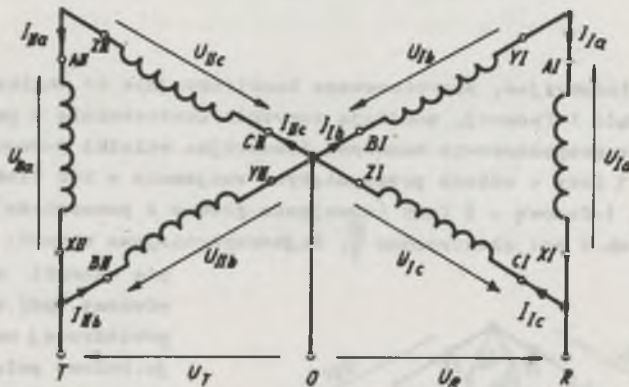


Przy innych prędkościach pojawia się eliptyczne pole magnetyczne, którego składowa przeciwbieżna wytwarza przeciwbieżny moment elektromagnetyczny oraz powoduje wzrost strat w żelazie.

Istnieje wiele układów połączeń, pozwalających na zasilanie silnika 3-fazowego z sieci jednofazowej. Dla wytworzenia momentu rozruchowego i zapewnienia dobrego wykorzystania obwodu elektromagnetycznego potrzebne są jednak - podobnie jak w silnikach jednofazowych - dodatkowe impedancje zewnętrzne (kondensatory i indukcyjności). Silniki 3-fazowe, zasilane jednofazowo, charakteryzują się własnościami eksploatacyjnymi zbliżonymi do silników jednofazowych.

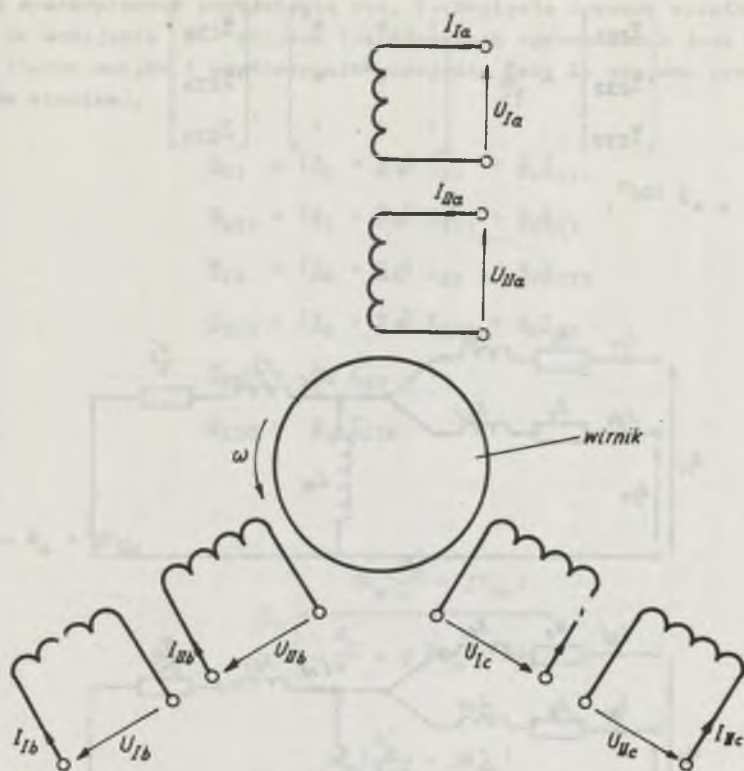
W patencie USA 10/6/76 nr 729891 opisano układ połączeń, umożliwiający dwufazowe zasilanie 3-fazowego silnika z wykorzystaniem przewodu zerowego sieci 3-fazowej, bez potrzeby stosowania dodatkowych impedancji. Każde uzwojenie fazy stojana musi być podzielone na dwie równe części. W dalszym ciągu silnik taki będziemy nazywać silnikiem z dzielonymi uzwojeniami stojana. Połączenia maticzków uzwojeń stojana i sposób zasilania silnika przedstawione na rys. 1 i 2.



Rys. 2. Układ połączeń faz stojana 3-fazowej maszyny z dzielonymi uzwojeniami stojana (przypadek 2)

2. Analiza stanu ustalonego silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana

3-fazową maszynę indukcyjną z dzielonymi uzwojeniami stojana można traktować jako maszynę o podwójnym symetrycznym 3-fazowym uzwojeniu stojana (rys. 3). Elektromagnetyczne wielkości fazowe $\underline{V}_{kna,b,c}$, odpowiadające pierwszemu bądź drugiemu układowi uzwojeń, będziemy oznaczać przez \underline{V}_{Ik} lub \underline{V}_{-Ik} ($k = a, b, c$).



Rys. 3. Maszyna 3-fazowa z podwójnym symetrycznym układem faz stojana

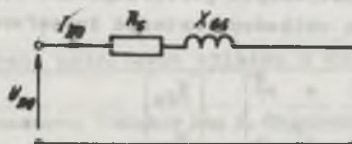
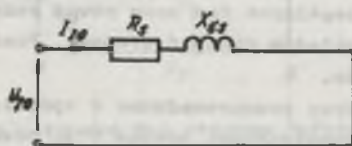
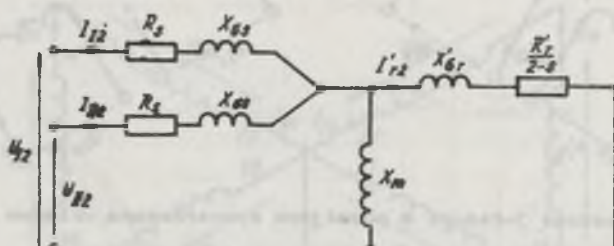
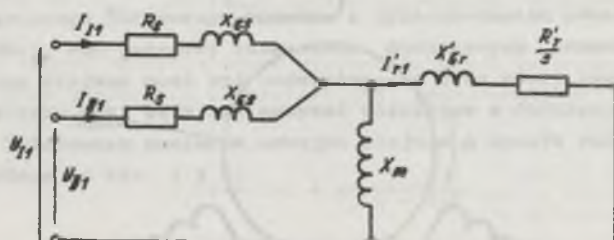
Założono liniową charakterystykę magnesowania, sinusoidalny rozkład przestrzenny okładu prądowego poszczególnych faz oraz równe rezystancje fazowe i reaktancje rozprożeń obu układów uzwojeń stojana. Pominięto straty w żelazie oraz straty mechaniczne.

Analizę stanu ustalonego maszyny przeprowadzono w oparciu o metodę składowych symetrycznych. Składowe symetryczne: zgodną (1), przeciwną (2) oraz zerową (0) wielkości elektromagnetycznych pierwszego (I) oraz drugiego (II) układu uzwojeń stojana określają unitarne macierze transformacji:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{I1} \\ \underline{V}_{I2} \\ \underline{V}_{I0} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{Ia} \\ \underline{V}_{Ib} \\ \underline{V}_{Ic} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{II1} \\ \underline{V}_{II2} \\ \underline{V}_{II0} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{IIa} \\ \underline{V}_{IIb} \\ \underline{V}_{IIc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: $a = e^{j 120^\circ}$.



Rys. 4. Schematy następcze maszyny z dzielonymi uzwojeniami stojana

Schematy zastępcze maszyny z dzielonymi uzwojeniami stojana dla składowych symetrycznych przedstawia rys. 4. Napięcia i prądy wirnika odniesiono do uzwojenia Ia stojana (współczynnik sprowadzenia jest określony przez liczbę zwojów i współczynnik uzwojenia fazy Ia stojana oraz liczbę zębów wirnika).

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{-I1} &= (\underline{Z}_1 + \underline{Z}'_c) \underline{I}_{-I1} + \underline{Z}_1 \underline{I}_{-II1} \\
 \underline{U}_{-II1} &= (\underline{Z}_1 + \underline{Z}'_c) \underline{I}_{-II1} + \underline{Z}_1 \underline{I}_{-I1} \\
 \underline{U}_{-I2} &= (\underline{Z}_2 + \underline{Z}'_c) \underline{I}_{-I2} + \underline{Z}_2 \underline{I}_{-II2} \\
 \underline{U}_{-II2} &= (\underline{Z}_2 + \underline{Z}'_c) \underline{I}_{-II2} + \underline{Z}_2 \underline{I}_{-I2} \\
 \underline{U}_{-IO} &= \underline{Z}'_c \underline{I}_{-IO} \\
 \underline{U}_{-IIO} &= \underline{Z}'_c \underline{I}_{-IIO}
 \end{aligned} \tag{3}$$

gdzie:

$$\underline{Z}'_c = R_c + jX'_{cS}$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{jX_m \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{cR} \right)}{\frac{R'_r}{s} + j(X_m + X'_{cR})} \tag{4}$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{jX_m \left(\frac{R'_r}{2-s} + jX'_{cR} \right)}{\frac{R'_r}{2-s} + j(X_m + X'_{cR})}$$

Moment elektromagnetyczny jest różnicą składowej współbieżnej i przeciwbieżnej:

$$M_o = M_{o1} - M_{o2} = \frac{p}{\omega_o} \left(I_{r1}^2 \frac{R'_r}{s} - I_{r2}^2 \frac{R'_r}{2-s} \right)$$

gdzie:

I_{r1} , I_{r2} - składowa zgodna i przeciwna prądu wirnika,

p - liczba par biegunów.

Składowa zerowa nie partycypuje w wytwarzaniu momentu elektromagnetycznego silnika.

Z dwóch układów połączeń faz stojana, prezentowanych na rys. 1 i 2, wybrano do dalszej analizy układ z rys. 1, który - jak można wykazać - charakteryzuje się lepszymi własnościami eksploatacyjnymi.

$$\underline{I}_{Ib} + \underline{I}_{IIc} - \underline{I}_{Ia} - \underline{I}_{IIa} = 0$$

$$\underline{U}_{Io} = - \underline{U}_R$$

$$\underline{U}_{IIb} = - \underline{U}_T \quad (5)$$

$$\underline{U}_{Ia} - \underline{U}_{IIa} = 0$$

$$\underline{U}_{Ia} + \underline{U}_{Ib} + \underline{U}_{Io} = 0$$

$$\underline{U}_{IIa} + \underline{U}_{IIb} + \underline{U}_{IIc} = 0.$$

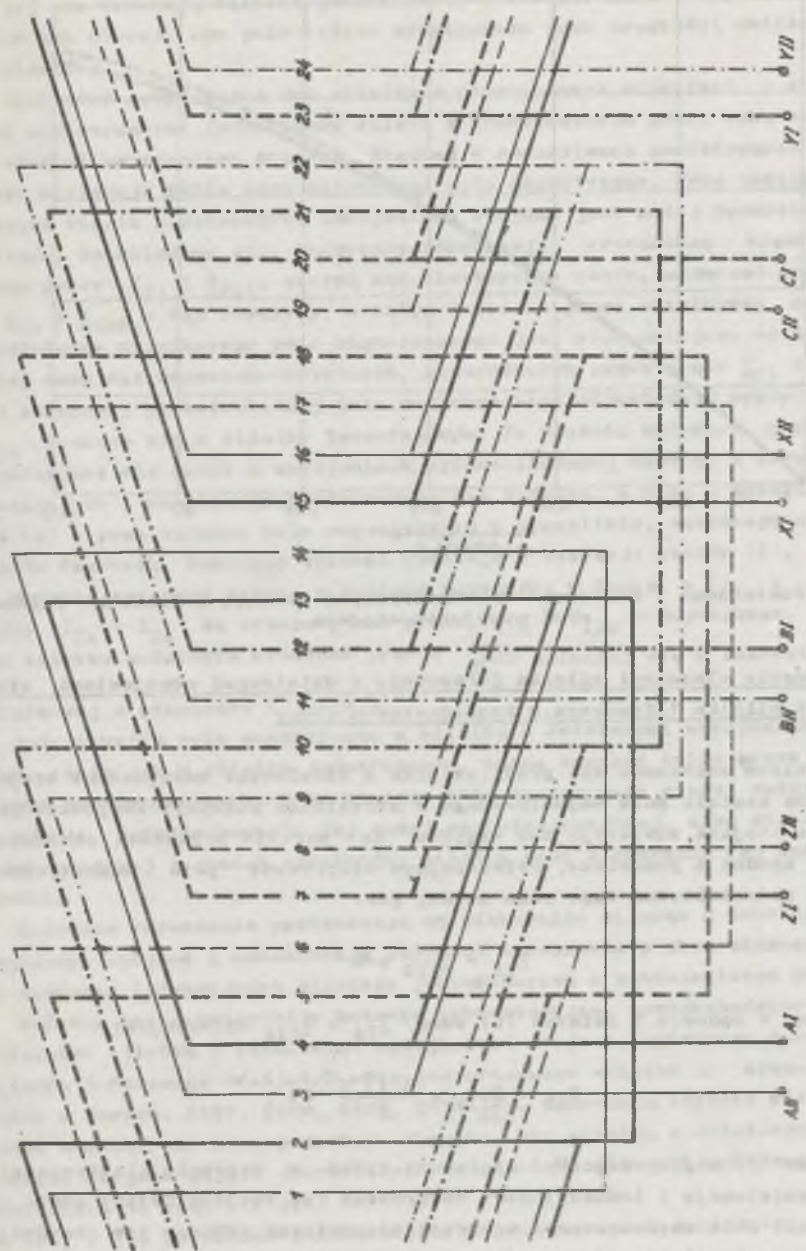
Wprowadzając do wzoru (5) składowe symetryczne otrzymujemy układ równań liniowych, którego rozwiązanie ma następującą postać:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{I1} &= \frac{\sqrt{3} U}{\Delta} \left[\underline{Z}_2(-2 - j\sqrt{3}) + \underline{Z}_6\left(-\frac{5}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right] \\ \underline{I}_{I2} &= \frac{\sqrt{3} U}{\Delta} \left[\underline{Z}_2 j\sqrt{3} + \underline{Z}_6\left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right] \\ \underline{I}_{II1} &= \frac{\sqrt{3} U}{\Delta} \left[\underline{Z}_2(-2 + j\sqrt{3}) + \underline{Z}_6\left(-\frac{5}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right] \\ \underline{I}_{II2} &= \frac{\sqrt{3} U}{\Delta} \left[-\underline{Z}_2 j\sqrt{3} + \underline{Z}_6\left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right] \\ \underline{I}_{Io} &= 0 \\ \underline{I}_{IIo} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

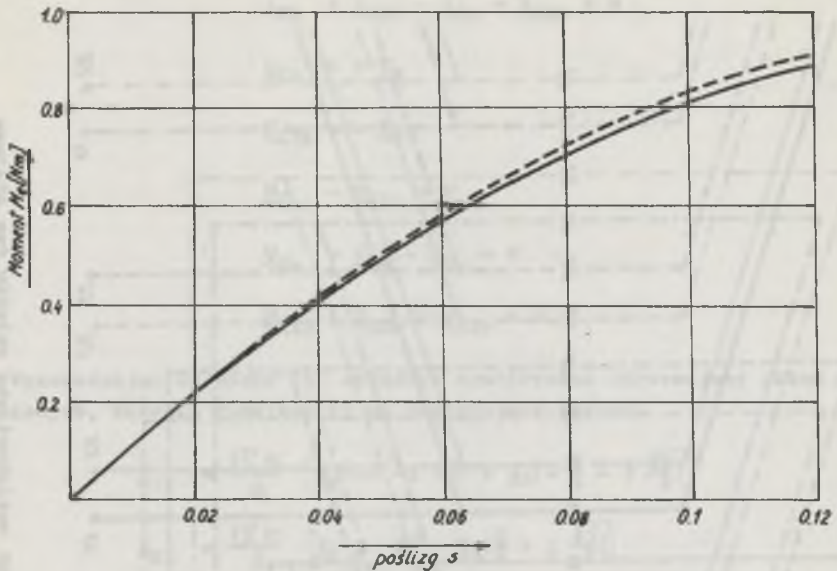
gdzie:

$$\Delta = 4\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_6(5\underline{Z}_1 + 5\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}_6) \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right).$$

Obliczone wartości prądów, napięć i momentu zweryfikowano pomiarowo. Modele wykonano na bazie indukcyjnych silników 3-fazowych Sf-63-2/B o następujących danych: 220/380V; 1,27/0,73A; 50 Hz; 250 W; $\cos \varphi = 0,77$. Rys. 5 przedstawia schemat uzwojenia i 6 zacisków, wyprowadzonych z faz stojana. Podział uzwojeń zapewnia równość rezystancji, reaktancji rozproszonych i współczynników uzwojeń dla wszystkich harmonicznych przestrzennych, lecz na skutek różnych rozpiętości zeswojów pod biegunami wypadkowe pole magnetyczne zawiera parzyste harmoniczne przestrzenne. Na rys. 6 przedstawiono pomiarową (linia ciągła) i obliczoną (linia przerywana) charakterystykę momentu elektromagnetycznego [2]. Taką samą zgodność wyników uzyskano dla charakterystyk prądów i napięć fazowych w funkcji poślugu.



Rys. 5. Schemat uworżenia z wyprzedzonymi naciskami obu układów faz stojana



Rys. 6. Pomierzone i obliczone charakterystyki momentu silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana

3. Porównanie własności silnika 3-fazowego z dzielonymi uzwojeniami stojana i silnika 1-fazowego z kondensatorem pracy

Zasadnicze znaczenie dla pracy silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana posiada kształt pola magnetycznego w szczelinie maszyny. Wszystkie prądy fazowe stojana zawierają bez względu na wartość prędkości obrotowej składowe zgodne i przeciwne, wytwarzające eliptyczne pole magnetyczne. Składowa przeciwbieżna tego pola znika, gdy:

$$\underline{I}_{I2} + \underline{I}_{III2} = 0 \quad (7)$$

Obliczając w oparciu o związki (6) sumę $\underline{I}_{I2} + \underline{I}_{III2}$ otrzymujemy:

$$\underline{I}_{I2} + \underline{I}_{III2} = \frac{3\sqrt{3}U}{\Delta} \underline{Z}_G. \quad (8)$$

Warunek (7) mógłby więc być spełniony tylko w maszynie elektrycznej, której rezystancje i indukcyjności rozproszeń faz stojana byłyby równe zero. Kształt pola magnetycznego w szczelinie maszyny odbiega tym bardziej od kołowego, im większy jest poślizg silnika. Składowa przeciwbieżna pola eliptycznego przyjmuje maksymalną wartość przy obciążeniu znamionowym. Wa-

dy taj nie wykazują silniki jednofazowe, w których impedancję zewnętrzną można tak dobrać, aby pole kołowe występowało przy prędkości zbliżonej do znamionowej.

Wyobraźmy sobie teraz dwa silniki o identycznych wirnikach i szczelinach powietrznych: jednofazowy silnik z kondensatorem pracy oraz silnik z dzielonymi uzwojeniami stojana. Niechaj w szczelinach powietrznych obu silników występuje takie samo eliptyczne pole magnetyczne. Przy takich założeniach silnik z dzielonymi uzwojeniami stojana jest mniej korzystny, a to dlatego, że składowe siły magneto-motoryczne, wytwarzane odpowiednio przez prądy I_{I1} i I_{III1} , tworzą kąt elektryczny ostry, natomiast przez prądy I_{I2} i I_{III2} - kąt rozwarty. W całym zakresie pracy silnikowej składowa współbieżna wypadkowego pola magnetycznego jest więc mniejsza od algebraicznej sumy sił magneto-motorycznych, generowanych przez prądy I_{I1} i I_{III1} , zaś składowej przeciwbieżnej pola magnetycznego odpowiadają prądy I_{I2} i I_{III2} większe niż w silniku jednofazowym. Te właśnie składowe przesiewne, pojawiające się nawet w uzwojeniach wyidealizowanej maszyny o zerowych rezystancjach i reaktancjach rozproszonych faz stojana, a więc - zgodnie ze wzorem (8) - przy kołowym polu magnetycznym w szczelinie, zakłócają symetrię prądów fazowych. Powyższe wnioski wynikają z dyskusji wzorów (6).

Najmniejszy prąd płynie w ogólnym przypadku w fазie a ($I_{Ia} = I_{IIIa}$), prądy I_{Ib} i I_{Ic} są większe, zaś prądy I_{IIb} i I_{IIIc} - największe. W badanym silniku modelowym stosunek prądów $\frac{I_{IIb}}{I_{Ia}}$ zmienił się w zakresie pracy silnikowej w granicach 4,3 - 4,5.

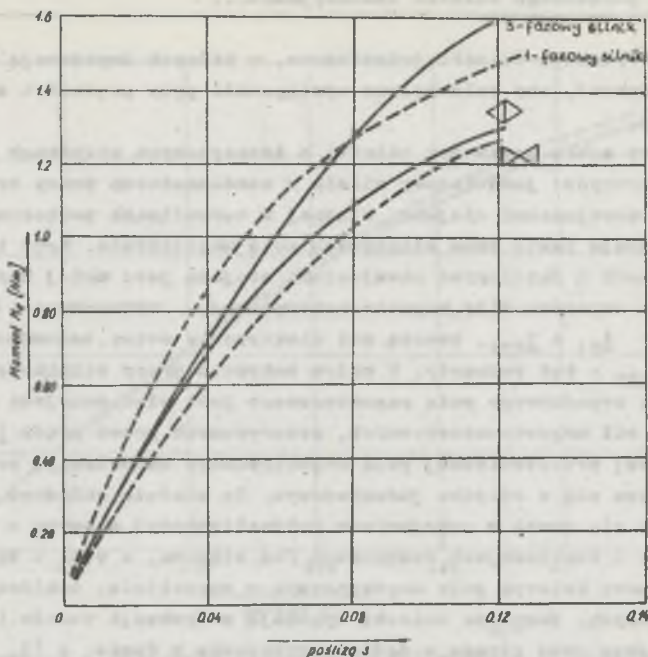
Podsumowując, pole magnetyczne w silniku z dzielonymi uzwojeniami stojana, takie jak w silniku jednofazowym, można uzyskać tylko przez powiększenie prądów fazowych, a to oznacza albo wzrost masy miedzi zużytej na uzwojenia, przy zachowaniu tej samej gęstości prądowej, albo wzrost gęstości prądowej i spadek sprawności silnika przy zachowaniu tej samej masy miedzi.

Powyższe rozważania przemawiają na niekorzyść silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana i uzasadniają celowość stosowania z ekonomicznego punktu widzenia indukcyjnych silników jednofazowych z kondensatorem pracy.

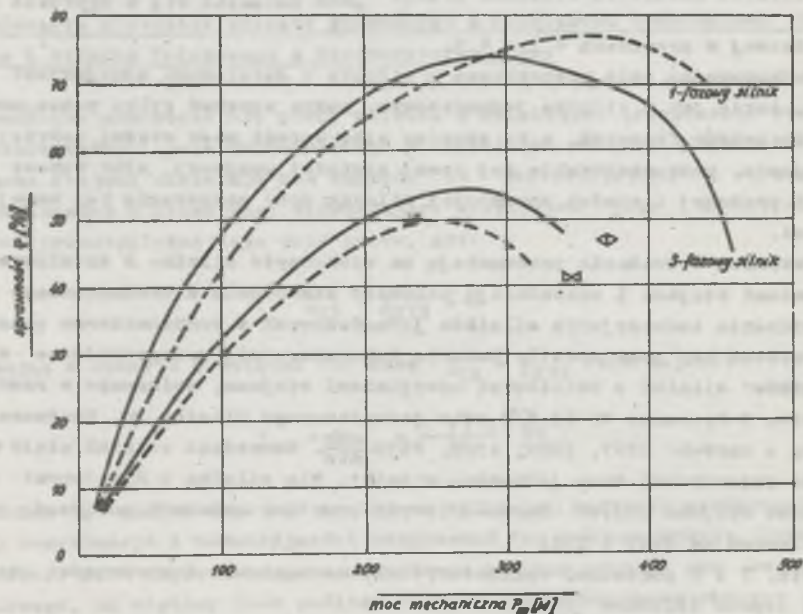
Wniosek ten potwierdziły badania laboratoryjne, przeprowadzone dla 3 silników: silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana, opisanego w rozdz. 2, silnika 3-fazowego Sf-63-2/B oraz jednofazowego silnika z kondensatorem pracy o danych: 220V, 50Hz, 250W, 2830 $\frac{\text{obr}}{\text{min}}$. Wszystkie silniki miały ten sam obwód magnetyczny oraz jednakowe wirniki. Dla silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana zdjęto charakterystyki przy obu układach połączeń, przedstawionych na rys. 1 i 2.

Na rys. 7 i 8 porównano charakterystyki mechaniczne i sprawności wszystkich trzech silników [2].

Przedstawione w patencie układy połączeń faz 3-fazowego silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana nie znajdują zastosowania w kraju. W Polsce,



Rys. 7. Charakterystyki mechaniczne 3-fazowego silnika, 1-fazowego silnika i silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana



Rys. 8. Charakterystyki sprawności 3-fazowego silnika, 1-fazowego silnika i silnika z dzielonymi uzwojeniami stojana

jak też w ogóle na kontynencie europejskim nie praktykuje się - tak jak to ma czasami miejsce w USA (np. przy zasilaniu gospodarstw rolnych) - doprowadzania energii elektrycznej do odbiorcy za pomocą przyłącza 2-fazowego z przewodem zerowym.

LITERATURA

- [1] Patent USA 10/6/76 nr 729891.
- [2] Broda J., Krzystek J.: Analiza obwodu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego z dzielonymi fazami stojana przy zasilaniu dwufazowym. Praca dyplomowa wykonana w Instytucie Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Pol. Sl. pod kierunkiem K. Kluszczyńskiego. Gliwice 1979.

Recenzent: doc. dr inż. Zdzisław Życki

Wpłynęło do Redakcji dn. 15.XII.1982 r.

СРАВНЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ДЕЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА И ОДНОФАЗНОГО
КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Р е з ю м е

Приведены результаты анализа трехфазного асинхронного двигателя с деленными обмотками статора, питаемого от двух фаз и нулевого провода трехфазной симметрической сети. Эксплуатационные свойства этого двигателя сравнены со свойствами однофазного конденсаторного двигателя.

THE COMPARISON OF THE THREE PHASE MOTOR WITH SPLIT STATOR
WINDINGS AND THE SINGLE PHASE INDUCTION CAPACITOR MOTOR

S u m m a r y

The results of an analysis of the three phase induction motor with split stator windings, supplied from two phases with neutral of a symmetrical three-phase network has been presented.

The properties of the three-phase induction motor with split stator windings and the single-phase capacitor motor have been compared.