

Komunikat

Zdzisław KRZEMIEN¹⁾

SILNIKI INDUKCYJNE BEZKADŁUBOWE

Streszczenie: Silniki bezkadłubowe to nowa konstrukcja silników indukcyjnych przewidziana do współpracy z falownikami. W artykule przedstawiono wyniki badań takiego silnika oraz porównano je z wynikami badań silników standardowych.

VECTOR SPEED MOTORS

Summary. Vector speed motors are new construction of induction motors intended for inverter supply. The paper presents the results of investigations such a motor. The results are compared with those for a standard motor.

Key words: vector speed motors

1. WSTĘP

W ostatnich latach w napędach regulowanych następuje wymiana silników prądu stałego na silniki prądu przemiennego zasilane z przemienników częstotliwości. Silniki indukcyjne klatkowe są bowiem tańsze, mają bardziej prostą budowę i są bardziej niezawodne. Zasilanie ich ze źródeł o napięciu silnie odkształconym i przy szerokim zakresie zmian częstotliwości powoduje pogorszenie ich parametrów eksploatacyjnych. Zwykle przyjmuje się, że moc silnika indukcyjnego zasilanego z falownika maleje o ok. 10% w stosunku do mocy znamionowej przy zasilaniu sinusoidalnym. W praktyce oznacza to, że w danym napędzie regulowanym konieczna jest instalacja silnika o następnej wartości mocy z szeregu wykonafi.

Produkowane silniki prądu stałego dla danego wzniosu osi wału mają znacznie większą moc w porównaniu z silnikami indukcyjnymi, wynika to z ich większej długości pakietów i bardziej intensywnej wentylacji. W tabeli 1 podano podstawowe parametry silników indukcyjnych i prądu stałego dla wybranych wartości wzniosu osi wałów. Przedstawione typy silników mają największe moce w danych wzniosach.

Tabela 1

Porównanie podstawowych parametrów wybranych silników indukcyjnych i prądu stałego

	silniki indukcyjne typu Sg			silniki prądu stałego typu Pg		
	112M-4	132M-4	160L-4	112L	132D	160D
moc znamionowa (1500obr/min) [kW]	4	7.5	15	11	22	45
wznios osi wału [mm]	112	132	160	112	132	160
masa [kg]	36	73	130	120	182	300
wykorzystanie materiałów [kg/kW]	9.0	9.73	8.67	10.91	8.27	6.67

Z przytoczonych danych wynika, że jeśli w napędzie regulowanym zastępuje się silnik prądu stałego typu Pg132D o mocy 22kW i wzniosie osi wału 132 mm to uwzględniając obniżenie mocy spowodowane zasilaniem falownikowym, konieczna jest instalacja silnika indukcyjnego o mocy

¹⁾ Dr inż., Instytut Elektrotechniki; Zakład Maszyn Elektrycznych. 04-703 Warszawa, ul. Pożaryskiego 28
tel. 22-812 30 20 fax: 22-812 12 46 e-mail: z.krzemien@iel.waw.pl

25kW. Produkowane standardowe silniki indukcyjne o tej mocy mają wznios osi wału równy 200 mm.

Znaczna różnica wzniosów omawianych silników prowadzi często do konieczności wykonania wielu kosztownych zmian w konstrukcji napędu.

Pojawienie się nowej konstrukcji silnika indukcyjnego klatkowego ma na celu głównie uniknięcia tych zmian.

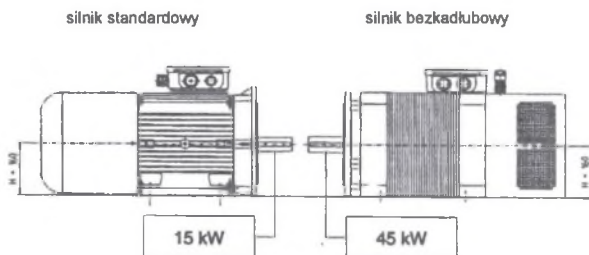
Silniki te nazwano silnikami indukcyjnymi bezkadłubowymi, mają one zalety silników indukcyjnych, lecz ich moce jednostkowe są porównywalne, a nawet większe od mocy silników prądu stałego przy danym wzniosie osi wału.

Ponadto spotyka się jeszcze inną nazwę tych silników – silniki sterowane wektorowo (vector-speed AC asynchronous motors), silniki te są bowiem zazwyczaj wyposażone w kontroler położenia wirnika (enkoder) służący do dokładnego i ciągłego sterowania prędkością obrotową maszyny zasilanej z falownika o sterowaniu wektorowym.

W silnikach bezkadłubowych funkcję kadłuba pełni pakiet blach stojana o kwadratowym obrysie zewnętrznym. Praktycznie więc cała przestrzeń zajmowana przez silnik jest wykorzystywana jako obwód elektromagnetyczny. Uzyskiwane moce są bardzo duże w porównaniu z silnikami standardowymi.

Podstawowe cechy silników bezkadłubowych są następujące:

- duża moc przy względnie małych wymiarach;
- mały moment bezwładności;
- znaczna maksymalna prędkość obrotowa do 9000 obr/min;
- obca wentylacja.



Rys. 1. Porównanie wymiarów silnika standardowego i silnika bezkadłubowego o wzniosie 160 mm
Fig. 1. Comparison of standard and vector-speed motors of the same axis height (160 mm)

Silniki bezkadłubowe zasadniczo przewidziane są do zasilania falownikowego i rozruch bezpośredni z sieci może uszkodzić maszynę. W przypadku zasilania silnika bezkadłubowego z sieci konieczne jest dokonywanie „miękkiego” rozruchu (softstartu) lub załączanie na zaciski silnika regulowanego napięcia.

Silniki takie wytwarzane są przez niektóre firmy europejskie w zakresie mocy od kilku do kilkuset kilowatów. Parametry ich dla danej wielkości są zbliżone. Wszystkie typy posiadają obcą wentylację oraz wyposażone są w enkodery. Silniki wykonywane są w dwóch rodzajach stopnia ochrony: IP23 i IP54.

2. PRZEDMIOT BADAŃ

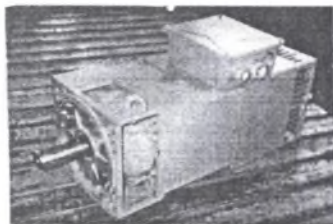
W laboratorium Zakładu Maszyn Elektryczny IEI wykonano badania zakupionego silnika bezkadłubowego wielkości mechanicznej 132 i mocy znamionowej 18.5 kW.

Silnik ten jest silnikiem czterobiegunowym o wentylacji obcej – osiowej.

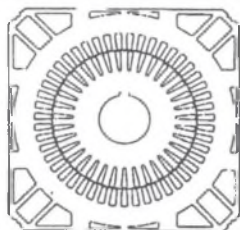
Stojan złożony jest z kwadratowych blach o niskiej stratności, w rogach wycięte są otwory wentylacyjne, co przedstawione jest na rysunku 3. Izolacja uzwojenia stojana wykonana jest w klasie F. Wirnik jest klatkowy zalany aluminium. Wentylator jest odśrodkowy, powietrze jest zasysane. Wirnik pomocniczego jednofazowego silnika umieszczony jest na zewnątrz i na nim zamontowany jest wentylator.

Na wale od strony wentylatora umieszczony jest enkoder (1024 impulsy/obr) przeznaczony do współpracy z falownikiem sterowanym wektorowo.

Silnik wykonany jest w stopniu ochrony IP54.



Rys. 2. Badany silnik bezkadłubowy w.m. 132 mm
Fig. 2. Tested vector-speed motor, axis height 132 mm



Rys. 3. Rysunek blach stojana i wirnika badanego silnika bezkadłubowego
Fig. 3. Geometry of tested vector-speed motor

3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów porównywano z wynikami badań silników standardowych: Sg132 M4 – ten sam wznios co silnika bezkadłubowego oraz Sg180 M4 – ta sama moc. W tabeli 2 zawarto zestawienie danych znamionowych silników bezkadłubowego, Sg132M4 i Sg180M4 podanych przez producentów

Tabela 2

Zestawienie parametrów silnika bezkadłubowego i silników standardowych

typ	bezkadłubowy*	Sg132M4	Sg180M4
moc [kW]	18.5*	7.5	18.5
napięcie [V]	400	380	380
prąd [A]	35	15.4	35.7
sprawność [%]	92.9	87.0	89.5
$\cos \varphi$ [-]	0.83	0.85	0.88
moment [Nm]	118	49.4	121.4
prędkość obr.	1500	1450	1455
połączenie	gwiazda	trójkąt	trójkąt
masa [kg]	135	73	165
stopień ochrony	IP54	IP54	IP54
klasa izolacji	F	B	F
długość całkowita [mm]	782	530	705
wykorzystanie materiałów [kg/kW]	7.3	9.7	8.9

* dane znamionowe dla częstotliwości napięcia zasilającego równej 51.4 Hz

3.1. Próba biegu jałowego przy zasilaniu z sieci

Do strat jałowych silnika bezkadłubowego dodano moc pobieraną z sieci przez jednofazowy silnik pomocniczy napędzający wentylator i wartość tę przyjęto jako straty wentylacyjne zgodnie z IEC 34-2 pkt.8.

Tabela 3
Parametry biegu jałowego silnika bezkadłubowego i silników standardowych

typ	bezkadłubowy	Sg132M4	Sg180M4
I_o [A]	17.6	6.7	14.5
P_o [W]	$610.7 + 110^* = 720.7$	404.9	684.5
P_{Fe} [W]	415.3	227.5	444.5
P_m [W]	$76.3 + 110^* = 186.3$	93.8	120.4

* straty wentylacyjne (obca wentylacja)

Sumaryczne straty mechaniczne silnika bezkadłubowego są stosunkowo wysokie w porównaniu z silnikami standardowymi; spowodowane jest to m.in. stratami w enkoderze.

3.2. Próba nagrzewania przy zasilaniu z sieci

Moc znamionowa silnika bezkadłubowego jest równa 18.5 kW przy $f = 51.4$ Hz po przeliczeniu na częstotliwość 50 Hz moc znamionowa wynosi 18.0 kW. Próba nagrzewania tego silnika przy zasilaniu sieciowym była przeprowadzona przy obciążeniu taką mocą. Ustalony przyrost temperatury uzwojenia stojana wynosił 62.5°K, był on więc stosunkowo niski wobec dopuszczalnego 105°K.

Tabela 4
Wyniki próby nagrzewania silnika bezkadłubowego przy zasilaniu sieciowym oraz porównanie z wynikami prób nagrzewania silników standardowych

typ	bezkadłubowy $P=18\text{kW } U=400\text{V}$	Sg132M4 $P=7.5\text{kW } U=380\text{V}$	Sg180M4 $P=18.5\text{kW } U=380\text{V}$
ustalony przyrost temperatury uzwojenia stojana [°K]	62.6	80.2	80.0
temperatura kadłuba [°C]	50.5	66.2	62.4
temperatura otoczenia [°C]	16.9	24.9	21.7

3.3. Próba obciążenia w stanie nagrzanym

Próbie przeprowadzono w stanie cieplnie ustalonym przy obciążeniu bezpośrednim silnika. Przy znamionowym obciążeniu odczytano podstawowe parametry silnika, które zawarto w tabeli 5 wraz z porównaniem obciążeniowych parametrów znamionowych silników standardowych. Przy czym sprawność silnika bezkadłubowego wyznaczono metodą B (kanadyjską), zaś sprawność silników standardowych wyznaczona była metodą strat poszczególnych wg PN-88/E-06701.

Tabela 5
Parametry obciążeniowe silnika bezkadłubowego przy zasilaniu z sieci

typ	bezkadłubowy	Sg132M4	Sg180M4
moc znamionowa [kW]	18	7.5	18.5
napięcie znamionowe [V]	400	380	380
prąd [A]	36.9	15.4	35.9
sprawnność [%]	90.75	87.77	89.9
$\cos\varphi$ [-]	0.808	0.843	0.871
poślizg [%]	2.35	2.66	2.4

3.4. Próba nagrzewania przy zasilaniu falownikowym

Badania wykonywano zasilając silnik z falownika PWM, enkoder nie był wykorzystywany. Przyrost temperatury uzwojenia stojana przy zasilaniu sieciowym był stosunkowo niewielki, więc silnik przy zasilaniu falownikowym przy $f = 50$ Hz obciążono tą samą mocą (18 kW). Przy $f = 30$ Hz silnik obciążono tak, aby zachować stały moment.

Silniki standardowe były badane przy zasilaniu z tego samego falownika.

Wyniki prób nagrzewania silnika bezkadtubowego wraz z porównaniem z wynikami badań silników standardowych zamieszczono w tabeli 6.

Tabela 6

Wyniki prób nagrzewania silnika bezkadtubowego przy zasilaniu falownikowym przy $f = 50$ i 30 Hz oraz porównanie z wynikami prób nagrzewania silników standardowych

typ	bezkadtubowy U=400V	Sg132M4 U=380V	Sg180M4 U=380V
$f = 50$ Hz			
moc [kW]	18	6.6	16.5
napięcie [V]	400	380	380
ustalony przyrost temperatury uzwojenia stojana [°K]	78.6	82	82.7
temperatura kadłuba [°C]	60.7	64.0	63.1
temperatura otoczenia [°C]	16.5	24.2	16.2
$f = 30$ Hz			
moc [kW]	10.8	3.5	9.0
napięcie [V]	310	296	296
ustalony przyrost temperatury uzwojenia stojana [°K]	71.5	82.1	81.1
temperatura kadłuba [°C]	55	69.2	68.7
temperatura otoczenia [°C]	16.5	26.1	15.1

3.5. Próba obciążenia przy zasilaniu falownikowym

Próbę przeprowadzono w stanie cieplnie ustalonym przy obciążeniu bezpośrednim silnika przy dwóch częstotliwościach napięcia zasilania $f = 50$ Hz i 30 Hz. Przy znamionowym obciążeniu odczytano podstawowe parametry silnika, które zawarto w tabeli 7 wraz z porównaniem obciążeniowych parametrów znamionowych silników standardowych. Przy czym sprawność silnika bezkadtubowego wyznaczono metodą B (kanadyjską), zaś sprawność silników standardowych wyznaczona była metodą bezpośrednią (moc oddana do mocy pobranej).

Tabela 7

Parametry obciążeniowe silnika bezkadtubowego przy zasilaniu falownikowym

typ	bezkadtubowy	Sg132M4	Sg180M4
$f = 50$ Hz			
moc znamionowa [kW]	18	6.6	19.5
napięcie znamionowe [V]	400	380	380
prąd [A]	39.2	15.75	43
sprawność [%]	89.17	85.30	87.72
$\cos\varphi$ [-]	0.774	0.745	0.790
poślizg [%]	3.64	3.8	2.84
$f = 30$ Hz			
moc znamionowa [kW]	10.8	3.5	10.5
napięcie znamionowe [V]	310	296	296
prąd [A]	37.7	14.7	40.4
sprawność [%]	87.67	78.9	82.47
$\cos\varphi$ [-]	0.748	0.590	0.617
poślizg [%]	2.9	6.85	4.64

Sprawność silnika bezkadtubowego przy zasilaniu z falownika jest wysoka, co świadczy o właściwym doborze jego parametrów konstrukcyjnych pod kątem zasilania napięciem odkształconym.

4. WNIOSKI

Wyniki wykonanych badań wskazują na dobre własności napędowe silnika bezkadtubowego w stanach ustalonych. Przyrosty temperatury uzwojenia stojana przy obciążeniach znamionowych są niewielkie zarówno przy zasilaniu sieciowym, jak i falownikowym. Istnieje dość znaczna rezerwa cieplna i z silnika tego można uzyskać moc znacznie większą niż znamionowa.

Pomierzona sprawność (metoda B) jest niższa niż podana przez producenta, jednak nadal jest większa niż porównywanych silników standardowych.

Według danych podanych na tabliczce znamionowej sprawność silnika zawiera się w klasie sprawności eff1, czyli należałoby go zaliczyć do silników o wysokiej sprawności, jednak pomiary tego nie potwierdziły i wyznaczona wartość sprawności wskazuje, że silnik zawiera się w klasie eff2 (przy zasilaniu sieciowym).

Pewnym mankamentem badanej konstrukcji jest konieczność dokonywania tzw. „miękkiego rozruchu” (softstartu) – rozruch bezpośredni z sieci mógłby uszkodzić silnik. Własność ta wynika z przeznaczenia maszyny do zasilania z falownika.

Problematyczny jest również sposób instalacji enkodera – wewnątrz maszyny, co powoduje znaczne wydłużenie konstrukcji. Wydaje się, że bardziej właściwe byłoby potraktowanie go jako opcji (wykorzystywany jest on tylko w niektórych napędach) i mocowanie go w przypadku zamówienia na zewnątrz silnika.

Reasumując, badany silnik bezkadtubowy należy uznać jednak za konstrukcję interesującą, a jego parametry eksploatacyjne są zadowalające, szczególnie przy zasilaniu falownikowym.

Wydaje się celowe wykonanie projektu wstępnego serii silników bezkadtubowych przewidzianych zasadniczo do zasilania falownikowego i przekazanie wyników tych prac krajowym producentom maszyn elektrycznych. Pojęcie produkcji takich maszyn rozszerzyłoby ofertę silników indukcyjnych wytwarzanych w Polsce.

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

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

Abstract

Vector-speed motors are specifically designed for inverter supply. Their main characteristics are as follows:

- high power with relation to the small external size
- small moment of inertia
- high rotational speed (up to 9000 rpm)
- external ventilation.

The paper presents the selected results of investigations of a vector-speed motor (18.5 kW; axis height – 132 mm) and their comparison with those for standard motors supplied from the mains and inverter.

The results of temperature-rise tests and load tests in case of supply from the mains and inverter show that the parameters of vector-speed motors are better than those of standard motors, particularly in case of inverter supply.

The temperature rises of stator windings are small both for mains and inverter supply.

The efficiency is quite high, whereas the losses are small.

Summing up, a vector-speed motor is an interesting construction for modern AC drives.