

Roman MIKSIEWICZ\*, Andrzej WIECZOREK\*\*

## PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI UZWOJENIA JEDNOWARSTWOWEGO O UKŁADZIE POŁĄCZEŃ W GWIAZDĘ Z UKŁADEM MIESZANYM GWIAZDOWO - TRÓJKĄTOWYM

**Streszczenie.** W artykule porównano właściwości uzwojeń jednowarstwowych o układzie połączeń gwiazdowo-trójkątowym z konwencjonalnym uzwojeniem połączonym w gwiazdę. Dla trzech przykładowych uzwojeń obliczono rozkłady przestrzenne przepływów. Porównano widma harmonicznych przepływów dla obu typów uzwojeń stosując transformację FFT. Pokazano, że mieszany układ połączeń gwiazdowo-trójkątowy pozwala na redukcję niektórych harmonicznych przestrzennych biorących udział w generowaniu pasożytniczych momentów synchronicznych i asynchronicznych. Porównano wyniki badań silników prototypowych o mieszanych układach połączeń z silnikami produkowanymi o gwiazdowym układzie połączeń uzwojeń. Pokazano, że sprawność i niektóre parametry eksploatacyjne silników o mieszanym układzie połączeń uzwojeń są bardziej korzystne w stosunku do klasycznego uzwojenia połączonego w gwiazdę.

## COMPARISON OF STAR-CONNECTED AND MIXED STAR-DELTA CONNECTED SINGLE LAYER WINDING PROPERTIES

**Summary.** In the paper there are compared the properties of star connected and mixed star-delta single layer windings. For three exemplary windings there are calculated space distributions of ampere-turns. There are also compared space harmonic spectra of ampere-turns produced by the both types of windings using numerical procedure FFT. It is shown that the mixed star-delta connected winding allows reducing considerably some higher harmonics of the space distribution that can be of essential importance in generation of synchronous and asynchronous parasitic torques. The results of measurements of the manufactured motors with the star connected winding with those of prototype motors with the mixed star-delta connected winding are compared. They show that the efficiency of induction motors with the mixed winding is slightly increased and their performance parameters are better than those of induction motors with the star connected winding.

### 1. WSTĘP

W stojanach silników indukcyjnych powszechnego zastosowania niskiego napięcia o mocach do kilku kW stosuje się zwykle symetryczne uzwojenia jednowarstwowe o całkowitej liczbie zębów na biegun i fazę. Mają one, oprócz dużej zalety, jaką jest prosta technologia uzwarzania, istotną wadę – wytwarzają bowiem pełne spektrum harmonicznych przestrzennych nieparzystych  $v=p(6n\pm 1)$ . W przypadku symetrycznego uzwojenia 3-fazowego przy syme-

\* Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej

\*\* FSE Besel Brzeg

trycznym zasilaniu następuje eliminacja harmonicznych o rzędach  $v=3pn$  (gdzie:  $n$  - liczba całkowita,  $p$  - liczba par biegunów).

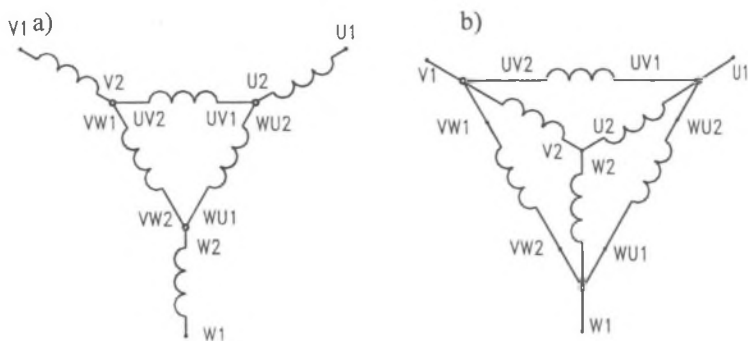
W pracach [1, 3] przedstawiono nowy typ uzwojenia 3-fazowego symetrycznego o mieszanym układzie połączeń uzwojeń gwiazdowo-trójkątowym, które wg autorów pozwala w znacznym stopniu zmniejszyć zawartość wyższych harmonicznych mających decydujące znaczenie przy wytwarzaniu pasożytniczych momentów asynchronicznych i synchronicznych. Wyniki badań i porównania przedstawione w [1, 3] pokazują również, że tego typu uzwojenie daje nieznaczne zwiększenie sprawności silnika i korzystniejsze inne jego parametry eksploatacyjne. Celem artykułu jest porównanie na wybranych przykładach właściwości uzwojeń konwencjonalnych jednowarstwowych połączonych w gwiazdę z uzwojeniami o mieszanym układzie połączeń, określenie możliwości ich zastosowania oraz porównanie wyników badań na silnikach prototypowych.

## 2. CECHY KONSTRUKCYJNE MIESZANEGO UKŁADU POŁĄCZEŃ UZWOJEŃ

W konwencjonalnym uzwojeniu jednowarstwowym najczęściej elektryczny kąt strefowy grupy cewkowej obejmuje  $60^\circ$ . W mieszanym układzie połączeń gwiazdowo-trójkątowym (rys. 1) część uzwojenia (należąca do danego pasma fazowego w uzwojeniu klasycznym) jest wydzielona i przesunięta przestrzennie w stosunku do podstawowego pasma fazowego. Jeżeli liczba żłobków na biegun i fazę  $q$  jest liczbą parzystą, to obydwie części uzwojeń o połączeniu w gwiazdę oraz połączeniu w trójkąt zajmują po  $30^\circ$ . Takie uzwojenie można uznać za quasi-12-fazowe. Jeżeli  $q$  jest liczbą nieparzystą – obydwie części uzwojenia zajmują różne kąty strefowe.

Części gwiazdowe i trójkątowe uzwojenia mieszanego mogą być połączone względem siebie szeregowo lub równoległe (rys.1). W połączeniu równoległym uzwojenia mieszanego (rys.1b), aby zachować symetrię uzwojenia stojana, efektywna liczba zwojów oraz przekroje przewodów w obu obwodach równoległych (obejmujących dwie części uzwojenia połączonego w gwiazdę i jedną część uzwojenia połączonego w trójkąt) muszą być takie same. Ponieważ średnice przewodów są znormalizowane oraz liczba zwojów w zezwojach jest liczbą całkowitą, praktycznie taki warunek jest to nie do zrealizowania. Przy jakiegokolwiek więc niesymetrii obejmującej samo uzwojenie stojana, jak również wirnik maszyny, w gałęziach uzwojeń połączonych równoległe (obejmujących dwa uzwojenia gwiazdy i jedno trójkąta) popłyną dodatkowe prądy, które eliminują tego typu połączenie z praktycznego punktu widzenia.

Przy projektowaniu uzwojenia mieszanego szeregowego (rys.1a) celem zachowania takiego samego napięcia, a więc równoważnej liczby zwojów obydwu uzwojeń, należy przyjąć  $\sqrt{3}$  razy więcej zwojów w zezwojach części trójkątowej uzwojenia w stosunku do gwiazdowej. Z drugiej strony, ponieważ prąd płynący w części trójkątowej uzwojenia jest  $\sqrt{3}$  razy mniejszy od gwiazdowej, wobec tego przekrój przewodu powinien być również mniejszy w takim stosunku. Reasumując, przy tak dobranych przewodach wypełnienie żłobka przewodu będzie takie samo w obydwóch częściach uzwojenia.



Rys. 1. Układy połączeń uzwojeń mieszanych gwiazdowo-trójkątowych: a) szeregowo, b) równoległe  
 Fig. 1. Diagrams of mixed star-delta windings connection: a) in series, b) in parallel

### 3. ANALIZA HARMONICZNA PRZEPŁYWÓW WYTWARZANYCH PRZEZ UZWOJENIA KONWENCJONALNE I W UKŁADZIE MIESZANYM

Dla trzech przykładowych uzwojeń jednowarstwowo-ych o liczbie żłobków  $Q$  i liczbie par biegunów  $p$ :

- $Q=24, p=1$ ;
- $Q=24, p=2$ ;
- $Q=36, p=3$ ,

podano schematy uzwojeń o układach połączeń w gwiazdę (rys. 2, 4, 6) oraz dla układów mieszanych gwiazdowo-trójkątowych (rys. 3, 5, 7). Dla rozważanych uzwojeń podano wyniki obliczeń rozkładów przestrzennych przepływów oraz przeprowadzono analizę zawartości harmonicznycch.

W obliczeniach założono, że uzwojenie jest skupione oraz szerokość otwarcia żłobków jest nieskończenie mała. Dla pojedynczego  $k$ -tego zezwoju o liczbie zwojów  $N_k$ , rozpiętości  $Y_k$  (licząc od żłobka  $Q_1$ ), przy przepływie prądu  $i_k$ , rozkład przestrzenny przepływu wytworzonego przez  $k$ -ty zezwój wynosi:

$$F_k(x) = \begin{cases} -i_k N_k \frac{Y_k}{Q}, & \text{dla } 0 \leq x \leq Q_1, \\ i_k N_k \frac{Q - Y_k}{Q}, & \text{dla } Q_1 \leq x \leq Q_1 + Y_k, \\ -i_k N_k \frac{Y_k}{Q}, & \text{dla } Q_1 + Y_k \leq x \leq Q. \end{cases} \quad (1)$$

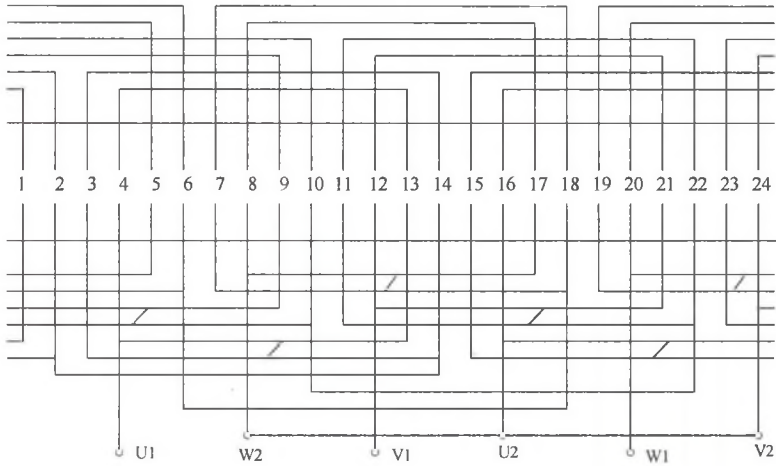
Przepływ wypadkowy uzwojenia stanowi sumę przepływów wytworzonych przez  $K$  zezwojów:

$$F_w(x) = \sum_{k=1}^K F_k(x). \quad (2)$$

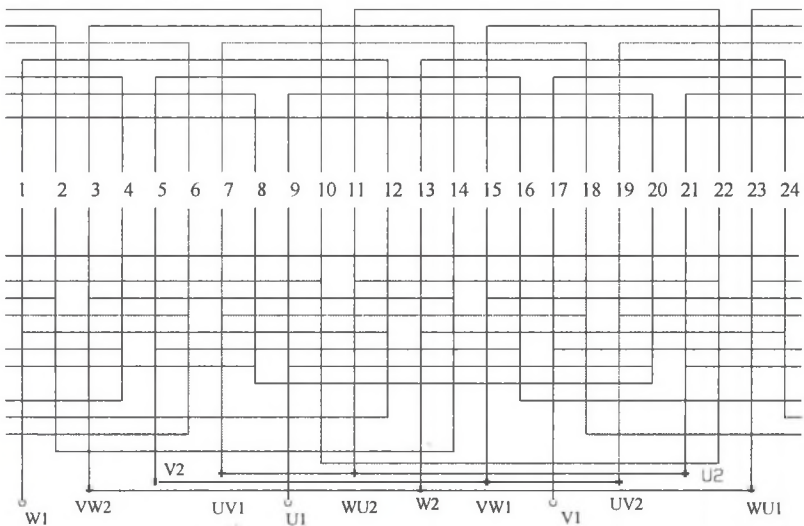
Na podstawie opracowanej obliczeniowej metody numerycznej [5] można wyznaczyć rozkłady przestrzenno-czasowe przepływu dla poszczególnych pasm uzwojeń oraz przepływu wypadkowego wykorzystując program Mathcad i następnie dokonać analizy zawartości harmonicznycch przestrzennycch stosując dodatkowo procedurę FFT tego programu. Dla założonych sinusoidalnych przebiegów czasowych prądów płynących przez uzwojenia:

$$\begin{aligned}
 i_U(t) &= I_m \sin(\omega t + \alpha), \\
 i_V(t) &= I_m \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right), \\
 i_W(t) &= I_m \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{4\pi}{3}\right),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

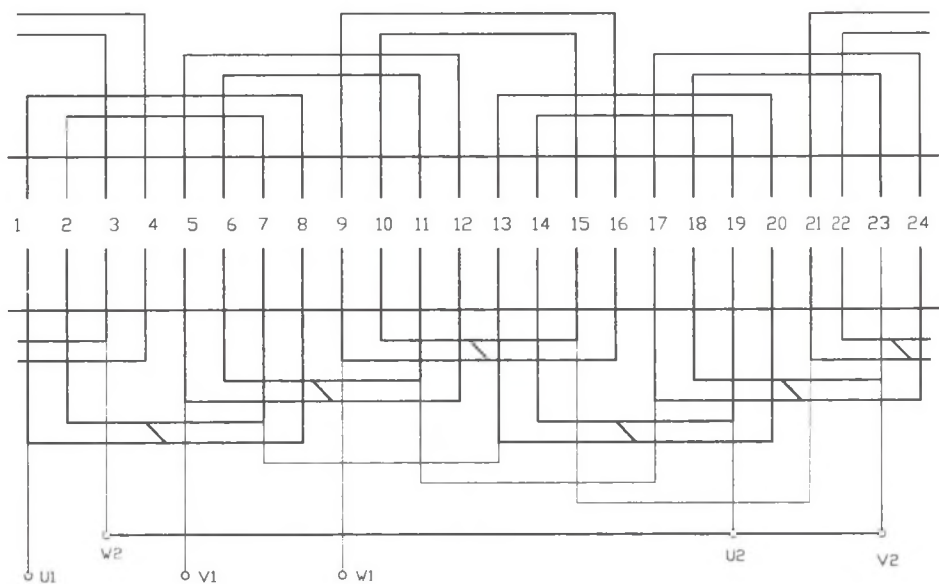
obliczono (dla zadanej chwili czasowej) przepływy dla uzwojeń z rys. 2-7. Wykresy przestrzenne tych przepływów w funkcji kolejnych żłobków Q przedstawiają rys. 8, 10, 12. Natomiast obliczone widma harmoniczných przestrzennych dla tych rozkładów przedstawiają odpowiednio rys. 9, 11, 13.



Rys. 2. Schemat uzwojenia jednowarstwowego o danych:  $Q=24$ ;  $p=1$ ;  $Y_1=11$ ;  $Y_2=9$   
 Fig. 2. Diagram of a single-layer winding of:  $Q=24$ ;  $p=1$ ;  $Y_1=11$ ;  $Y_2=9$

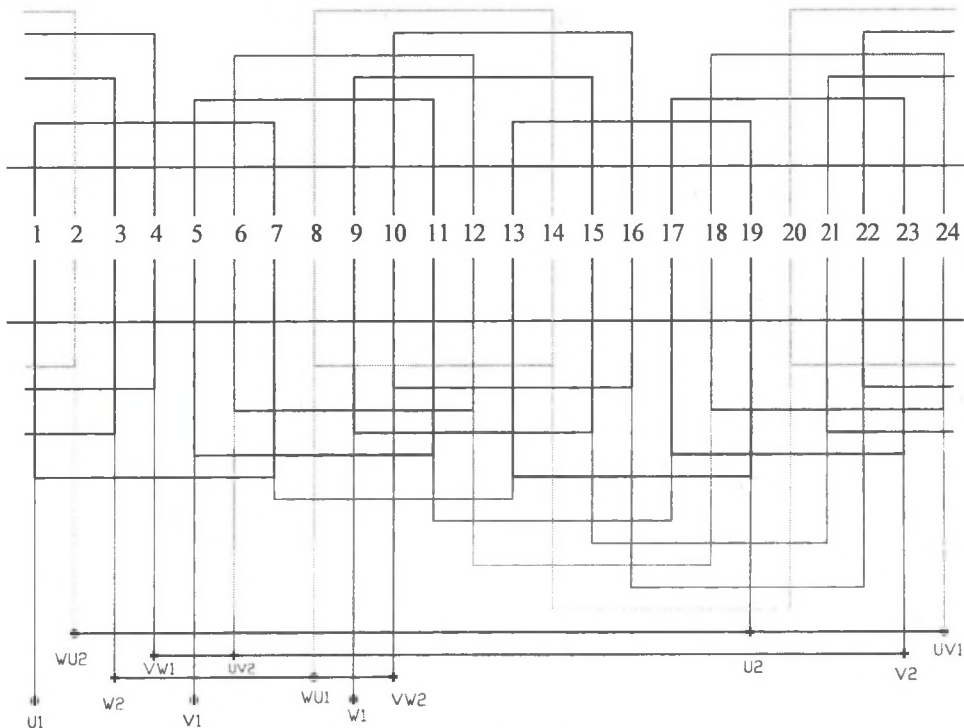


Rys. 3. Schemat uzwojenia jednowarstwowego o mieszanym gwiazdowo-trójkątowym układzie połączeń, o danych:  $Q=24$ ;  $p=1$ ;  $Y=11$   
 Fig. 3. Diagram of a single-layer winding with mixed star-delta connection of:  $Q=24$ ;  $p=1$ ;  $Y=11$



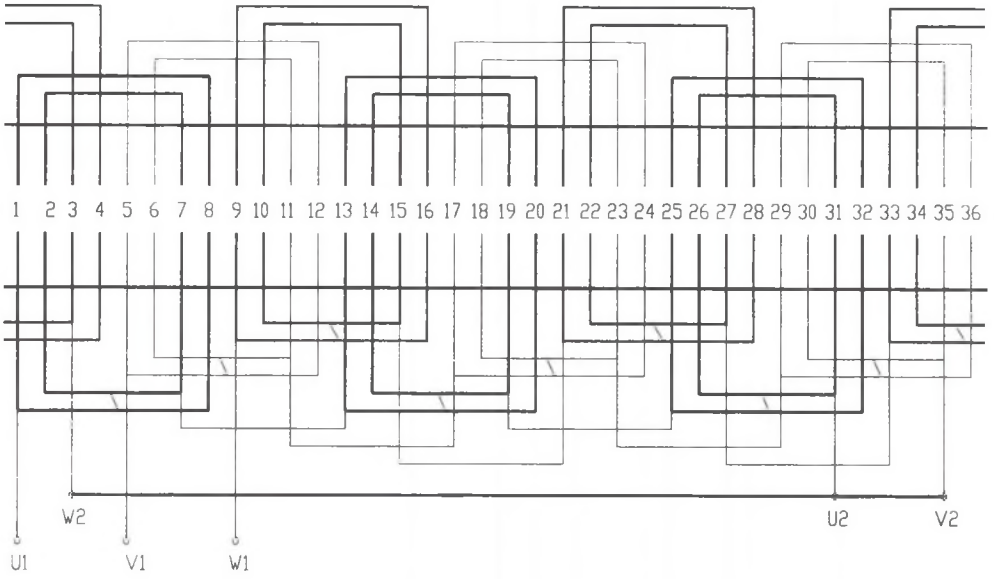
Rys. 4. Schemat fazowego uzwojenia jednowarstwowego o danych:  $Q=24$ ;  $p=2$ ;  $Y_1=7$ ;  $Y_2=5$

Fig. 4. Diagram of a single-layer winding of:  $Q=24$ ;  $p=2$ ;  $Y_1=7$ ;  $Y_2=5$

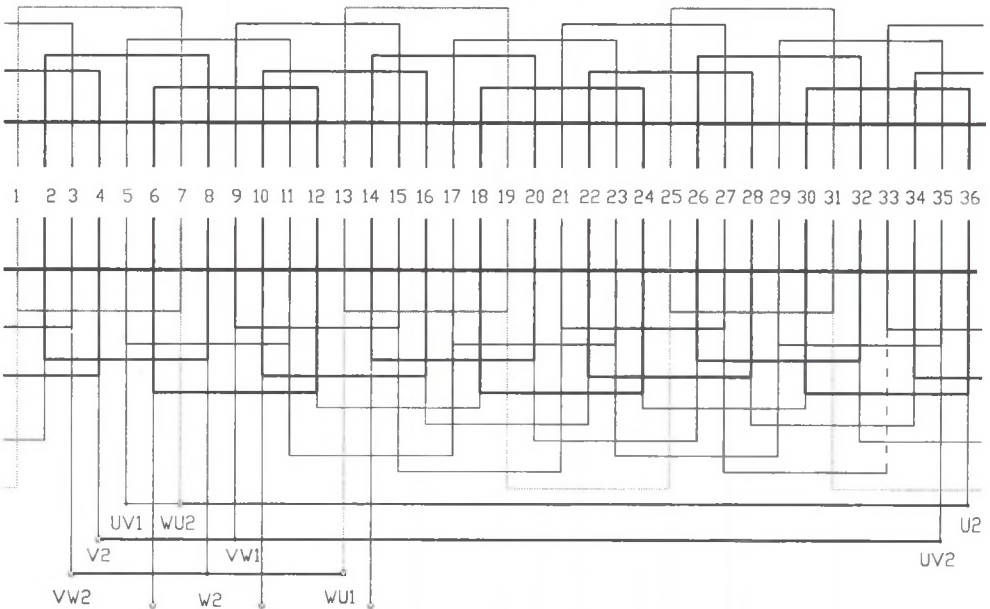


Rys. 5. Schemat uzwojenia jednowarstwowego o układzie połączeń mieszanym gwiazdo-trójkątowym o danych:  $Q=24$ ;  $p=2$ ;  $Y=6$

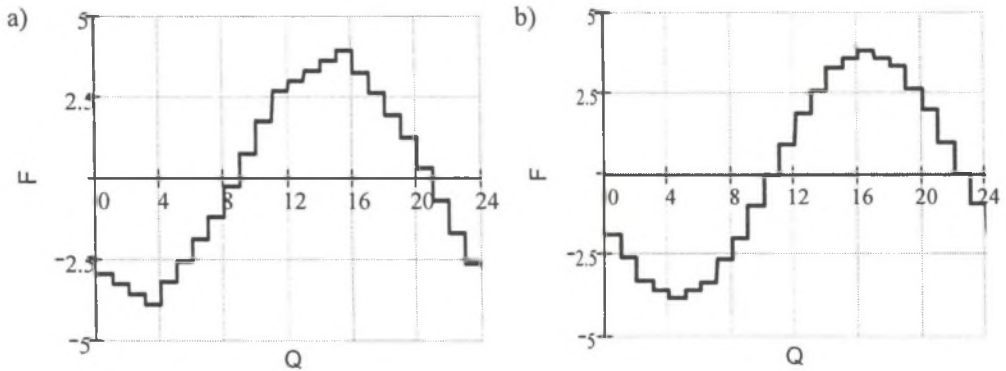
Fig. 5. Diagram of a single-layer winding with mixed star-delta connection of:  $Q=24$ ;  $p=2$ ;  $Y=6$



Rys. 6. Schemat fazowego uzwojenia jednowarstwowego o danych:  $Q=36$ ;  $p=3$ ;  $Y_1=7$ ;  $Y_2=5$   
 Fig. 6. Diagram of a single-layer winding of:  $Q=36$ ;  $p=3$ ;  $Y_1=7$ ;  $Y_2=5$

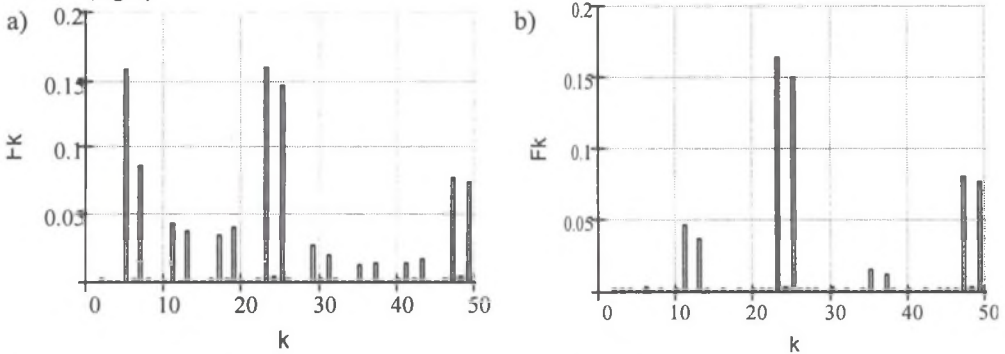


Rys. 7. Schemat uzwojenia jednowarstwowego o układzie połączeń mieszanym gwiazdowo-trójkątowym o danych:  $Q=36$ ;  $p=3$ ;  $Y_1=6$   
 Fig. 7. Diagram of a single-layer winding with mixed star-delta connection of:  $Q=36$ ;  $p=3$ ;  $Y_1=6$



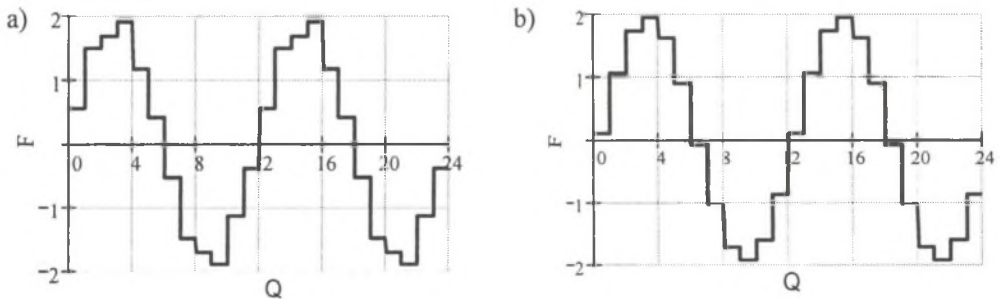
Rys. 8. Rozkłady przestrzenne przepływu dla uzwojenia  $Q=24$ ;  $p=1$ : a) klasycznego (rys. 2); b) gwiazdowo-trójkątego (rys. 3)

Fig. 8. Ampere-turns space distributions for the winding  $Q=24$ ;  $p=1$ : a) conventional (Fig. 2); b) star-delta (Fig. 3)



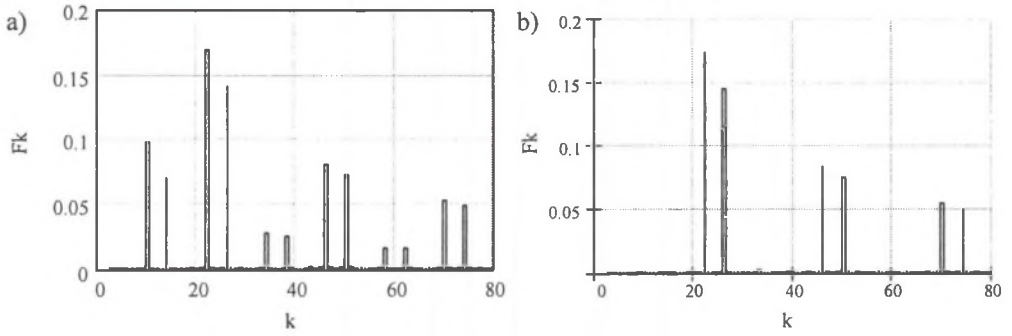
Rys. 9. Widma wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu dla uzwojenia  $Q=24$ ;  $p=1$ : a) klasycznego (rys. 2); b) gwiazdowo-trójkątego (rys. 3)

Fig. 9. Ampere-turns higher harmonic spectra for the winding  $Q=24$ ;  $p=1$ : a) conventional (Fig. 2); b) star-delta (Fig. 3)



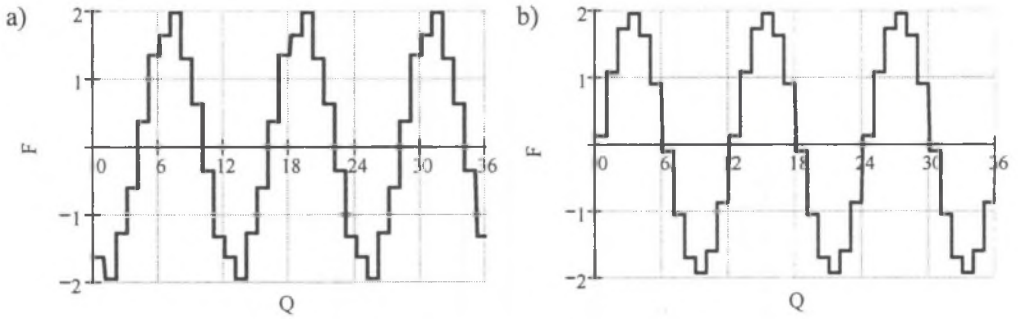
Rys. 10. Rozkłady przestrzenne przepływu wypadkowego dla uzwojenia  $Q=24$ ;  $p=2$ : a) klasycznego (rys. 4); b) gwiazdowo-trójkątego (rys. 5)

Fig. 10. Ampere-turns space distributions for the winding  $Q=24$ ;  $p=2$ : a) conventional (Fig. 4); b) star-delta (Fig. 5)



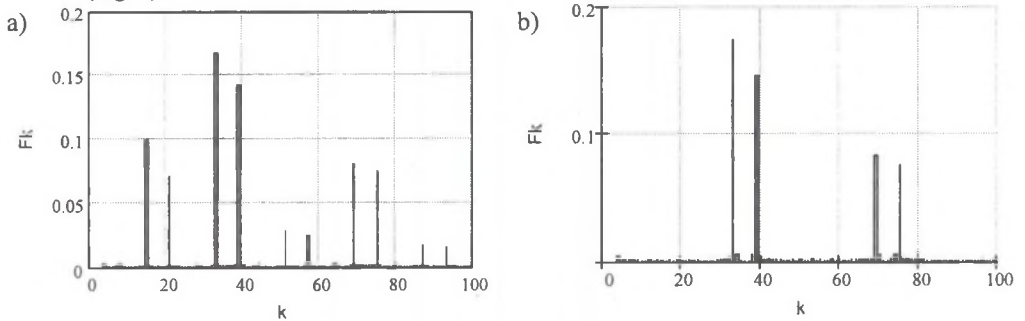
Rys. 11. Widma wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu dla uzwojenia  $Q=24$ ;  $p=2$ : a) klasycznego (rys. 4); b) gwiazdo-trójkątego (rys. 5)

Fig. 11. Ampere-turns higher harmonic spectra for the winding  $Q=24$ ;  $p=2$ : a) conventional (Fig. 4); b) star-delta (Fig. 5)



Rys. 12. Rozkłady przestrzenne przepływu wypadkowego dla uzwojenia  $Q=36$ ;  $p=3$ : a) klasycznego (rys. 6); b) gwiazdo-trójkątego (rys. 7)

Fig. 12. Ampere-turns space distributions for the winding  $Q=36$ ;  $p=3$ : a) conventional (Fig. 6); b) star-delta (Fig. 7)



Rys. 13. Widma wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu dla uzwojenia  $Q=36$ ;  $p=3$ : a) klasycznego (rys. 6); b) gwiazdo-trójkątego (rys. 7)

Fig. 13. Ampere-turns higher harmonic spectra for the winding  $Q=36$ ;  $p=3$ : a) conventional (Fig. 6); b) star-delta (Fig. 7)



Tabela 1  
Wyniki obliczeń harmoniczných przestrzenných  
dla  $Q=24$ ;  $p=1$

Rząd harmonicznęj	Układ połączeń	
	y	y- $\Delta$
$F_1$	3,658	3,787
$F_5/F_1$	0,043	0,00024
$F_7/F_1$	0,023	0,000306
$F_{23}/F_1$	0,0434	0,0435
$F_{25}/F_1$	0,040	0,040

tego wyniku, że dla tych przypadków harmoniczna główna w uzwojeniu mieszanym ma nieco większą wartość, natomiast praktycznie eliminowane są harmoniczne:  $5p$  i  $7p$ , a więc harmoniczne stosunkowo wysokiego rzędu wytwarzające znaczące pasożytnicze momenty asynchroniczne. Tym samym uzwojenie mieszane jednowarstwowo ma podobne właściwości jak uzwojenie dwuwarstwowo. Z porównania również wynika, że uzwojenia mieszane nie redukują harmoniczných żłobkowych:  $v=23, 25$  (dla uzwojenia:  $Q=24$ ;  $p=1$ );  $v=11p, 13p$  (dla uzwojenia:  $Q=24$ ;  $p=2$ ; oraz uzwojenia:  $Q=36$ ;  $p=3$ ).

Tabela 2

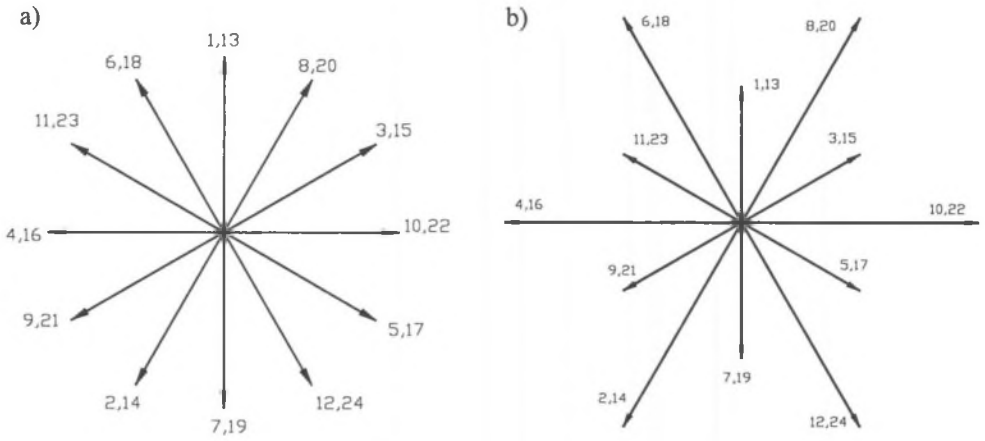
Wyniki obliczeń harmoniczných przestrzenných

Rząd harmonicznęj	$Q=24$ ; $p=2$		$Q=36$ ; $p=3$	
	Układ połączeń		Układ połączeń	
	y	y- $\Delta$	y	y- $\Delta$
$F_p$	1,844	1,910	1,845	1,909
$F_{5p}/F_p$	0,0535	0,000141	0,0992	0,00105
$F_{7p}/F_p$	0,0384	0,000157	0,0703	0,00104
$F_{11p}/F_p$	0,0914	0,0905	0,1674	0,174
$F_{13p}/F_p$	0,0764	0,0773	0,142	0,146

Potwierdzenie eliminacji  $5p$ -tej harmonicznęj przestrzennęj dla uzwojenia  $Q=24$ ;  $p=2$  pokazano również na wykresie wskazowym napięć (rys. 15b). Dla porównania, na rys. 15a przedstawiono napięcia dla  $5p$ -tej harmonicznęj dla konwencjonalnego układu połączeń w gwiazdę.

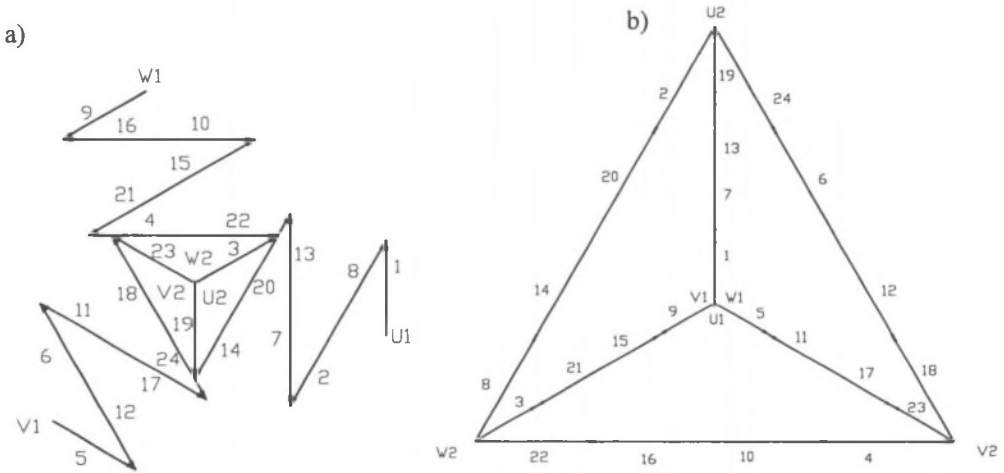
Dla rozważanych uzwojeń dokonano również analizy możliwości powstawania pasożytniczych momentów synchronicznych. W obliczeniach wzięto pod uwagę różne zalecane liczby żłobków wirnika [2], w zależności od przyjętych danych uzwojeniowych stojana. Wyniki tej analizy przedstawiają tabele 3, 4 i 5. Tabele te zawierają pary harmoniczných biorących udział w wytwarzaniu momentów synchronicznych ułożone w kolejności wartości wytwarzanych momentów oraz prędkości występowania momentów synchronicznych.

Na podstawie analizy wyników obliczeń można stwierdzić, że dla rozważanych przypadków uzwojeń i liczb żłobków wirnika w wytwarzaniu dominujących pasożytniczych momentów synchronicznych praktycznie nie biorą udziału eliminowane harmoniczne  $v=5p$  i  $v=7p$ , jednakże w większości przypadków mają pewien swój udział. Wynika więc z tego, że uzwojenia mieszane mają korzystne właściwości również i z powodu częściowej redukcji momentów synchronicznych.



Rys. 14. Wykresy wektorowe napięć żłbkowych dla 5p-tej harmonicznej uzwojenia  $Q=24$ ,  $p=2$ , dla układów połączeń: a) w gwiazdę (rys. 4), b) gwiazdowo-trójkątowe (rys. 5)

Fig. 14. Vector diagrams of slot voltages for 5p harmonic of the winding  $Q=24$ ,  $p=2$ , for connections: a) in star (Fig. 4), b) in star-delta (Fig. 5)



Rys. 15. Wykresy wektorowe napięć fazowych dla 5p-tej harmonicznej uzwojenia  $Q=24$ ,  $p=2$ , układu połączeń: a) w gwiazdę (rys. 4), b) gwiazdowo-trójkątowe (rys. 5)

Fig. 15. Phasor diagrams of voltages for 5p harmonic of the winding  $Q=24$ ,  $p=2$ , for connections: a) in star (Fig. 4), b) in star-delta (Fig. 5)

Tabela 3

Prędkości momentów synchronicznych oraz pary harmoniczných wytwarzających momenty dla różnych żłobków wirnika oraz danych stojana:  $Q_s=24$ ;  $p=1$

Liczba żłobków wirnika	Prędkość dla momentu synchronicznego, obr/min	Para harmoniczných wytwarzających moment synchroniczny
16	-375	(1-17); (5-21)
	187,5	(1-31)
	0	(1-49); (1-47)
17	-176,5	(11-23); (5-29); (1-35)
	88,2	(1-67)
18	0	(1-19); (1-17); (5-23)
20	300	(1-19); (5-25)
	-150	(7-47)
22	-272,7	(1-23)
	136,4	(1-43); (5-49)
26	230,8	(1-25)

Tabela 4

Prędkości momentów synchronicznych oraz pary harmoniczných wytwarzających momenty dla różnych żłobków wirnika oraz danych stojana:  $Q_s=24$ ;  $p=2$

Liczba żłobków wirnika	Prędkość dla momentu synchronicznego, obr/min	Para harmoniczných wytwarzających moment synchroniczny
17	-88,2	(2-70); (22-46)
18	0	(2-38); (2-34); (2-74); (2-70); (10-46); (26-46)
19	78,9	(2-74); (26-50)
	-300	(2-22)
20	150	(2-38); (14-26); (22-62)
	-75	(2-82); (22-58)
	60	(2-98)
21	0	(2-86); (10-74); (2-82)
22	-136,4	(2-46); (10-34)
	68,2	(2-86); (10-98)
26	115,4	(2-50); (14-38)
	214,3	(2-26); (10-38); (22-50)
28	-107,1	(10-46); (2-58); (22-34)

Tabela 5

Prędkości momentów synchronicznych oraz pary harmoniczných wytwarzających momenty dla różnych żłobków wirnika oraz danych stojana:  $Q_s=36$ ;  $p=3$

Liczba żłobków wirnika	Prędkość dla momentu synchronicznego, obr/min	Para harmoniczných wytwarzających moment synchroniczny
28	-71,4	(15-69); (3-87)
	-200	(3-33)
30	100	(3-57); (21-39); (33-93)
	-50	(33-87)
	0	(3-93); (3-87); (21-69)
32	62,5	(3-93); (21-75);
33	-90,9	(3-69);
39	76,9	(3-75); (21-57); (15-93)

#### 4. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Dla silników 3-fazowych klatkowych o wzniosie 80 mm i danych stojana:  $Q_s=24$ ,  $p=1$  oraz  $Q_s=24$ ,  $p=2$  zaprojektowano mieszane uzwojenia gwiazdowo-trójkątowe bazujące na danych uzwojeniowych silników produkowanych seryjnie. Części uzwojeń połączonych w gwiazdę pozostały bez zmian, przeprojektowano natomiast części uzwojeń połączonych w trójkąt. Wyniki badań podstawowych parametrów eksploatacyjnych silników fabrycznych i prototypowych zawierają tabele 6 i 7. Wynika z nich, że wszystkie parametry eksploatacyjne silników prototypowych z uzwojeniami mieszanymi są bardziej korzystne w stosunku do silników produkowanych seryjnie. Ponieważ w przypadku silnika  $Q_s=24$ ,  $p=1$  wirnik ma  $Q_r=17$  oraz żłobki zamknięte, nie powstają pasożytnicze momenty synchroniczne. Ponadto nawet przy częściowo otwartych żłobkach dla tej kombinacji żłobków stojana i wirnika (jak wynika z tabeli 3) momenty te osiągają niewielkie wartości.

Dla silnika  $Q_s=24$ ,  $p=2$  wirnik ma  $Q_r=18$ . Decydujący udział w powstawaniu momentów synchronicznych ma podstawowa harmoniczna. Również i w tym przypadku nie należy się spodziewać istotnego wpływu uzwojenia mieszanego na momenty synchroniczne.

Tabela 6

Porównanie parametrów silnika o mocy  $P=750$  W;  $U=400$  V;  $p=1$

Wielkość	Jednostka	Silnik fabryczny Połączenie: $y$	Silnik prototypowy Połączenie: $y-\Delta$
Prąd znamionowy	A	1,73	1,69
Sprawność	%	76,6	76,9
Współczynnik mocy	-	0,818	0,833
Przeciążalność momentem	-	2,60	2,70
Krotność momentu rozruchowego	-	2,72±2,88	2,85±2,93
Krotność prądu rozruchowego	-	4,24	4,62
Przyrost temperatury uzwojeń	K	65,3	58,2
Moc pobierana w stanie jałowym	W	150,8	110,3
Prąd stanu jałowego	A	1,14	1,01

Tabela 7

Porównanie parametrów silnika o mocy  $P=550$  W;  $U=400$  V;  $p=2$

Wielkość	Jednostka	Silnik fabryczny Połączenie: $y$	Silnik prototypowy Połączenie: $y-\Delta$
Prąd znamionowy	A	1,66	1,61
Sprawność	%	68,0	70,6
Współczynnik mocy	-	0,701	0,699
Przeciążalność momentem	-	3,76	3,76
Krotność momentu rozruchowego	-	1,97±2,10	1,94±2,10
Krotność prądu rozruchowego	-	3,65	3,58
Przyrost temperatury uzwojeń	K	84,8	74,4
Moc pobierana w stanie jałowym	W	150,0	113,4
Prąd stanu jałowego	A	1,41	1,00

#### 5. WNIOSKI

Wyniki obliczeń wykazują, że w rozważanych przypadkach uzwojenia jednowarstwowe o mieszanym układzie połączeń eliminują wyższe harmoniczne przepływu stosunkowo wysokie-

go rzędu: 5p i 7p, spełniają więc funkcję uzwojeń dwuwarstwowych. Równocześnie nieco większe są wartości przepływu dla harmonicznej podstawowej. Oznacza to, że współczynnik uzwojenia jest nieco większy dla harmonicznej podstawowej. Eliminowanie wymienionych wyższych harmonicznych przestrzennych redukuje niektóre pasożytnicze momenty asynchroniczne oraz w pewnym stopniu zmniejsza momenty synchroniczne.

Badania wykonane dla silników prototypowych z mieszanym układem połączeń potwierdziły bardziej korzystne parametry eksploatacyjne dla tych silników w porównaniu do silników z uzwojeniem konwencjonalnym połączonym w gwiazdę.

Technologia wykonania uzwojenia mieszanego nie odbiega od technologii uzwojenia jednowarstwowego, wymaga jednak uzwajania dwóch różnych typów cewek. Prostsze w stosunku do uzwojenia dwuwarstwowego uzwojenie mieszane wymaga ponadto dodatkowych połączeń cewek, co może zmniejszyć niezawodność silnika.

Biorąc pod uwagę technologię wykonania oraz korzystne właściwości elektryczne silników z uzwojeniem mieszanym w stojanie, można je z powodzeniem stosować w silnikach indukcyjnych niskiego napięcia.

#### LITERATURA

1. Chen J. Y., Chen C. Z.: Investigation of a new AC electrical machine winding. IEE Proceedings Electrical Power Applications, vol.145, No 2, March 1998, p.125-132.
2. Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1988.
3. Hughes A.: New 3-phase winding of low m.m.f. - harmonic content. Proceedings IEE, vol.117, No 8, August 1970, p.1657-1666.
4. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Momenty pasożytnicze w indukcyjnych silnikach klatkowych. Prace Sekcji Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Komitetu Elektrotechniki PAN, t. I. PTETiS, Warszawa - Gliwice 1993.
5. Miksiewicz R.: Maszyny elektryczne. Zagadnienia obliczeniowe z wykorzystaniem programu Mathcad. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
6. Miksiewicz R., Wieczorek A.: Porównanie właściwości uzwojenia jednowarstwowego o układzie połączeń w gwiazdę z układem mieszanym gwiazdowo – trójkątowym. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe Nr 66, 2003. BOBRME KOMEL, Katowice maj 2003, s. 147-152.
7. Wach P.: Uzwojenia ułamkowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1997.

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Zawilak  
Profesor Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 grudnia 2003 r.

#### Abstract

In the paper there are compared the properties of star connected and mixed star-delta single layer windings. In the latter ones the star winding component is separated and shifted in space in relation to the delta component. For this type of winding there are presented possibilities of winding series or parallel connection (Fig.1).

For three exemplary windings there are presented diagrams of: conventional in star (Figs 2,4,6) and mixed star-delta connections (Figs. 3, 4, 7). For these windings there are calculated the space distributions of ampere-turns (Figs. 8, 10, 12). There are also compared space harmonic spectra produced by the both types of windings (Figs. 9, 11, 13 and Tables 1, 2) using numerical procedure FFT. It is shown that the

mixed star-delta connected winding allows reducing considerably some higher harmonics of the space distribution that can be of essential importance in generation of synchronous and asynchronous parasitic torques. Tables 3, 4, 5 which contain the rotating speeds of synchronous torque occurrence and the harmonics generating these torques for different number of the rotor slots.

The results of measurements of the manufactured motors with the star connected winding with those of the prototype motors with the mixed star-delta connected winding are compared in Tables 6 and 7. They show that the efficiency of an induction motor with the mixed winding is slightly increased and its performance parameters are better than those of an induction motor with star connected winding.