

Roman MIKSIEWICZ

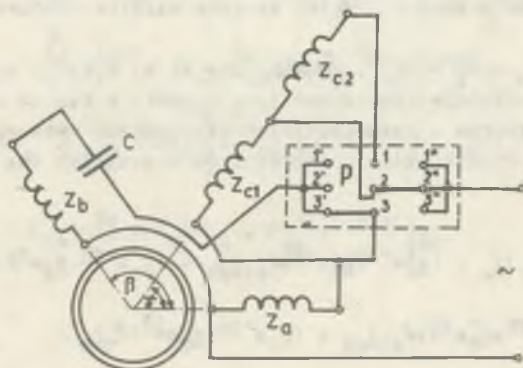
Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechnika Śląska

SILNIK JEDNOFAZOWY O DZIEWIĘCIU UKŁADACH  
POŁĄCZEŃ UZWOJEŃ STOJANA

**Streszczenie.** Przeprowadzono analizę i przedstawiono metodę obliczeń obwodu elektromagnetycznego indukcyjnego silnika jednofazowego z kondensatorem pracy umożliwiającym uzyskiwanie dziewięciu różnych charakterystyk mechanicznych. Algorytm obliczeń zweryfikowano pomiarowo na silniku zaprojektowanym w oparciu o przeprowadzoną metodę obliczeń.

1. Wprowadzenie

Silniki indukcyjne jednofazowe z kondensatorem pracy produkcji krajowej posiadają uzwojenia, których osie są przesunięte przestrzennie o kąt elektryczny  $\frac{\pi}{2}$ . Dotyczy to zarówno silników o uzwojeniach włączonych na stałe (silniki ogólnego zastosowania np. serii SEf), jak również silników o uzwojeniach przełączalnych o dwóch lub trzech prędkościach obrotowych [3]. W pracach [1], [4] omawia się rozwiązania, w których kąt elektryczny między osiami uzwojeń jest różny od  $\frac{\pi}{2}$ . Daje to lepsze możliwości otrzymania różnych charakterystyk mechanicznych, zwłaszcza w silnikach o przełączalnych uzwojeniach. Wg autora patentu [2] możliwe jest otrzymanie dziewięciu prędkości obrotowych silnika przez zastosowanie tylko dwóch uzwojeń dodatkowych i odpowiednie włączanie tych uzwojeń za pomocą przełącznika P (rys. 1). Autor patentu zaleca, aby kąt między osią fazy

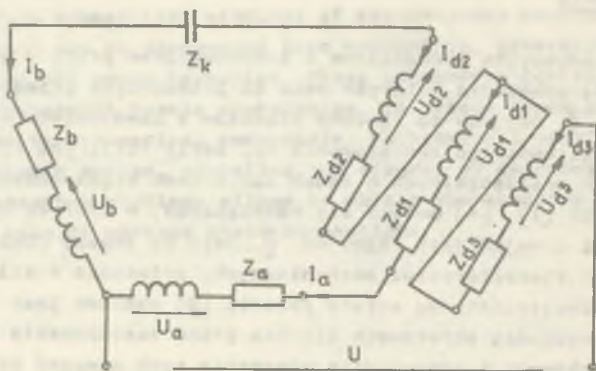


Rys. 1. Układ połączeń silnika o przełączalnych uzwojeniach stojana

głównej i pomocniczej zawierał się w przedziale  $15^{\circ}$ - $120^{\circ}$ , natomiast kąt między osią fazy głównej, a osią fazy dodatkowej wynosił  $20^{\circ}$ - $70^{\circ}$ . Celem niniejszej pracy było określenie możliwości uzyskania takiego rozwiązania w oparciu o obwód magnetyczny silnika produkowanego. Należało więc opracować algorytm obliczeń, zaprojektować uzwojenia oraz dokonać weryfikacji pomiarowej.

## 2. Obliczanie obwodu elektromagnetycznego

Przy opracowywaniu algorytmu obliczeń silnika posłużono się teorią pól wirujących. Przyjęto nienasycony obwód magnetyczny, uwzględniono podstawową harmoniczną przestrzenną, pominięto straty w rdzeniu oraz indukcyjności wzajemne między uzwojeniami związane ze strumieniem rozproszenia. Aby uprościć analizę, zastąpiono rzeczywisty układ połączeń układem równoważnym, pozwalającym na realizację wszystkich układów połączeń uzwojeń silnika rzeczywistego. Schemat takiego układu przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Układ połączeń uzwojeń stojana silnika równoważnego

Impedancje  $\underline{Z}_i = R_i + jX_{\sigma i}$ , gdzie:  $i = a, b, d_1, d_2, d_3$  zawierają rezystancje i reaktancje rozproszeń faz. Zgodnie z teorią pól wirujących siły elektromotoryczne w poszczególnych uzwojeniach wytworzone przez pole wirujące zgodnie i przeciwnie pochodzące od wszystkich faz są wyrażone w postaci:

$$U_a = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) I_a + (\underline{Z}_1 e^{-j\theta} + \underline{Z}_2 e^{j\theta}) \psi_{d1} I_{d1} + (\underline{Z}_1 e^{-j\theta} + \underline{Z}_2 e^{j\theta}) \psi_{d2} I_{d2} +$$

$$+ (\underline{Z}_1 e^{-j\theta} + \underline{Z}_2 e^{j\theta}) \psi_{d3} I_{d3} + (\underline{Z}_1 e^{-j\theta} + \underline{Z}_2 e^{j\theta}) \psi_b I_b$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_b = & (Z_1 e^{j\beta} + Z_2 e^{-j\beta}) \dot{\varphi}_b \underline{I}_e + (Z_1 + Z_2) \dot{\varphi}_b^2 \underline{I}_b + \\ & + (Z_1 e^{j(\beta-\varphi)} + Z_2 e^{-j(\beta-\varphi)}) \dot{\varphi}_b \dot{\varphi}_{d1} \underline{I}_{d1} + \\ & + (Z_1 e^{j(\beta-\varphi)} + Z_2 e^{-j(\beta-\varphi)}) \dot{\varphi}_b \dot{\varphi}_{d2} \underline{I}_{d2} + \\ & + (Z_1 e^{j(\beta-\varphi)} + Z_2 e^{-j(\beta-\varphi)}) \dot{\varphi}_b \dot{\varphi}_{d3} \underline{I}_{d3} \end{aligned}$$

podobnie dla pozostałych uzwojeń,  
gdzie:

$$\dot{\varphi}_b = \frac{z_b^k u_b}{z_a^k u_a}; \quad \dot{\varphi}_{d1} = \frac{z_{d1}^k u_{d1}}{z_a^k u_a}; \quad \dot{\varphi}_{d2} = \frac{z_{d2}^k u_{d2}}{z_a^k u_a};$$

$$\dot{\varphi}_{d3} = \frac{z_{d3}^k u_{d3}}{z_a^k u_a} - \text{przekładnia sprowadzająca uzwojenie danej fazy do fazy odniesienia,}$$

$Z_1, Z_2$  - impedancje dla składowej zgodnej i przeciwnej.

Korzystając z powyższych wyrażeń oraz równań prądowo-napięciowych obwodu (rys. 2), można wyprowadzić wzory na prądy fazowe:

$$\underline{I}_e = \underline{U} \frac{Z_{BB}}{Z_{AA} Z_{BB} - Z_{AB} Z_{BA}}$$

$$\underline{I}_b = \underline{U} \frac{Z_{BA}}{Z_{AA} Z_{BB} - Z_{AB} Z_{BA}}$$

gdzie:

$$Z_{AA} = Z_e + Z_{d1} + Z_{d3} + \left[ 1 + 2(\dot{\varphi}_{d1} + \dot{\varphi}_{d3}) \cos \varphi + (\dot{\varphi}_{d1} + \dot{\varphi}_{d3})^2 \right] (Z_1 + Z_2)$$

$$Z_{AB} = Z_{d3} + \left[ \dot{\varphi}_b e^{-j\beta} + (\dot{\varphi}_{d3} - \dot{\varphi}_{d2})(1 + \dot{\varphi}_{d1} + \dot{\varphi}_{d3}) e^{-j\varphi} + \right.$$

$$\left. + \dot{\varphi}_b (\dot{\varphi}_{d1} + \dot{\varphi}_{d3}) e^{-j(\beta-\varphi)} \right] Z_1 + \left[ \dot{\varphi}_b e^{j\beta} + (\dot{\varphi}_{d3} - \dot{\varphi}_{d2}) \right.$$

$$\left. (1 + \dot{\varphi}_{d1} + \dot{\varphi}_{d3}) e^{j\varphi} + \dot{\varphi}_b (\dot{\varphi}_{d1} + \dot{\varphi}_{d3}) e^{j(\beta-\varphi)} \right] Z_2$$

$$\begin{aligned}
 Z_{BA} &= Z_a + Z_{d1} + \left[ 1 + 2\gamma_{d1}^2 \cos \varphi + \gamma_{d3}^2 e^{-j\varphi} + \gamma_{d2}^2 e^{j\varphi} - \right. \\
 &\quad \left. - \gamma_b^2 e^{j\beta} + (\gamma_{d1}^2 + \gamma_{d3}^2)(\gamma_{d1}^2 + \gamma_{d2}^2 - \gamma_b^2 e^{j(\beta-\varphi)}) \right] Z_1 + \\
 &\quad + \left[ 1 + 2\gamma_{d1}^2 \cos \varphi + \gamma_{d3}^2 e^{j\varphi} + \gamma_{d2}^2 e^{-j\varphi} - \gamma_b^2 e^{j\beta} + \right. \\
 &\quad \left. + (\gamma_{d1}^2 + \gamma_{d3}^2)(\gamma_{d1}^2 + \gamma_{d2}^2 - \gamma_b^2 e^{-j(\beta-\varphi)}) \right] Z_2 \\
 Z_{BB} &= -Z_b - Z_k - Z_{d2} + \left[ 2\gamma_b^2 \gamma_{d3}^2 \cos(\beta-\varphi) + (\gamma_{d3}^2 - \gamma_{d2}^2)(e^{-j\varphi} + \gamma_{d1}^2 + \gamma_{d2}^2) + \right. \\
 &\quad \left. + \gamma_b^2 (e^{-j\beta} + \gamma_{d1}^2 e^{-j(\beta-\varphi)} - \gamma_{d3}^2 e^{j(\beta-\varphi)}) - \gamma_b^2 \right] Z_1 + \\
 &\quad + \left[ 2\gamma_b^2 \gamma_{d2}^2 \cos(\beta-\varphi) + (\gamma_{d3}^2 - \gamma_{d2}^2)(e^{j\varphi} + \gamma_{d1}^2 + \gamma_{d2}^2) + \gamma_b^2 (e^{j\beta} + \gamma_{d1}^2 e^{j(\beta-\varphi)} - \right. \\
 &\quad \left. - \gamma_{d3}^2 e^{-j(\beta-\varphi)} - \gamma_b^2) \right] Z_2
 \end{aligned}$$

Prądy składowych zgodnych i przeciwnych:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \left[ 1 - e^{-j\varphi}(\gamma_{d1}^2 + \gamma_{d3}^2) \right] I_a + \left[ \gamma_b^2 e^{-j\beta} - (\gamma_{d2}^2 - \gamma_{d3}^2) e^{j\varphi} \right] I_b \\
 I_2 &= \left[ 1 + e^{j\varphi}(\gamma_{d1}^2 + \gamma_{d3}^2) \right] I_a + \left[ \gamma_b^2 e^{j\beta} - (\gamma_{d2}^2 - \gamma_{d3}^2) e^{j\varphi} \right] I_b
 \end{aligned}$$

Napięcia składowych zgodnych i przeciwnych:

$$E_1 = I_1 Z_1$$

$$E_2 = I_2 Z_2$$

Znając wartości napięć składowych oblicza się indukcyjność w szczelinie oraz w poszczególnych elementach obwodu magnetycznego. Momenty składowe:

$$M_1 = \frac{P_b}{2\pi f} I_1^2 \operatorname{Re} \left\{ Z_1 \right\}$$

$$M_2 = \frac{P_b}{2\pi f} I_2^2 \operatorname{Re} \left\{ Z_2 \right\}$$

Poszczególnym układom połączeń uzwojeń (rys. 1) odpowiadają następujące położenia przełącznika P, liczby zwojów (przekładnie) i impedancje rozproszeń  $\underline{Z}_1$  uzwojeń dodatkowych:

$$\text{układ 1 - 1-1' i 1-1''} \quad \psi_{d1}^y = \psi_{c1}^y + \psi_{c2}^y \psi_{d2}^y = 0, \quad \psi_{d3}^y = 0$$

$$\underline{Z}_{d1} = \underline{Z}_{c1} + \underline{Z}_{c2}, \quad \underline{Z}_{d2} = 0, \quad \underline{Z}_{d3} = 0$$

$$\text{układ 2 - 1-1' i 2-2''} \quad \psi_{d1}^y = \psi_{c1}^y, \quad \psi_{d2}^y = \psi_{c2}^y, \quad \psi_{d3}^y = 0$$

$$\underline{Z}_{d1} = \underline{Z}_{c1}, \quad \underline{Z}_{d2} = \underline{Z}_{c2}, \quad \underline{Z}_{d3} = 0$$

$$\text{układ 3 - 1-1' i 3-3''} \quad \psi_{d1}^y = 0, \quad \psi_{d2}^y = \psi_{c1}^y + \psi_{c2}^y, \quad \psi_{d3}^y = 0$$

$$\underline{Z}_{d1} = 0, \quad \underline{Z}_{d2} = \underline{Z}_{c1} + \underline{Z}_{c2}, \quad \underline{Z}_{d3} = 0$$

$$\text{układ 4 - 2-2' i 1-1''} \quad \psi_{d1}^y = \psi_{c1}^y, \quad \psi_{d2}^y = 0, \quad \psi_{d3}^y = \psi_{c2}^y$$

$$\underline{Z}_{d1} = \underline{Z}_{c1}, \quad \underline{Z}_{d2} = 0, \quad \underline{Z}_{d3} = \underline{Z}_{c2}$$

$$\text{układ 5 - 2-2' i 2-2''} \quad \psi_{d1}^y = \psi_{c1}^y, \quad \psi_{d2}^y = 0, \quad \psi_{d3}^y = 0$$

$$\underline{Z}_{d1} = \underline{Z}_{c1}, \quad \underline{Z}_{d2} = 0, \quad \underline{Z}_{d3} = 0$$

$$\text{układ 6 - 2-2' i 3-3''} \quad \psi_{d1}^y = 0, \quad \psi_{d2}^y = \psi_{c2}^y, \quad \psi_{d3}^y = 0$$

$$\underline{Z}_{d1} = 0, \quad \underline{Z}_{d2} = \underline{Z}_{c2}, \quad \underline{Z}_{d3} = 0$$

$$\text{układ 7 - 3-3' i 1-1''} \quad \psi_{d1}^y = 0, \quad \psi_{d2}^y = 0, \quad \psi_{d3}^y = \psi_{c1}^y + \psi_{c2}^y$$

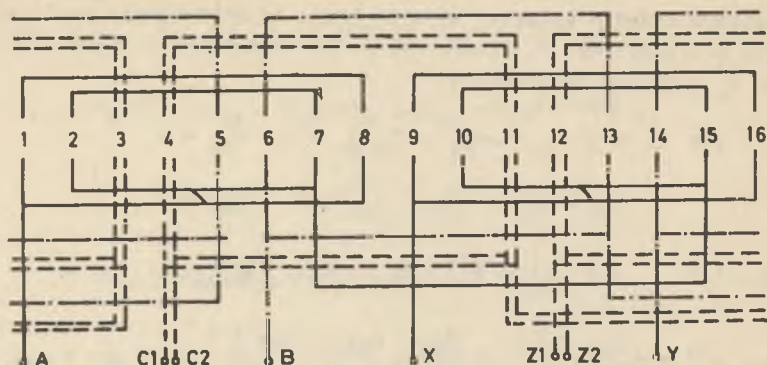
$$\underline{Z}_{d1} = 0, \quad \underline{Z}_{d2} = 0, \quad \underline{Z}_{d3} = \underline{Z}_{c1} + \underline{Z}_{c2}$$

$$\text{układ 8 - 3-3' i 2-2''} \quad \psi_{d1}^y = 0, \quad \psi_{d2}^y = 0, \quad \psi_{d3}^y = \psi_{c1}^y$$

$$\underline{Z}_{d1} = 0, \quad \underline{Z}_{d2} = 0, \quad \underline{Z}_{d3} = \underline{Z}_{c1}$$

$$\text{układ 9 - 3-3' i 3-3''} \quad \psi_{d1}^y = 0, \quad \psi_{d2}^y = 0, \quad \psi_{d3}^y = 0$$

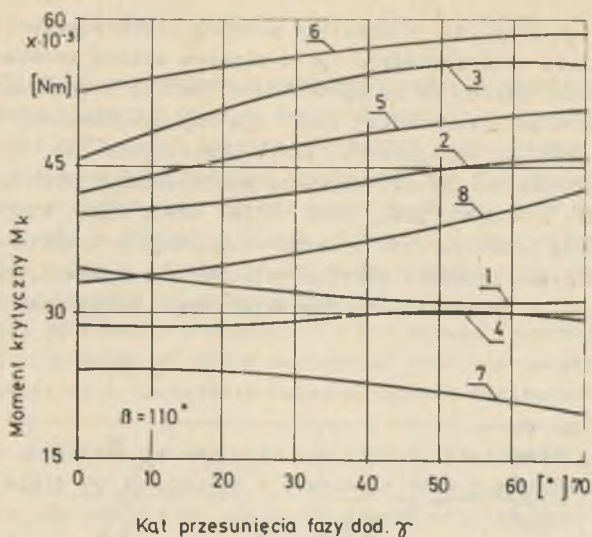
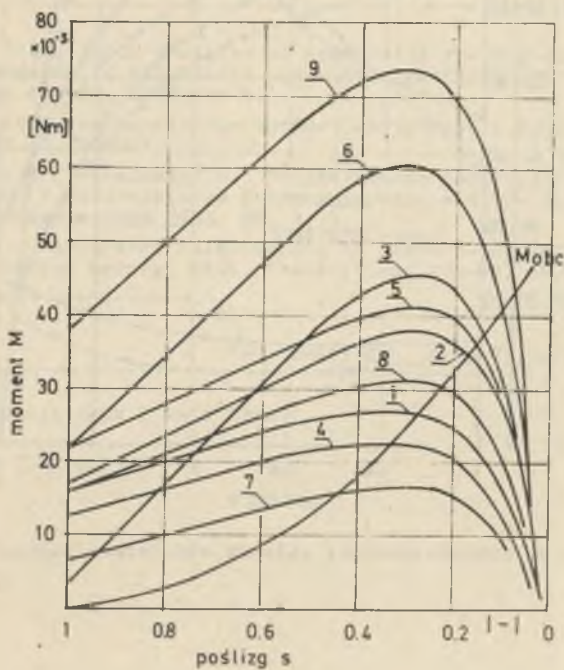
$$\underline{Z}_{d1} = 0, \quad \underline{Z}_{d2} = 0, \quad \underline{Z}_{d3} = 0.$$



Rys. 3. Schemat uzwojenia stojana  $z_1 = 16$ ;  $2p_b = 2$ ;  $\gamma_a = 7,5$ ;  $\gamma_b = 7$ ;  
 $\gamma_c = 7$

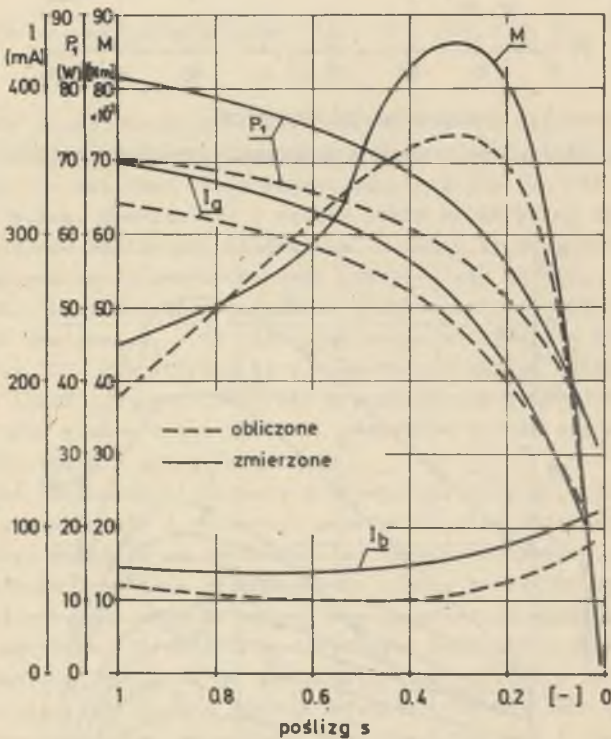
Na podstawie przedstawionych zależności opracowano algorytm i program obliczeń na maszynie cyfrowej umożliwiający zaprojektowanie tego typu silnika. Przyjęto do obliczeń obwód magnetyczny silnika UA-121 produkowanego przez FSMM Silma. Oparcie się o gotowy obwód magnetyczny ogranicza w znacznym stopniu możliwości projektowe, dotyczy to zwłaszcza doboru uzwojenia (rozmięszczenia przestrzennego uzwojeń fazy głównej, pomocniczej i dodatkowych), przy określonej liczbie żłobków stojana. Dla stojana o liczbie żłobków stojana  $z_1 = 16$  zaprojektowano uzwojenie o liczbie biegunów  $2p = 2$  (rys. 3), dla którego kąty elektryczne między osiami uzwojeń wynoszą  $\beta = 112,5^\circ$ ,  $\gamma = 67,5^\circ$ . Przy projektowaniu uwzględniono w sposób tradycyjny dla maszyn elektrycznych, nasycenie obwodu magnetycznego oraz straty mechaniczne i straty w rdzeniu.

Zmiennymi niezależnymi zadania projektowego były więc dane nawojowe uzwojeń (liczby zwojów i przekroje przewodów) oraz pojemność kondensatora. Projektowanie polegało na takim doborze danych nawojowych, aby uzyskać możliwie maksymalnie duże zróżnicowanie między charakterystykami mechanicznymi silnika, co przy założonej charakterystyce obciążenia daje różne prędkości obrotowe. Ograniczenia dotyczyły: gęstości prądów w poszczególnych uzwojeniach, napięcia na kondensatorze, indukcji w szczeliny stojan-wirnik oraz zapełnienia żłobków stojana. Dla silników ogólnego zastosowania ograniczenia są sprawdzane przy biegu jałowym i obciążeniu znamionowym. W tym przypadku należało sprawdzać ograniczenia dla każdego z układów połączeń oddzielnie, dla poszczególnych określonych przecięciem charakterystyk mechanicznych silnika z charakterystyką obciążenia. Dla przebiegu charakterystyk silnika istotne znaczenie ma oprócz danych nawojowych również dobór kątów między osiami uzwojeń. Jek wykazały obliczenia, największe wartości momentów krytycznych uzyskuje się przy  $\beta \approx 90^\circ$ , natomiast poprzez zmianę przesunięcia uzwojeń dodatkowych (kąt  $\gamma$ ) uzyskuje się zmianę wartości momentów krytycznych, wzrost bądź zmniejszenie ze

Rys. 4. Momenty krytyczne dla poszczególnych układów przy  $\beta = \text{const}$ 

Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne silnika dla poszczególnych układów połączeń

wzrostem kąta  $\varphi$  (rys. 4). W praktyce dowolne przemieszczenie osi uzwojeń nie jest możliwe, mogą zachodzić tylko skokowe zmiany spowodowane uzłobkowaniem stojana. Zmiany te są ograniczone również stosunkowo niewielką liczbą zębów w silnikach małej mocy. Dla zaprojektowanego silnika uzyskano charakterystyki mechaniczne, które przedstawia rys. 5. Przy założonej charakterystyce obciążenia uzyskano dla poszczególnych układów prędkości obrotowe  $n = 1680, 2010, 2160, 2325, 2490, 2535, 2580, 2700, 2760$  obr/min. Badania laboratoryjne silnika wykonanego w oparciu o projekt wykazały zadowalającą zgodność wyników obliczeń z pomiarami. Dla układu połączeń 9 na rys. 6 przedstawiono charakterystyki obliczone i uzyskane z pomiarów.



Rys. 6. Charakterystyki silnika dla układu połączeń 9



### 3. Wnioski

Stwierdzono, że zastosowanie dodatkowych uzwojeń umożliwia uzyskanie dziewięciu różnych charakterystyk mechanicznych, a w konsekwencji dziewięciu prędkości obrotowych silnika. Wprawdzie przy zmianie tych charakterystyk nie ulega zmianie poślizg krytyczny, ale dla obciążenia typu wentylatorowego przedstawiony sposób zmian prędkości daje zadowalające rezultaty. W praktyce rzadko istnieje potrzeba nastawy dziewięciu prędkości. Eliminując jeden z przełączników można uzyskać trzy grupy, z których każda zawiera trzy różne charakterystyki.

W zależności od rodzaju wentylatora w ten sposób (poprzez zastosowanie odpowiedniego przełączenia) można dostosować charakterystyki silnika do różnych charakterystyk obciążenia celem uzyskania zbliżonych prędkości obrotowych.

Opracowany program obliczeń może być również zastosowany do obliczeń projektowych wielu typów uzwojeń o dowolnych kątach przesunięć między uzwojeniami, w tym również do obliczeń silnika trójfazowego zasilanego z sieci jednofazowej.

### LITERATURA

- [1] Guru B.S.: Cross-field analysis of asymmetric three-phase induction motors extensions to single- and two-phase machines theoreof. IEEE Transactions PAS-98, 1979, nr 4.
- [2] Kohn A.: Perfectionnements aux moteurs monophasés a condensateur 1975. Patent nr 7503024.
- [3] Kluszczyński K., Mikielwicz R.: Projektowanie indukcyjnych silników jednofazowych z kondensatorem pracy za pomocą maszyny cyfrowej. Rozprawy Elektrotechniczne 1983, 29, z. 1.
- [4] Veinott C.G.: Perfornance calculations on L-and T-connected tapped-winding capacitor motors. IEEE, Transactions PAS-96, 1977, nr 4.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do redakcji dnia 2 maja 1984 r.

ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ДЕВЯТИ СХЕМАМИ  
ВКЛЮЧЕНИЯ ОБМОТКОВ СТАТОРА

Р е з ю м е

Представлен метод расчетов и произведено анализ электромагнитной цепи однофазного индукционного двигателя с рабочим конденсатором. Через соответствующее переключивание обмоток статора этот двигатель делает возможным получение девяти различных механических характеристик. Алгоритм расчетов проверен для двигателя, который был проектирован согласно с разработанным методом расчетов.

SINGLE PHASE CAPACITOR MOTOR WITH NINE  
VARIOUS CONNECTIONS OF STATOR WINDINGS

S u m m a r y

The single phase capacitor motor, allowing to obtain nine various torque characteristics has been described. The motor, designed according to presented algorithm of calculation of electromagnetic circuit has been accomplished and tested.