnych, są tylko nieco bardziej złożone. Przykłady zastosowania metody 4-fazowych składowych symetrycznych do projektowania i optymalizacji obwodów elektromagnetycznych silników przy współdziałaniu z różnymi metodami nieliniowego programowania matematycznego przedstawiono w pracy [1].

W analogiczny sposób można również użytkować metodę 2-fazowych składowych symetrycznych.

Metoda 2-fazowych składowych symetrycznych daje się z łatwością rozszerzyć na silniki o jeszcze bardziej złożonych układach połączeń uzwojeń stojanów poprzez przyjęcie modelu maszyny 2-fazowej o 1-krotnym uzwojeniu stojana.

4. Ocena wykorzystania obwodu elektromagnetycznego silnika w metodzie składowych symetrycznych 2-fazowych

Omówione metody obliczeń prowadzą do odmiennego i odrębnego punktu widzenia na wykorzystanie obwodu elektromagnetycznego silników. Rozważenie tego zagadnienia w świetle obu metod: składowych symetrycznych 2-fazowych i składowych symetrycznych 4-fazowych, pozwala na lepsze i głębsze zrozumienie problemu wzajemnego równoważenia się i wygaszania przepływów (pól magnetycznych) poszczególnych uzwojeń fazowych. Problem ten jest bardzo istotny w silnikach jednofazowych o złożonym układzie połączeń uzwojeń stojana, a nie ujawnia się w przypadku silników 3-fazowych, zasilanych symetrycznie.

W metodzie składowych symetrycznych 4-fazowych ocena wykorzystania obwodu elektromagnetycznego może być oparta na stosunkach: I_2/I_1 , I_{01}/I_1 , I_{02}/I_1 , których sens fizyczny wynika bezpośrednio z interpretacji fizycznej składowych symetrycznych [3].

W metodzie składowych symetrycznych 2-fazowych analogiczne wskaźniki mają bardziej złożoną budowę.

Znajomość składowych symetrycznych prądów I i II stojana umożliwia wyznaczenie wektora przestrzennego (uogólnionego) prądu $\underline{i}(t)$:

$$\underline{i}(t) = 2(I_{I1} + I_{III1})e^{j\omega_0 t} + 2(I_{II2}^* + I_{III2})e^{-j\omega_0 t}, \quad (5)$$

a tym samym i przepływu wypadkowego w szczelinie powietrznej maszyny. Wypadkowe pole magnetyczne w szczelinie powietrznej jest w ogólnym przypadku polem eliptycznym. Składowa współbieżna jest sumą przepływu współbieżnego I stojana, generowanego przez składową zgodną prądu I_{I1} oraz przepływu współbieżnego II stojana, generowanego przez składową zgodną prądu I_{III1} . Podobnie składowa przeciwbieżna jest sumą przepływów przeciwbieżnych I i II stojana, generowanych odpowiednio przez składowe przeciwne prądu I_{II2} i I_{III2} . Amplituda składowych współbieżnej i przeciwbieżnej wypadkowego przepływu magnetycznego zależy więc nie tylko od modułu przepływów składowych (wartości skutecznych składowych symetrycznych prądów), ale również od wzajemnego przesunięcia przestrzennego przepływów składowych względem obwodu maszyny, czyli od faz prądów składowych symetrycznych.

Warunki przemiany elektromechanicznej będą tym dogodniejsze, im wypadkowe pole magnetyczne będzie bardziej zbliżone do kołowego i im mniejsze prądy fazowe będą płynęły w poszczególnych uzwojeniach. W odniesieniu do składowych symetrycznych oznacza to dążenie do spełnienia następujących warunków:

$$|I_{I2}| \rightarrow 0 \quad |I_{II2}| \rightarrow 0$$

$$\text{Arg } I_{I2} - \text{Arg } I_{II2} \rightarrow \pi \quad (6)$$

$$\text{Arg } I_{I1} - \text{Arg } I_{II1} \rightarrow 0.$$

Najlepsze wykorzystanie obwodu elektromagnetycznego ma miejsce wówczas, gdy składowe symetryczne przeciwne prądów I i II stojana są równe zero, a składowe zgodne prądów I i II stojana mają równe argumenty (moduł sumy geometrycznej składowych jest wówczas równy ich sumie algebraicznej).

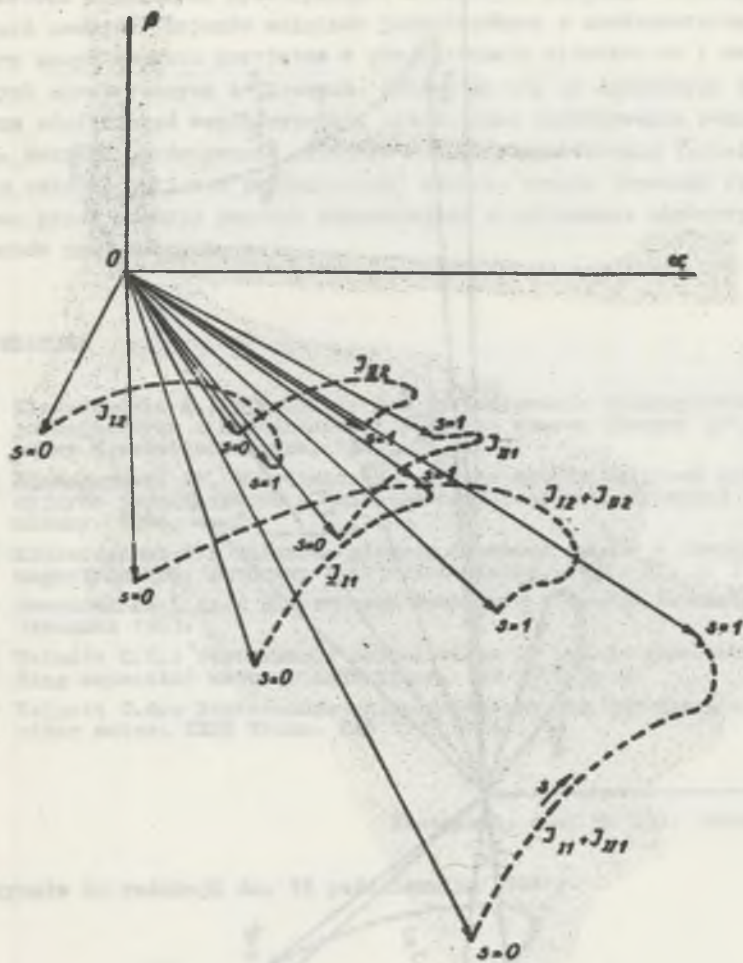
Opierając się na powyższych rozważaniach można zaproponować dwa współczynniki ułatwiające ocenę wykorzystania obwodu elektromagnetycznego silnika:

$$\epsilon = \frac{|I_{I1} + I_{II1}|}{|I_{I1} + I_{II1}| + |I_{I2} + I_{II2}|} \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{|I_{I1} + I_{II1}| + |I_{I2} + I_{II2}|}{|I_{I1}| + |I_{II1}| + |I_{I2}| + |I_{II2}|}$$

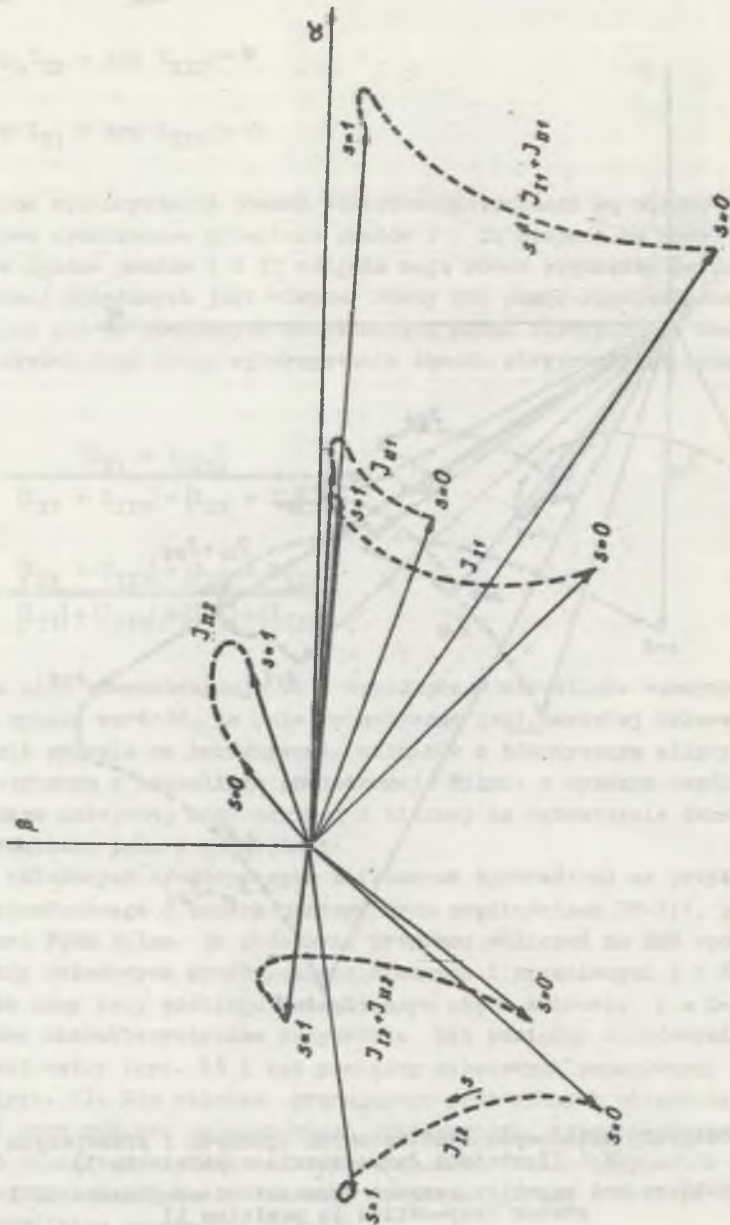
Pierwszy z nich charakteryzuje pole wypadkowe w szczelinie maszyny i przybiera tym wyższą wartość, im pole magnetyczne jest bardziej kołowe. Drugi współczynnik pozwala na porównywanie silników o identycznym eliptycznym polu magnetycznym w szczelinie powietrznej. Silnik o wyższym współczynniku κ wymaga mniejszej mocy czynnej i biernej na wytworzenie danego eliptycznego rozkładu pola w szczelinie.

Metodę składowych symetrycznych 2-fazowych sprowadzono na przykładzie silnika jednofazowego o trzech nastawianych prędkościach DF-711, produkowanego przez FSEM Silma. Na podstawie programu obliczeń na EMC sporządzono hodografy składowych symetrycznych zgodnych i przeciwnych I i II stojana oraz ich sumy przy poślizgu zmieniającym się w zakresie $s = 0-1$. Przedstawiono dwa charakterystyczne przypadki: kąt pomiędzy składowymi przeciwnymi jest ostry (rys. 6) i kąt pomiędzy składowymi przeciwnymi jest rozwarty (rys. 7). Dla silnika, pracującego przy różnych położeniach przełącznika i przy różnych pojemnościach kondensatora, wybrano przypadki o zbliżonych charakterystykach mechanicznych. Dla takich przypadków obliczono współczynniki ϵ i κ i stwierdzono, że pozostają one w ścisłym związku ze współczynnikiem sprawności silnika.



Rys. 6. Hodograpy składowych symetrycznych zgodnych i przeciwnych prądów I i II stojana (przełącznik w położeniu 1)

Fig. 6. Positive and negative current symmetrical components of I and II stator (tap-switch in position 1)



Rys. 7. Hodografy składowych symetrycznych zgodnych i przeciwnych prądów I i II stojana (przełącznik w położeniu 2)

Fig. 7. Positive and negative current symmetrical components of I and II stator (tap-switch in position 2)

5. Wnioski

Metoda składowych symetrycznych 2-fazowych obejmuje wszystkie układy połączeń uzwojeń stojanów silników jednofazowych z kondensatorem pracy i jest w tym samym stopniu przydatna w projektowaniu silników co i metoda składowych symetrycznych 4-fazowych. Opierając się na składowych symetrycznych można zdefiniować współczynniki, ułatwiające porównywanie różnych rozwiązań. Możliwość porównywania silników w toku projektowania (przed zakończeniem całości obliczeń projektowych) stwarza szansę lepszego wykorzystania czasu pracy maszyny poprzez wcześniejsze eliminowanie niekorzystnych wariantów projektowych.

LITERATURA

- [1] Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Projektowanie indukcyjnych silników jednofazowych z kondensatorem pracy za pomocą maszyny cyfrowej. *Rozprawy Elektrotechniczne*, 1983, 29, z. 1.
- [2] Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Ogólna metoda obliczeń silników indukcyjnych jednofazowych z kondensatorem roboczym. *Przegląd Elektrotechniczny*. 1984, z. 2.
- [3] Kluszczyński K.: Składowe aktywne i zerowe prądów w obwodach elektromagnetycznych. *Rozprawy Elektrotechniczne*, 1981, 27, z. 3.
- [4] Owczarek J. i in.: *Elektryczne maszynowe elementy automatyki*. WNT, Warszawa 1983.
- [5] Veinott C.G.: Performance calculations L- and T-connected tapped-winding capacitor motors. *IEEE Trans. PAS* 1977 No 4.
- [6] Veinott C.G.: Performance calculations on the two-speed shunted capacitor motor. *IEEE Trans. PAS* 1977 No 4.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do redakcji dn. 15 października 1986 r.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА 2- И 4-ФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В АНАЛИЗЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ОДНОФАЗНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Резюме

Представлены два метода расчёта однофазных конденсаторных двигателей с различными соединениями статорных обмоток. Первый основан на модели 4-фазной машины и на методе 4-фазных симметричных составляющих, второй же на модели 2-фазной машины с двойной статорной обмоткой и на методе 2-фазных симметричных составляющих. Оба метода сравнены с собой с точки зрения проектирования двигателей и их оптимизации. Предложены и проанализированы показатели изображающие использование электромагнитной цепи двигателей.

APPLICATION OF 2- AND 4-PHASE SYMMETRICAL COMPONENTS TO ANALYSIS AND DESIGN OF SINGLE-PHASE CAPACITOR MOTORS

Summary

Two methods of analysis of single-phase capacitor motors with different connections of stator windings are presented. The first of them is based on a model of four-phase machine and on a method of four-phase symmetrical components, the second one - on a model of two-phase machine with double stator windings and on a method of two-symmetrical components. Above methods are compared from design and optimization point of view. Some coefficients which enable us to estimate the efficiency of motors on the basis of current symmetrical components are formulated and analysed.