

SANIAWA Dionizy<sup>1</sup>

## Napędy z wielofazowymi silnikami indukcyjnymi

*Silnik indukcyjny, wielofazowy, napędy, właściwości.*

### Streszczenie

Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z przemienników częstotliwości znalazły zastosowanie w przemyśle, trakcji i w gospodarstwach domowych, dzięki ich niewątpliwym zaletom.

Obecnie wiele ośrodków pracuje nad sposobami ograniczenia negatywnych zjawisk występujących przy zasilaniu z przemiennika częstotliwości. W przedstawionym artykule zostały zaprezentowane sposoby prowadzące do tego celu.

Największe korzyści z zastosowania silników wielofazowych to:

- ograniczenie wyższych harmonicznych,
- zwiększenie momentu napędowego,
- zwiększenie zakresu regulacji prędkości obrotowej.

### MULTIPHASE INDUCTION MACHINE DRIVES

### Abstract

Driving systems with induction motor supplied by frequency converters have been applied to industry, electric traction and households thanks to their undoubted advantages. Nowadays many centres are working on reduction of negative effects of using power converters as well as on increase of efficiency of these driving systems. In the following paper the ideas connected with this direction is presented. The most important advantages with use of high-phase engine this: elevation of limitation higher harmonic, efficiencies of engine of driving moment and enlargement the range of control of rotational speed.








### 1. WSTĘP

Układowi napędowym stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące między innymi: niezawodności pracy, wysokiej sprawności, kształtu charakterystyki mechanicznej, przystosowania do zasilania z przemiennika częstotliwości. Dotychczasowe prace badawcze wskazują, że wiele z tych wymagań mogą spełnić silniki wielofazowe.

### 2. PORÓWNANIE WŁASNOŚCI SILNIKÓW WIAŁOFAZOWYCH Z SILNIKAMI TRÓJFAZOWYMI








W literaturze spotykane są przykłady analizy właściwości silników wielofazowych [2,3,4,7]. Możliwe układy silników wielofazowych podane zostały w tabeli 1 i 2.

Tab.1. Rodzaje uzwojeń maszyn wielofazowych o liczbie faz stojana będącej wielokrotnością  $\nu=3$

Liczba faz	3	6	9	6	12	9	18
Nazwa połączenia	3 -fazowe	6 -fazowe	9 -fazowe	Pół 12 fazowe	12 -fazowe	Pół 18 fazowe	18 -fazowe
Schemat połączenia uzwojeń stojana							

<sup>1</sup>d.saniawa@pr.radom.pl

Tab. 2. Rodzaje uzwojeń maszyn wielofazowych o liczbie faz stojana nie będącej wielokrotnością  $v=3$

Kąt przesunięcia uzw.	90°	90°	45°	45°	36°	25,71°	18°
Liczba faz	2	4	5	8	5	7	10
Nazwa połączenia	Pół 4 lub 2-fazowe	4 - fazowe	Pół 8 - fazowe	8 - fazowe	5 - fazowe	7 - fazowe	10-fazowe
Schemat połączenia uzwojeń stojana							

Najbardziej rozpowszechnione spośród układów wielofazowych są silniki 6 i 9 fazowe, ponieważ można wykorzystać istniejące rdzenie silników trójfazowych [2,7]. Wirniki silników wielofazowych mają konstrukcję identyczną do silników trójfazowych, nie ma zatem konieczności projektowania tych silników od podstaw.

Cechami wspólnymi silników wielofazowych w porównaniu z silnikami tradycyjnymi jest:

- zwiększenie niezawodności układu napędowego. Możliwy jest rozruch i kontynuacja pracy przy braku jednej a nawet kilku fazach zasilających silnik. Przy takiej pracy pojawia się jednak asymetria w zasilaniu i rozkładzie pola magnetycznego, rosną prądy fazowe, zwiększa się poślizg a więc i prądy wirnika. Wkonsekwencji tych zjawisk zmniejsza się moment na wale i zwiększają się straty [2,7,8,19],
- rozdzielenie prądów fazowych klasycznego silnika na co najmniej dwie gałęzie przewodzące połowę lub mniej prądu, co pozwala zwiększyć całkowitą moc silnika. Inną metodą na zmniejszenie prądu może być zwiększenie napięcia zasilającego, co w wielu przypadkach jest niemożliwe [1,7],
- maszyny indukcyjne przy małych prędkościach obrotowych pracują jak silniki krokowe. Badania porównawcze przy małych prędkościach pokazały, że w przypadku silników 3 - fazowych obserwowano skokową pracę wirnika z chwilowymi prędkościami bliskimi zeru. Silniki 6 – fazowe poruszały się bez chwilowych zatrzymań a liczba pulsacji była dwukrotnie większa niż w 3 fazowych [2, 19],
- obniżenie hałasu układu napędowego [2,19].

Analizowana literatura podaje, że przedstawione właściwości spowodowane są lepszym wykorzystaniem obwodu magnetycznego [2,7,19]. Z uwagi na większą liczbę faz rozkład pola magnetycznego dla podstawowej harmonicznej w szczelinie staje się mniej odkształcony i równomierny, a więc wpływa na zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych. Podstawowa harmoniczna przestrzenna pola magnetycznego zwiększa się w stosunku do silników klasycznych, a jednocześnie zmniejszają się lokalne nasycenia obwodu magnetycznego [8.18].

Oprócz zamieszczonych układów spotykane są również silniki z dwoma trójfazowymi rozdzielonymi galwanicznie uzwojeniami stojana [1,6,10,11,15,16]. Można rozróżnić uzwojenia symetryczne z przesunięciem uzwojeń o kąt 60° (są one identyczne w budowie z silnikami trójfazowymi o dwóch gałęziach równoległych) i niesymetryczne o przesunięciu 30°.

Podstawowymi właściwościami tych układów są:

- rozrzedzenie widma harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego w szczelinie przywirnikowej,
- zmniejszenie strat w klatce wirnika,
- znikają składowe przestrzenne rozkładu pola magnetycznego  $v=3, 9, 15, 21$ ,
- zwiększa się stromość charakterystyki mechanicznej silnika.

W pracy [9] opisany został silnik sześciofazowy o szczególnym sposobie zasilania. Jedno z rozdzielonych galwanicznie uzwojeń trójfazowych zasilane jest napięciem tak odkształconym, że do układu „wstrzykiwana” jest trzecia harmoniczna prądu. Przy standardowym zasilaniu drugiego uzwojenia uzyskuje się efekt kompensacji niektórych harmonicznych rozkładu pola magnetycznego.

Literatura podaje również przykłady takiego sposobu zasilania silników o dwóch uzwojeniach stojana, aby uzyskać silnik o zmiennej liczbie par biegunów (np.: 2 i 4 biegunowy)[11,12]. Zmiana liczby par biegunów nie odbywa się poprzez przełączanie uzwojeń, ale poprzez odpowiednie kształtowanie prądów przez klucze tranzystorowe. Takie rozwiązanie pozwala na zmniejszenie strat przy małych prędkościach obrotowych (zasilanie dające silnik 4 biegunowy) i znaczne wydłużenie drugiej strefy regulacji (zasilanie dające silnik 2 biegunowy). Nie da się jednak zoptymalizować obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego dla obydwu przypadków zasilania. Wadą układu będzie podniesienie strat magnetycznych silnika i złe wykorzystanie obwodu magnetycznego silnika.

Odrębną grupę silników wielofazowych stanowią maszyny o dwóch rozdzielonych obwodach magnetycznych stojana [14]. Rozdzielenie magnetyczne wykonywane jest poprzez wytworzenie dwóch oddalonych od siebie geometrycznie

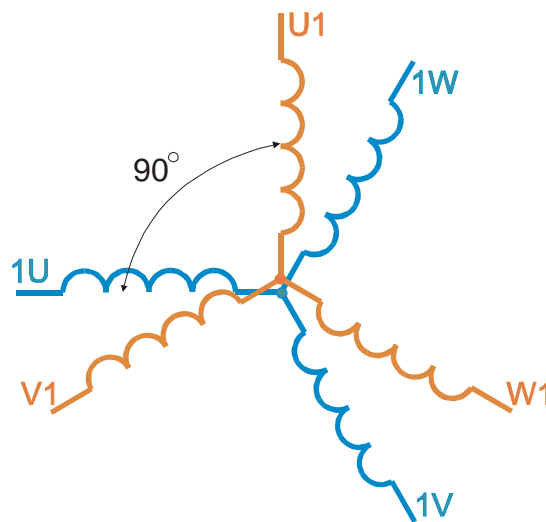
stojanów. Osie fazowe tych uzwojeń są położone w różnych płaszczyznach. Niestety taka konstrukcja znacząco zwiększa długości silnika[14].

### 3. UKŁAD NAPĘDOWY Z SILNIKIEM DWUUKŁADOWYM

Na Wydziale Transportu i Elektrotechniki Politechniki Radomskiej od wielu lat badany silnik sześciofazowy (silnik dwuukładowy). Badany silnik dwuukładowy jest próbą ograniczenia problemów związanych z zastosowaniem przekształtników do zasilania silnika indukcyjnego.

#### 3.1. Opis silnika

Idea rozwiązania opiera się na zastąpieniu uzwojenia silnika dwoma uzwojeniami przesuniętymi względem siebie w przestrzeni o kąt elektryczny  $90^\circ$ . Każde z uzwojeń ma przewodzić połowę prądu uzwojenia tradycyjnego. Aby strumień magnetyczny w silniku nie uległ zmniejszeniu w porównaniu z rozwiązaniem klasycznym, napięcia zasilające każdego z uzwojeń powinny zostać odpowiednio przesunięte do siebie w czasie o kąt  $-90^\circ$ . Takie rozwiązanie daje geometryczne sumowanie się prądów zasilających silnik, przy algebraicznym dodawaniu strumieni magnetycznych w szczeliny powietrznej maszyny. W obu przypadkach strumień w silniku pozostaje bez zmian, a więc i moment na wale się nie zmienia przy tej samej wartości prądu, jednocześnie poszczególne harmoniczne prądu dodają się geometrycznie. W idealnych warunkach poszczególne harmoniczne prądu powinny być o  $\sqrt{2}$  mniejsze w porównaniu z silnikiem tradycyjnym.



Rys.1. Schemat rozmieszczenia uzwojeń silnika

Kolejnym oczekiwanym zjawiskiem w silniku dwuukładowym jest przekazywanie mocy pomiędzy uzwojeniami, co powinno spowodować zmniejszenie zapotrzebowania na moc bierną. Ponieważ kondensator w obwodzie pośredniczącym przemiennika pełni rolę bufora energii biernej, w przemienniku zasilającym silnik dwuukładowy będzie można zmniejszyć pojemność kondensatora. Jeśli spojrzeć na kondensator jako na źródło zniekształceń prądu sieci, to jego zmniejszenie niesie korzyści w ograniczaniu zakłóceń w sieci.[16]

Można również wykazać, że przy przesunięciu o kąt  $90^\circ$  znoszą się harmoniczne strumienia kolejności przeciwnej w strumieniu maszyny [11].

Strumień magnetyczny wytwarzany przez pierwsze uzwojenie ma wartość:

$$\begin{aligned} \Phi(t)_I &= \Phi_{AI}(\omega t) + a^2 \Phi_{BI} \left( \omega t - \frac{2\Pi}{3} \right) + a \Phi_{CI} \left( \omega t + \frac{2\Pi}{3} \right) = \\ &= \Phi_m \left[ \sin(\omega t) + a^2 \sin \left( \omega t - \frac{2\Pi}{3} \right) + a \sin \left( \omega t + \frac{2\Pi}{3} \right) \right] = j \frac{3}{2} \Phi_{mI} e^{-j\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

A wektor strumienia magnetycznego wytwarzany przez drugi układ uzwojeń można uzyskać z zależności:

$$\begin{aligned}
 \Phi(t)_{II} &= \Phi_{AII} \left( \omega + \frac{\pi}{2} \right) e^{+j\frac{\pi}{2}} + a^2 e^{+j\frac{\pi}{2}} \Phi_{BII} \left( \omega - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right) + a e^{+j\frac{\pi}{2}} \Phi_{CII} \left( \omega + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right) = \\
 &= \Phi_m e^{+j\frac{\pi}{2}} \left[ \sin \left( \omega + \frac{\pi}{2} \right) + a^2 \sin \left( \omega - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right) + a \sin \left( \omega + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right) \right] = \\
 &= \frac{3}{2} \Phi_{mI} e^{j\frac{\pi}{2}} j e^{-j \left( \omega + \frac{\pi}{2} \right)} = j \frac{3}{2} \Phi_{mI} e^{-j\omega}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Całkowity strumień w silniku dla pierwszej harmonicznej równa się sumie wektorów strumieni magnetycznych wytwarzanych przez pierwszy i drugi układ uzwojeń:

$$\Phi(t) = \Phi_I + \Phi_{II} = 2j\Phi_{mI} e^{-j\omega} \tag{3}$$

Można wykazać, że wypadkowe strumienie składowych kolejności przeciwnej w silniku będą się równać zero. W silniku dwuukładowym nastąpi kompensacja strumieni i momentów harmonicznych kolejności przeciwnej (tj.: 4, 7, 10, itd.).

#### 4. BADANIA LABORATORYJNE

Silnik wykonano w oparciu o maszynę katalogową o mocy 2,2 [kW] o dwóch parach biegunów. Moc silnika została dobrana z uwagi na możliwości badawcze, liczba par biegunów z uwagi na najczęstsze zastosowanie w przemyśle. Konstrukcja silnika nie uległa żadnym poważnym zmianom. W sposób szczególny wykonano tylko uzwojenie stojana. Fabryczne uzwojenie stojana zostało nawinięte przewodem o przekroju dwukrotnie mniejszym od katalogowego, a następnie nawinięto drugie identyczne uzwojenie, ale zostało przesunięte w przestrzeni w stosunku do pierwszego o kąt 80°. Optymalne przesunięcie uzwojeń wynosi 90°. Z uwagi jednak na określoną liczbę żłobków stojana uzyskanie takiego kąta dla tego silnika było niemożliwe.

Przedstawiony układ napędowy poddano badaniom laboratoryjnym. Eksperyment został wykonany dla dwóch układów zasilania:

- a) Zasilanie z generatora synchronicznego – przesunięcie napięć uzyskano wykorzystując regulator indukcyjny.
- b) Zasilanie z przemiennika częstotliwości o specjalnej konstrukcji.

##### 4.1. Badania przy zasilaniu sinusoidalnym

Silnik klasyczny i dwuukładowy został poddany badaniom odpowiednio dla częstotliwości napięcia zasilającego  $f=15\text{Hz}$  i  $f=50\text{Hz}$  w następujących stanach:

- zwarcia
- jałowym
- obciążenia

Dla silnika dwuukładowego badania wykonano przy pracującym jednym i dwóch uzwojeniach

Wyniki pomiarów dla silnika dwuukładowego były zawsze porównywane z analogicznymi wynikami dla silnika klasycznego. Należy nadmienić, że parametry silnika dwuukładowego przy pomiarze jego jednego uzwojenia nie różniły się w zasadzie (z wyjątkiem rezystancji stojana) od parametrów silnika klasycznego.

#### 5. WŁASNOŚCI SILNIKA DWUUKŁADOWEGO

Uzwojenia stojana w silniku dwuukładowym wykonane są jako dwuwarstwowe. Dzięki temu zezwoje należące do różnych pasm fazowych leżą w jednym żłobku i sprzęgają się ze sobą nie tylko przez strumień główny, lecz także przez strumień rozproszenia żłobkowego. Dzięki temu następuje zmniejszenie reaktancji rozproszenia żłobkowego. Badania eksperymentalne pokazały, że silnik dwuukładowy cechuje się mniejszą impedancją zwarcia niż silnik klasyczny.

Analiza modelu matematycznego silnika dwuukładowego pozwala na zastąpienie silnika z przesunięciem uzwojeń o kąt 90° schematem transformatorowym, analogicznym do silnika klasycznego z tym, że jego reaktancja rozproszenia stojana jest mniejsza niż silnika klasycznego. Dlatego też do oceny własności silnika dwuukładowego można stosować zależności analogiczne jak dla silnika klasycznego [7] a więc:

$$M = \frac{pm_1U_1^2}{2\pi f_1 \left( \left( R_1 + \sigma_1 \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + \sigma_1 X_2')^2 \right)} \cdot \frac{R_2'}{s} \quad (4)$$

$$M_m = \frac{pm_1U_1^2}{4\pi f_1 \sigma_1 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + \sigma_1 X_2')^2} \right)} \quad (5)$$

$$s_m = \frac{\sigma_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + \sigma_1 X_2')^2}} \quad (6)$$

gdzie: M – moment elektromagnetyczny,

$M_m$ - maksymalny elektromagnetyczny moment obrotowy,

$m_1$ - liczba faz silnika,  $f_1$ - częstotliwość napięcia zasilającego,

$U_1$ - napięcie zasilające uzwojenia stojana,

$R_1$ - rezystancja uzwojenia stojana,

$R_2'$  – rezystancja uzwojeń wirnika sprowadzona do stojana

$X_1$ - reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana,

$X_2'$  – reaktancja rozproszenia uzwojeń wirnika sprowadzona do stojana

$\sigma_1$  - współczynnik rozproszenia strumienia stojana,

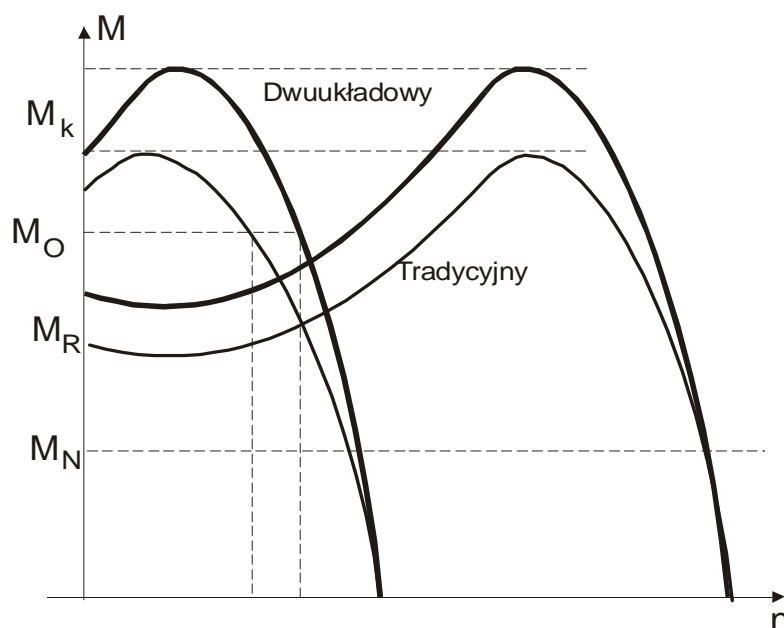
$f_1$ - częstotliwość napięcia zasilającego

$p$  – liczba par biegunów

$s$  – poślizg

$s_m$  – poślizg krytyczny

Zmniejszenie zastępczej reaktancji rozproszenia stojana  $X_1$  skutkuje wzrostem zarówno momentu maksymalnego jak również poślizgu krytycznego. Charakterystyka mechaniczna silnika w obszarze pracy stabilnej staje się bardziej stroma. Dlatego silnik dwuukładowy wykazuje mniejszy poślizg niż silnik klasyczny. Przesunięcie o  $90^\circ$  powoduje, że strumienie od każdego z uzwojeń w rdzeniu nie sumują się algebraicznie, ale geometrycznie. Zmniejsza się nasycenie obwodu magnetycznego w całym zakresie prędkości obrotowych. Przykładowe charakterystyki silnika tradycyjnego i dwuukładowego przedstawiono na rysunku 2



Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne silnika tradycyjnego i dwuukładowego

Badania eksperymentalne wykazały, że moment rozruchowy i maksymalny wzrósł o około 20% dla całego przedziału prędkości obrotowej.

Ponieważ w silniku indukcyjnym straty obciążenia w wirniku zależą od poślizgu i wynoszą:

$$\Delta P_e = \frac{s}{1-s} P_{en} \quad (7)$$

stąd zmniejszenie poślizgu wpływa na wzrost sprawności. Ponieważ poślizg zależy w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalnie do częstotliwości, dlatego dla małych prędkości obrotowych zyski w sprawności silnika z powodu zmniejszenia poślizgu są większe.

Przy małych prędkościach obrotowych  $\Omega$  oraz w pierwszej strefie regulacji, utrzymywany jest stały prąd obciążenia. W obszarze tym ze względu na to iż straty w obwodzie magnetycznym zależą od częstotliwości (straty histerezy są proporcjonalne od częstotliwości a straty na prądy wirowe proporcjonalne do kwadratu częstotliwości), o sprawności silnika decydują straty obciążenia zarówno w stojanie jak też w wirniku. Dla poprawy sprawności w tym obszarze prędkości obrotowych podwyższa się napięcie zasilające a tym samym rośnie strumień magnetyczny w maszynie, w takim samym stopniu obniżyć możemy wartość prądu. Ponieważ straty zależą od kwadratu wartości prądu to zmniejszenie prądu istotnie wpływa na poprawę sprawności silnika. Rosną co prawda straty w żelazie, ale ich wzrost jest relatywnie mały w stosunku do strat obciążenia. Tego typu postępowanie jest możliwe dla silnika nienasyconego, w którym wzrost napięcia zasilającego wpływa na wzrost strumienia.

Ze względu na fakt, iż silnik dwuukładowy pracuje z mniejszym nasyceniem niż silnik klasyczny, przedstawiony powyżej sposób sterowania dla optymalizacji sprawności silnika wydaje się być bardziej korzystny niż silnika klasycznego.

Cechą wyróżniającą silnik dwuukładowy od innych silników sześciofazowych jest zmniejszenie jego prądu biegu jałowego i strat biegu jałowego. Badania eksperymentalne wykazują, że prąd biegu jałowego maleje średnio o 12% a straty biegu jałowego o 10% w stosunku do silnika klasycznego. Straty magnetyczne maleją o około 10%. [15,16,17]

## 6. PODSUMOWANIE

Zalety silników multifazowych tłumaczone są w literaturze głównie tym, że są wynikiem ograniczenia wyższych harmonicznych w polu magnetycznym. Dotyczy to rozkładu pola magnetycznego wzdłuż obwodu rdzenia maszyny. Dlatego układy trójfazowe w silnikach sześciofazowych przesunięte są o  $30^\circ$  lub  $60^\circ$ . Głównym założeniem konstrukcji silnika dwuukładowego przesunięciu  $90^\circ$  było ograniczenie wyższych harmonicznych w polu magnetycznym i momentów pasywnych wywołanych zawartością wyższych harmonicznych w prądzie stojana zasilanego z przemiennika częstotliwości.

Przesunięcie dwóch układów trójfazowych o  $90^\circ$  geometrycznie i zasilanie napięciami przesuniętymi o  $-90^\circ$  w czasie powoduje:

- zmniejszenie strumienia rozproszenia w żłobku,
- eliminuje momenty pasywnicze i składowe strumienia magnetycznego kolejności przeciwnej,
- zmniejsza nasycenie obwodu magnetycznego,
- zmniejsza straty mocy i prądy biegu jałowego.

Silnik dwuukładowy rozszerza zakres stosowania maszyn indukcyjnych – łączy bowiem cechy kilku rodzajów silników:

- energooszczędnego – przy tradycyjnym wykorzystaniu materiałów posiada większą sprawność w dużym przedziale prędkości obrotowych,
- przystosowanego do zasilania z przemiennika częstotliwości – kompensacji ulegają harmoniczne kolejności przeciwnej powstałe zarówno z rozkładu pola magnetycznego jak i z niesinusoidalnego zasilania. Zmniejszają się momenty pulsacyjne na wale maszyny,
- głębokożłobkowego – zwiększa się moment rozruchowy, dzięki zwiększeniu momentu maksymalnego wydłuża się drugą strefę regulacji.

Analiza wyników wykazała następujące różnice między silnikiem tradycyjnym i modernizowanym:

- Sprawność silnika dwuukładowego większa o 2-4% w stosunku do tradycyjnego. Ponadto charakterystyka sprawności w znacznym zakresie obciążenia staje się prostoliniowa.
- Większy moment rozruchowy silnika dwuukładowego (10-30%).
- Następuje kompensacja mocy biernej w silniku prototypowym (większy  $\cos\phi$  silnika dwuukładowego).
- Mniejsze straty biegu jałowego silnika modernizowanego.

Inne oczekiwane zalety:

- zmniejszenie hałasu,
- uproszczenie konstrukcji i kosztów wykonania falownika związane z mniejszą mocą końcówki mocy,
- zwiększenie granicznej mocy silnika zasilanego z przemiennika.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Abbas M. A. „Six – Phase Voltage Source Inverter Driven Induction Motor”. IEEE Transactions On Industry Application, Vol. IA-20, No. 5 September/October 1984.
- [2] Bernatt J. „Silniki indukcyjne 6-fazowe nowy obszar działalności Borne Komel”. Zeszyty problemowe BORME Komel.
- [3] Dąbrowski M. Projektowanie maszyn indukcyjnych. PWN Warszawa 1996.
- [4] DTR EU-43 ADtranz 1998
- [5] Hadiouche D, Razik H., Rezzoug A., „Modelling of a double Star Induction Motor for Space Vector PWM Control”. Proc. ICEM'2000, Espoo, Finland, August, 2000, pp. 392-396.
- [6] Herman B., Karwacki W., Lisowski., Pieńkowski., Suseł., „DwutworNIKowy silnik asynchroniczny klatkowy do napędów agregatów pompowych o regulowanej wydajności”. Wdawnictwo: Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Poltegor – Instytut, Redakcja Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław 2000.
- [7] Klingshirm E. A. „High Phase Order Induction Motors – Part I – Description and Theoretical Considerations”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 1-2. No. 1. January 1983.
- [8] Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A., Williamson S., „Multiphase induction motor drives- a technology status review” IET Electr. Power Appl. 2007 1,(4)pp.489-516
- [9] Lyra. R. O. C. Lipo T. A. „Tourque Density Improveement in a Six – Phase Induction Motor Witch Third Harmonic Current Injection”. IEEE Transactions On Industry Application, Vol. 38, No. 5 September/ October 2002.
- [10] Munoz A.R., Lipo T. „Dual Stator Winding Induction machine Drive”. IEEE Transactions On Industry Application, Vol. 36, No. 5 September/ October 2000.
- [11] Osama M., Lipo T.A. „ A New Invertor Control Scheme for Induction Motor Drives Requiring Wide Speed Range. IEEE Transactions On Industry Application, Vol. 38, No. 4 July/August 1996.
- [12] Osama M., Lipo T.A. „Modeling and Analisis of a Wide – Speed – Range Induction Motor Drive Based on Electric Pole Changing”. IEEE Transactions On Industry Application, Vol. 33, No. 5 September/ October 1997.
- [13] Osama M., Lipo T.A. „Experimental and Finite – Element Analisis of an Electric Pole – Change Drive”. IEEE Transactions On Industry Application, Vol. 36, No. 6 November/December 2000.
- [14] Pieńkowski K. „Analiza i modelowanie silnika indukcyjnego klatkowego z dwoma uzwojeniami stojana”. XXXVIII International Symposium on Elektrical Machines SME 2002. June 2002 Cedzyna- Kielce.
- [15] Saniawa D, Skowroński C. „Własności dwuuzwojeniowego silnika indukcyjnego.” 4 konferencja Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu Zakopane 2000
- [16] Saniawa D., Skowroński C. „Two System Induction Motor” Międzynarodowa Konferencja pt. “Oszczędności Energii w Elektrotechnice” 80 lat Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2001.
- [17] Saniawa D. Kaczkowski A. „Straty mocy w rdzeniu w silniku sześciofazowym”, Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Logi-trans”, 2008
- [18] Sigh G.K., „Multi-phase induction machina drive research –a survey”. Elctr. Power Syst Res, 202.61, pp139-147.
- [19] Sołbut A.: Analiza i badania porównawcze silnika 6 – fazowego i 3–fazowego zasilanego z falownika napięcia. Rozprawa doktorska, Instytut Elektrotechniki, Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki Moill i PAN, Warszawa 1997.