

Jan Zawilak, Tomasz Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wrocław

SILNIKI ELEKTRYCZNE W NAPĘDACH GÓRNICZYCH

ELECTRIC MOTORS IN MINE DRIVES

Abstract: This paper deals with electric drives in mine applications. Use of pole-changing induction motors enables reduction of energy consumption. Applications with fan type and constant torque-speed characteristics are shown. Parameters of induction and synchronous motors with permanent magnets are compared.

1. Wstęp

W wielu procesach technologicznych wymagana jest regulacja parametrów wyjściowych pomp lub wentylatorów (wydatku lub ciśnienia), którą można uzyskiwać przez:

- bocznikowanie przepływu (stosowane w pompach),
- dławienie, zmianę kąta ustawienia łopatek wirnika,
- zmianę prędkości obrotowej.

Najbardziej ekonomiczna jest regulacja przez zmianę prędkości obrotowej. W napędach elektrycznych prądu przemiennego zmiana prędkości obrotowej dokonywana może być przez zastosowanie:

- regulacji parametrów napięcia zasilającego (częstotliwości, amplitudy),
- silników wielobiegowych.

Regulacja parametrów napięcia zasilającego umożliwia zmianę prędkości obrotowej układu napędowego w szerokim zakresie (zmianę parametrów wyjściowych pompy lub wentylatora), łagodzi procesy rozruchowe, pozwala na sterowanie procesami hamowania, umożliwia dopasowanie mocy silnika do zapotrzebowania maszyny roboczej, ma bardzo niskie koszty eksploatacyjne. Związana jest jednak z kosztami inwestycyjnymi na zainstalowanie urządzenia energoelektronicznego, którego koszt (obecnie) porównywalny jest z ceną silnika napędowego. Koszty inwestycji zwiększają się z napięciem szczególnie dla napędów elektrycznych z silnikami o napięciu zasilania większym niż 3000V. Zastosowanie wielobiegowych silników napędowych umożliwia skokową regulację parametrów, o zakresie ograniczonym liczbami całkowitymi wynikającymi z liczby biegunów pola magnetycznego. Zwiększenie liczby prędkości obrotowych powyżej trzech powoduje rozbudowanie układu przełączającego czyniąc przedsięwzięcie nieopłacalnym.

Celem niniejszej pracy jest pokazanie możliwości budowy silników prądu przemiennego o regulowanych skokowo prędkościach obrotowych przez zmianę liczby biegunów pola magnetycznego.

2. Uzwojenia wirników silników o zmienianych liczbach biegunów pola magnetycznego [5]

By w maszynie elektrycznej powstał moment elektromagnetyczny o składowej stałej to pole magnetyczne wytworzone przez stojan i wirnik muszą mieć m.in. określony stosunek liczb biegunów (największą wartość momentu uzyskuje się wówczas gdy podziały biegunowe tych pól są takie same). Dlatego zmianie liczby biegunów pola magnetycznego wywołanego przez uzwojenie stojana musi towarzyszyć taka sama zmiana pola wytworzonego przez uzwojenie wirnika.

2.1 Klatkowe zwarte uzwojenia wirników

Pręty klatkowego uzwojenia wirnika tworzą wiele obwodów elektrycznych, w których indukowane *sem* i płynące prądy samoczynnie dopasowują się do zmiany liczby biegunów i na zasadzie reakcji wytwarzają *smm* o kształcie obwodowym podobnym do pola magnetycznego szczeliny przytwornikowej - występującego jako akcja. Kształt pola magnetycznego wywołanego przez uzwojenie klatkowe korygować można doborem liczby prętów, ograniczając działanie i skutki pól pasożytniczych.

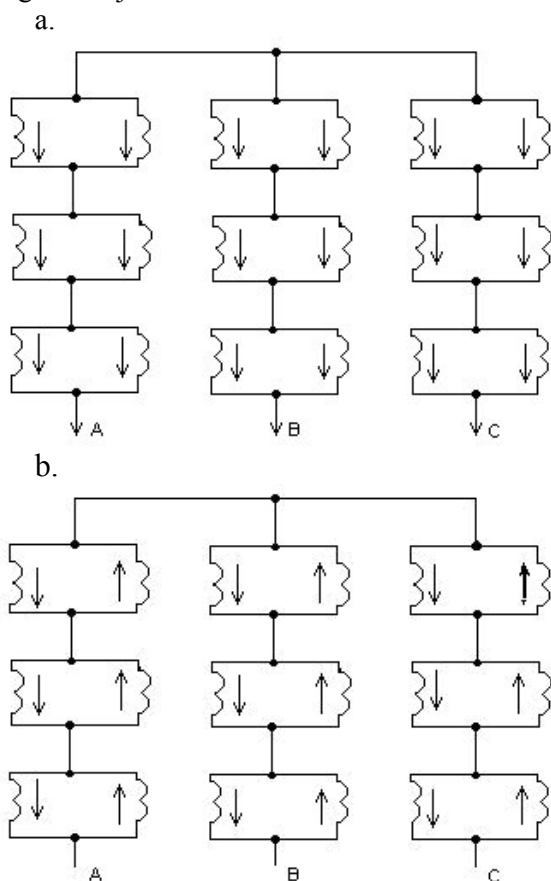
2.2 Pasmowe uzwojenia wirników

Pasmowe uzwojenie wirnika musi być zawsze dopasowane do pola magnetycznego stojana. Dobór struktury pasmowego uzwojenia wirnika może polegać na:

- umieszczeniu niezależnych uzwojeń, z których każde pracuje przy określonej prędkości obro-

- towej tj. liczbie biegunów (wymaga co najmniej pięciu pierścieni ślizgowych),
- zastosowaniu uzwojenia zmiennobiegunowego przełączalnego (wymaga sześciu pierścieni ślizgowych),
- zastosowaniu specjalnych struktur połączenia pasm fazowych.

W wielu układach napędowych dwubiegunowych wystarcza regulacja parametrów silnika indukcyjnego dla jednej prędkości obrotowej, np. kształtowanie charakterystyki mechanicznej. Można wówczas zastosować uzwojenie pasmowe w wirniku, które dla jednej liczby biegunów pola magnetycznego jest „otwarte” natomiast dla „drugiej wewnątrznie zwarte” (rys. 1). Silnik ma regulowane parametry ruchowe dla jednej prędkości obrotowej za pomocą trójfazowego rozrusznika (np. wiroprądowego). Dla drugiej prędkości obrotowej silnik ma stałe charakterystyki odpowiadające parametrom zwartego uzwojenia wirnika.



Rys. 1 Schemat połączenia pasmowego uzwojenia wirnika o przełączalnych liczbach biegunów a. pasmowego otwartego dla początkowej liczby biegunów $2p_p$, b. wewnątrznie zwartego dla końcowej liczby biegunów $2p_k$

3. Przykłady zastosowania silników wielobiegunowych w napędach górniczych

3.1 Napędy wentylatorów głównego przewietrzania kopalń z silnikami synchronicznymi (napędy dużej mocy)

Ze względu na możliwość kompensacji mocy biernej do napędu wentylatorów głównego przewietrzania kopalń podziemnych najczęściej zastosowane są silniki synchroniczne z wirnikami o biegunach jawnych. W maszynach tych na kształt pola magnetycznego magnesu ma wpływ nie tylko rozkład smm ale również rozkład permeancji związanej z kształtem nabiegunka [2].

Opisany silnik typu *GAe 1716t* o mocy znamionowej $P=3\ 150$ kW, napięciu $U=6000$ V (produkcji DOLMEL) ma wirnik o 16-tu biegunach jawnych wykonanych z wykrojów blachowych. W nabiegunkach umieszczone jest uzwojenie rozruchowo-tłumiące wykonane z prętów mosiężnych zwartych pierścieniami miedzianymi. Uzwojenie wzbudzenia umieszczone jest w postaci cewek skupionych.

W stojanie umieszczono trójfazowe uzwojenie przełączalne, skonstruowane wg. zasad opisanych w [5], o podstawowych liczbach biegunów pola magnetycznego $2p_p=16$ i $2p_k=20$. Zespoje w pasmach fazowych połączone są szeregowo dla większej oraz w dwóch obwodach równoległych dla mniejszej liczby biegunów. W obu przypadkach pasma fazowe skojarzone są w gwiazdę (Y/YY). W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry uzwojenia i porównano je z parametrami silnika fabrycznego jednobiegunowego.

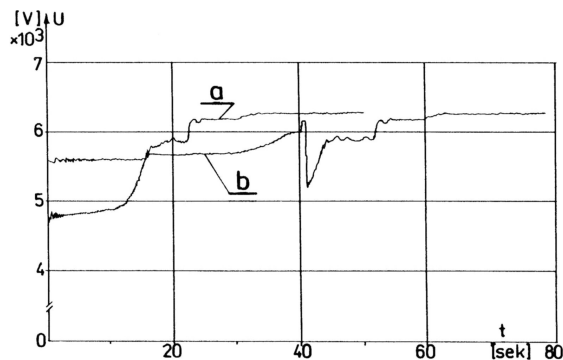
Tabela 1 Podstawowe parametry dwubiegunowego silnika synchronicznego typu *GAe 1716/20t*

typ	jedn.	GAe 1716 t	GAe 1716/20 t zmodernizowany	
P_n	kW	3 150	2 600	1 200
U_n	V	6 000	6 000	6 000
I_n	A	350	290	190
I_{fn}	A	300	330	260
$\cos \varphi_n$	-	0,9 _{poj}	0,9 _{poj}	0,8 _{ind}
η	%	96,2	95,5	81,0
n_{ln}	o/min	375	375	300

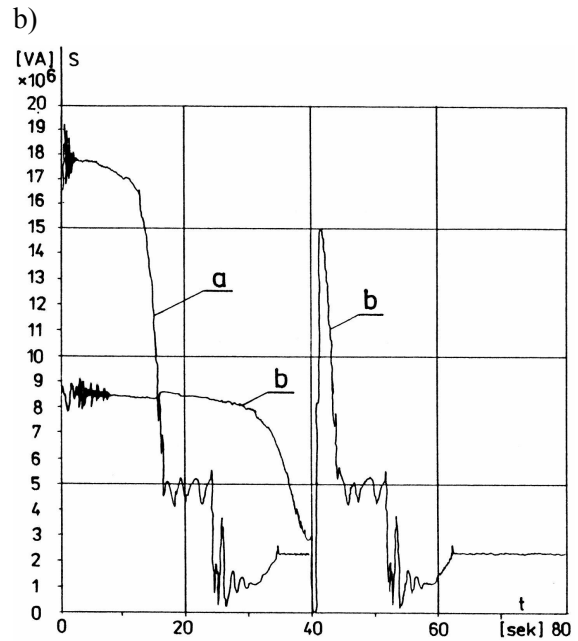
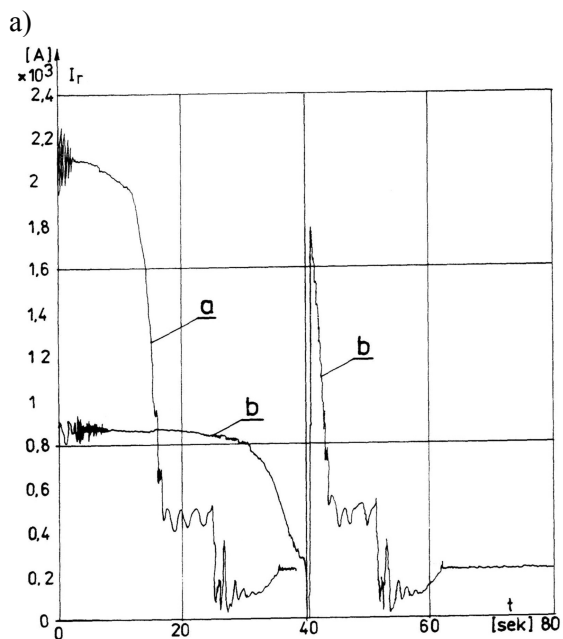
Rozruch układu napędowego wentylatora odbywa się przez bezpośrednie włączenie silnika

do sieci o napięciu $U=6200$ V. Podczas rozruchu silnik pobiera prąd $I_r=2160$ A tj. 6,2 krotnie większy niż prąd znamionowy, powodujący spadek napięcia sieci o 24 % tj. do wartości $U=4710$ V (rys. 2, wykres a).

Wyniki pomiarów prądu stojana I_r , (A) oraz mocy pozornej S_r (B) silnika jednobiegowego oraz dwubiegowego w czasie rozruchu przedstawiono w formie wykresów odpowiednio „a” oraz „b” na rysunku 3. Należy zwrócić uwagę, że maksymalna moc pozorna pobierana przez silnik dwubiegowy jest ponad 2 krotnie mniejsza (rys. 3 B, $S=18/8,8$ MVA) niż moc pozorna pobierana przez silnik jednobiegowy, co ma istotne znaczenie dla doboru sieci i aparatury zasilającej.



Rys. 2 Przebiegi napięcia zasilającego silnik typu GAe 1716/20t podczas rozruchu a. bezpośredniego na większą prędkość obrotową, b. dwustopniowego silnikiem dwubiegowym



Rys. 3 Przebiegi prądu stojana A oraz mocy pozornej B silnika typu GAe 1716/20t podczas rozruchu a. bezpośredniego na większą prędkość obrotową, b. dwustopniowego silnikiem dwubiegowym

3.2 Napędy wentylatorów dolowych

W kopalni istnieją strefy wymagające intensywnej lokalnej wentylacji podczas pracy górników. Lokalny przepływ powietrza wymuszany jest wentylatorami z silnikami o mocy od 10 do 60 kW. Czas pracy górników w przodku wynosi w okresie zmiany 4÷5 godzin. W pozostałym czasie, również w dniach wolnych od pracy, praca wentylatorów lokalnych jest zbędna. Nie można ich jednak wyłączyć ze względu na zawilgacanie się izolacji silników, które mają budowę maszyn powszechnego zastosowania (budowa zamknięta o stopniu ochrony IP 54). Można natomiast obniżyć ich zużycie energii elektrycznej przez zmniejszenie prędkości obrotowej. Do napędu tych wentylatorów zaproponowano dwubiegowe silniki indukcyjne o przełączalnych uzwojeniach trójfazowych i regulowanej prędkości obrotowej, warunkowanej zmianą liczby biegunów pola magnetycznego [2]. Ponieważ w czasie pracy górników (praca normalna wentylatora) wentylator ma mieć zachowany przepływ, dlatego uzwojenie twornika silnika dwubiegowego dla większej prędkości obrotowej musi mieć takie same parametry jak silnika jednobiegowego konwencjonalnej budowy. Większą liczbę biegunów uzwojenia (odpowiadającą mniejszej prędkości obrotowej, zwaną dalej energooszczędną) dobiera się ze

względu na minimalny wydatek powietrza określony przez specjalistów z zakresu wentylacji. Na podstawie wykonanych pomiarów ustalono zakres zmiany prędkości obrotowej normalnej i energooszczędnej układu napędowego wentylatorów lokalnych w stosunku ok.4:1.

Do najbardziej rozpowszechnionych wentylatorów lokalnych, na terenie kopalń rud miedzi, należą wentylatory typu *PWS-10* oraz *WLE*. Wirmiki wentylatorów tego typu umieszczone są bezpośrednio na wale silników, a kierownice powietrza przymocowane do kadłuba stojana. Zastosowanie silników dwubiegowych pokazano na przykładzie wentylatorów typu *PWS-10*.

Wentylator *PWS-10* ma silnik napędowy typu *SKf 160L4* produkcji Zakładu CELMA w Cieszyńcu o parametrach zestawionych w tabeli 2 (kolumna 3). Silnik ten przezwojono umieszczając w stojanie przełączalne uzwojenie o zmienianych liczbach biegunów: początkowej $2p_p=4$ oraz końcowej $2p_k=14$. Uzwojenie zostało zaprojektowane w taki sposób, że dla mniejszej liczby biegunów odpowiadającej normalnej większej prędkości obrotowej, silnik ma takie same parametry jak w wykonaniu fabrycznym [2]. Zapewnia ono dopasowanie silnika do wymagań układu napędowego dla mniejszej prędkości obrotowej (tabela 2, kolumna 4) przez zmniejszenie mocy pozornej pobieranej z sieci oraz złagodzenie rozruchu tj. zmniejszenie prądu i momentu rozruchowego.

Tabela 2. Dane dwubiegowego silnika napędzającego wentylator typu *PWS-10*

<i>Sf 160 L4/14</i>		wartości			
wielkość	jedn	obliczone		pomierzone	
		$2p=4$	$2p=14$	$2p=4$	$2p=14$
P_n	W	15000	1000	---	---
S_n	VA	19600	3876	12210	2620
P_l	W	16850	1667	9280	600
I_n	A	22,6	4,5	14,1	3,1
n_n	o/m	1460	410	1450	415
$\cos\varphi$	---	0,86	0,43	0,76	0,23
η	%	89,0	60,0	---	---
I_r	I_r/I_n	5,8	3,8	5,1	2,1
M_r	M_r/M_n	1,8	1,5	---	---
M_{max}	M_x/M	2,4	1,9	---	---

Z wykonanych pomiarów wynika, że silnik ten został niewłaściwie dobrany (przewymiarowany) do napędu tego wentylatora co powoduje obniżenie parametrów eksploatacyjnych dla obu prędkości obrotowych. Zaproponowane uzwojenie zapewnia jednakże właściwą proporcję mocy znamionowych dla poszczególnych prędkości obrotowych, co pozwala na znaczne zwiększenie mocy wentylatora.

3.3 Napędy przenośników taśmowych

Dobór przenośnika ze względu na wydajność jest trudny, gdyż masa urobku w czasie zmiany zależy nie tylko od warunków geologicznych kopalni, ale także od wydajności górników, a ta różna jest na I oraz II zmianie i zależy od dnia tygodnia. Dlatego projektanci dobierają przenośniki z dużym zapasem na przewidywaną wydajność maksymalną. Bywa, że mimo wielu lat pracy, przenośnik nigdy nie był eksploatowany znamionowo. Przeprowadzone pomiary w jednej z kopalń rud miedzi wskazały, iż większość zainstalowanych tam przenośników taśmowych pracuje z obciążeniem o 40-60 % mniejszym od znamionowego [7]. Jednym ze sposobów dopasowania przenośnika do warunków eksploatacji jest regulacja prędkości taśmy, która związana jest z prędkością obrotową silników napędowych.

W analizowanej kopalni największą grupę stanowią przenośniki taśmowe typu LEGMET, w których zastosowano silniki indukcyjne dwuklatkowe typu *SZDc 156d* produkcji zakładów EMIT w Żychlinie. Dane znamionowe tych silników przedstawiono w kolumnie 3 tabeli 3.

Wykorzystując konstrukcję mechaniczną oraz magnetowód silnika *SZDc 156d* zaprojektowano przełączalne uzwojenie twornika o zmienianych liczbach biegunów pola magnetycznego $2p=6/8$. Ze względu na warunek stałości momentu silnika dla obu prędkości obrotowych, wynikający z wypełnienia taśmy przenośnika, uzwojenie zaprojektowano wg zasad modulacji kierunkowo-prądowej, a pasma fazowe połączono odpowiednio w trójkąt oraz gwiazdę z dwoma obwodami równoległymi [3]. Zastosowanie takiego połączenia uzwojeń (podobnie jak w układzie Dahlandera) minimalizuje liczbę wyprowadzeń z uzwojenia, liczbę zacisków zasilających oraz układ sterująco-zasilający. Parametry silnika dla obu prędkości obrotowych zestawiono w kolumnach 4, 5 tabeli 3. Jak widać, parametry silnika dwubiegowego z przełączalnym uzwojeniem są porównywalne do silnika jednobiegowego.

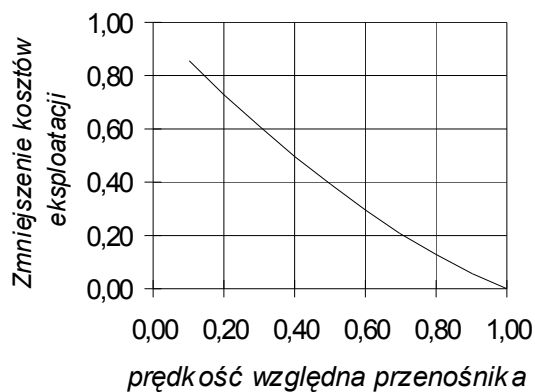
Złagodzenie procesów rozruchu i zmniejszenie naprężeń w taśmie przenośnika odbywa się przez zastosowanie sprzęgła hydrokinetycznego, którego moment jest proporcjonalny do trzeciej potęgi prędkości obrotowej. Zmniejszenie prędkości obrotowej o 25 % uniemożliwia zastosowanie sprzęgła hydrokinetycznego w zmodernizowanym przenośniku.

Zaproponowano by funkcję sprzęgła przenieść na układ zasilająco-sterujący, którym jest tyristorowy sterownik napięcia [1] realizującego następujące funkcje:

- regulacji szybkości narastania amplitudy i wartości skutecznej prądu stojana (rozruchowego),
- współpracę z układem przełączającym uzwojenie i zmieniającym prędkość obrotową silników,
- ochronę silników przed skutkami przeciążeń, zwarć i pracą dwufazową.

Na podstawie wykonanych pomiarów eksploatacyjnych oraz obliczeń wyznaczono procentowe zmniejszenie kosztów eksploatacji, wynikające ze zmiany prędkości taśmy przenośnika uwzględniając:

- oszczędności energii elektrycznej,
- zmniejszenie zużycia elementów przenośnika,
- zmniejszenie kosztów remontów eksploatacji, a wyniki pokazano na rysunku 4.



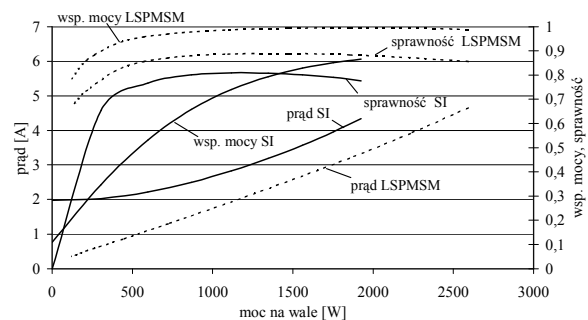
Rys. 4. Względne zmniejszenie kosztów eksploatacji przenośnika wynikające ze zmniejszenia prędkości taśmy

Tabela 3. Dane znamionowe silnika napędowego przenośnik taśmowy typu LEGMET

wykonanie		fabryczne	przezwójony	
wielkość	jednostka	1-bieg.	2-biegowy	
P_n	kW	160	150	115
n_n	obr/min	985	987	740
I_n	A	237	218	195
η	%	93,5	94,0	93,0
$\cos\varphi$	--	0,84	0,85	0,74
i_r	--	5,3	5,4	4,7
I_r	A	1256	1177	916
M_n	Nm	155	145	148
m_r	--	2,1	2,0	1,9
m_{max}	--	2,0	1,9	1,8

4. Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi

Alternatywą dla silników indukcyjnych są silniki synchroniczne z magnesami trwałymi przystosowane do rozruchu bezpośredniego (LSPMSM). Silniki tego typu charakteryzują się zaletami silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi przy zachowaniu prostoty obsługi silnika indukcyjnego. Maszyny te najczęściej wykonuje się poprzez modyfikacje wirnika maszyny indukcyjnej. W celu porównania charakterystyk eksploatacyjnych i parametrów silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi wykonano obliczenia połowo-obwodowe obu porównywalnych modeli maszyn. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyki obciążenia badanych maszyn

Dla znamionowej (katalogowej dla silnika indukcyjnego) wartości prądu wyznaczono z charakterystyki obciążenia pozostałe parametry znamionowe obu modeli badanych maszyn (tab. 4).

Tabela 4. Parametry znamionowe modelowanych maszyn

silnik			ind.	syn.
moc	P_n	kW	1,5	2
prędk. obr.	n_n	o/min	1410	1500
mom. obr.	M_n	Nm	10,2	12,7
napięcie	U_n	V	380	380
prąd	I_n	A	3,5	3,5
wsp. mocy	$\cos\varphi_n$	--	0,81	0,99
sprawność	η_n	--	0,80	0,89

5. Wnioski

Na podstawie wykonanych obliczeń i projektów oraz przeprowadzonych badań przemysłowych można stwierdzić, że możliwe i ekonomicznie uzasadnione jest budowanie układów napędowych z silnikami dwubiegowymi o zmienianych liczbach biegunów pola magnetycznego, wynikające z prostego przełączenia uzwojenia.

Silnik z magnesami trwałymi ma lepsze właściwości eksploatacyjne niż porównywalny silnik indukcyjny. Zastosowanie magnesów trwałych pozwala na uzyskanie większej mocy przy jednoczesnym wzroście współczynnika mocy oraz sprawności. Gorsze właściwości rozruchowe maszyny synchronicznej predysponuje tą konstrukcję przede wszystkim dla napędów o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej.

6. Literatura

- [1]. Antal L. Zawilak J. *Wyniki badań dwubiegowego silnika synchronicznego*. Zesz. Prob. BOBRME KOMEL nr 68 Katowice 2004.
- [2]. Antal L. Zawilak J. *Kompensacja mocy biernej silnikiem synchronicznym dwubiegowym o ulamkowym stosunku prędkości*. Prace Nauk. Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr. PWr. Nr 48 seria Studia i Mat. nr 20 Wrocław 2000 r.
- [3]. Zawilak Tomasz, Antal Ludwik: *Porównanie silnika indukcyjnego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim*. Prace Nauk. Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr. PWr. Nr 58 seria Studia i Mat. nr 25 Wrocław 2005 r.
- [4]. Azarewicz St. Zalas A. Zawilak J. *Układ dwubiegowego przenośnika taśmowego zasilanego z tyrystorowego sterownika napięcia*. Mat. konf. V Symp. PPE Ustroń-Gliwice 1995 r.
- [5]. Kowalski St. Zawilak J. Żymalski A. *Silniki wielobiegowe w napędach o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 6-7 1996 r.
- [6]. Zawilak T., Zawilak J. *Rozruch silników synchronicznych dużej mocy przy częściowym zasilaniu*

uzwojenia stojana, Zesz. Prob. BOBRME KOMEL nr 81 Katowice 2009.

[7]. Zawilak J. *Uzwojenia trójfazowe przełączalne silników elektrycznych asynchronicznych o dwóch prędkościach obrotowych*. Archiwum Elektrotechniki nr 3 1981 r.

[8]. Zawilak J. *Uzwojenia zmiennobiegunowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Pr. Nauk. Inst. Ukł. Elektromasz. Politechniki Wr. Nr 37 seria M nr 7 1986 r.

Autorzy

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn,
Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
e-mail: jan.zawilak@pwr.wroc.pl
tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl

Praca wykonana w ramach projektu POIG.01.01.02-00-113/09 „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa” realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka Działanie 1.1 Wsparcie badań naukowych dla budowy gospodarki opartej na wiedzy, Poddziałanie 1.1.2 Strategiczne programy badań naukowych i prac rozwojowych.