

Ludwik ANTAL¹, Jan ZAWILAK²

DWUBIEGOWY SILNIK SYNCHRONICZNY — ASPEKTY TECHNICZNE I EKONOMICZNE

Streszczenie: Przedstawiono jeden z typów silnika synchronicznego dwubiegowego z wirnikiem o biegunach wydrotnych i zmienianych liczbach par biegunów pola magnetycznego. Silniki te mają przełączalne uzwojenia w stojanie i wirniku. Ze względu na parametry silniki takie znajdują zastosowanie w urządzeniach o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej. W zastosowaniach do napędów wentylatorów głównego przewietrzania kopalń podziemnych umożliwiają skokową regulację wydajności i jednocześnie znaczne oszczędności energii elektrycznej. Odpowiedni dobór uzwojeń twornika pozwala również złagodzić procesy rozruchowe. Zachowana jest możliwość kompensacji mocy biernej przy pracy na obu prędkościach obrotowych silnika. Koszty inwestycyjne takiego rozwiązania w porównaniu z energoelektronicznymi układami przetwarzającymi napięcie, są znacznie mniejsze. Przytoczono niektóre wyniki badań silnika typu GAe 1510/12p o mocy 1250 kW, wykonane w czasie jego pracy.

A TWO - SPEED SYNCHRONOUS MOTOR — TECHNICAL AND ECONOMICAL ASPECTS

Summary. A two - speed synchronous motor with a salient – pole rotor and windings of changeable pole – pairs number is presented. The motor is equipped with switchable windings in the stator as well as in the rotor. The motor characteristics make it suitable for drives of fan – type machines. Application of this kind of motors as drives of ventilators in underground mines allows for the two – step control of the ventilator output which results in considerable energy savings. A proper choice of rotor winding improves the motor starting current and dynamic torque characteristics. There is a possibility of reactive power compensation at the both motor speeds. The capital cost of such a speed control method is much lower than if an electronic converter were applied. Some results of testing the GAe 1510/12p motor of 1250 kW obtained in its normal operating conditions are given in the paper.

1. WSTĘP

Wentylatory głównego przewietrzania kopalni ze względu na ich moc i ilość mają duży wpływ na zużycie energii elektrycznej, a tym samym koszty kopalni. Źródłem oszczędności może być odpowiednie przystosowanie wydajności wentylatorów do dobowego, miesięcznego i rocznego zapotrzebowania rta powietrza.

Wydajność stacji wentylatorowych można zmieniać przez:

- zmianę liczby pracujących równolegle wentylatorów,
- dławienie przepływu powietrza,
- zmianę ustawienia łopatek aparatu kierowniczego,
- zmianę prędkości obrotowej silników napędzających.

Trzy pierwsze sposoby, stosowane dotychczas, nie zapewniają dostatecznych oszczędności i elastyczności systemu przewietrzania. Wynika to z charakterystyk wentylatora. Zmniejszenie wydajności wentylatora przez zwiększenie oporu przepływu, czyli przejście z punktu 1 do 2 na rysunku 1, powoduje zmniejszenie sprawności (z punktu 1' do 2'). Ze względu na wymagania normy [8], według której wentylator powinien pracować przy sprawności nie mniejszej niż 0,8 sprawności maksymalnej, zakres regulacji tym sposobem jest znacznie ograniczony. Jednocześnie moc wentylatora zmniejsza się nieznacznie (od punktu 1' do 2' – rys.2). Gdy wentylator pracuje w zakresie wydajności odpowiadającej opadającej części charakterystyki sprawności, dławienie przepływu powietrza może spowodować niewielki wzrost sprawności i jednocześnie wzrost mocy wentylatora. Dlatego takie sposoby regulacji wydajności nie prowadzą do oszczędności energii. Istotny zysk energetyczny przy zmniejszeniu wydajności można uzyskać przy praktycznie stałej

¹ Dr hab. Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław, tel. 320 3263, fax 320 3467, lantal@imne.pwr.wroc.pl

² Dr hab. prof. PWr. Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław, tel. 320 2954, fax 320 3467, janzaw@imne.pwr.wroc.pl

sprawności, zmniejszając prędkość obrotową wentylatora (od punktu 1 do 3 i od punktu 1' do 3' – rys. 1 i 2).

Wynika stąd, że ekonomicznie uzasadniona jest regulacja wydajności wentylatora przez zmianę prędkości obrotowej, a tę w napędach elektrycznych prądu przemiennego uzyskuje się przez:

- regulację parametrów napięcia zasilającego (częstotliwości, amplitudy),
- zmianę liczby biegunów pola magnetycznego.

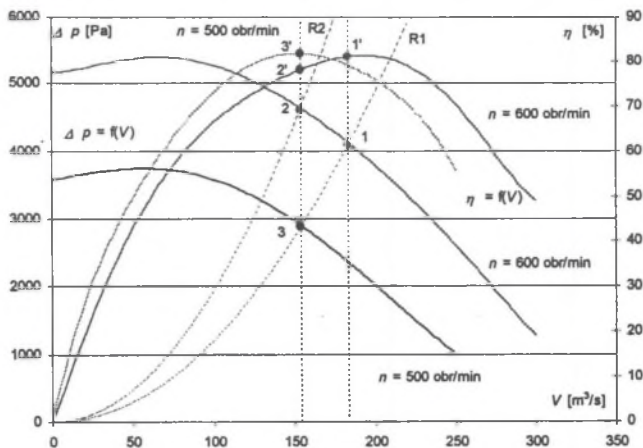
Regulacja parametrów napięcia zasilającego umożliwia zmianę prędkości obrotowej układu napędowego w szerokim zakresie, łagodzi procesy rozruchowe, pozwala na sterowanie procesami hamowania, pozwala dopasować moc silnika do zapotrzebowania maszyny roboczej, ma niskie koszty eksploatacyjne. Związana jest jednak z dużymi kosztami inwestycyjnymi, tj. zakupem urządzeń energoelektronicznych i współpracujących transformatorów. Zastosowanie takiego rozwiązania wymaga często przebudowy budynku rozdzielni.

Zastosowanie wielobiegowych silników napędowych umożliwia skokową regulację prędkości obrotowej (również wydajności i mocy wentylatora). Jest to rozwiązanie o mniejszych możliwościach, spełniające zazwyczaj wymagane warunki pracy wentylatora, a jednocześnie znacznie tańsze od układów przekształtnikowych dużej mocy. Zbudowanie wielobiegowych (dwubiegowych) silników indukcyjnych (szczególnie klatkowych) o odpowiednim stosunku prędkości obrotowych nie sprawia obecnie większych trudności. Jednakże w układach napędowych wentylatorów głównego przewietrzania kopalni powszechnie stosuje się silniki synchroniczne, których dodatkowym zadaniem jest regulacja mocy biernej zakładu.

Ze względu na koszty, służby energetyczne zakładów górniczych decydują się na modernizację istniejących jednobiegowych silników synchronicznych i przystosowanie ich do pracy przy dwóch prędkościach obrotowych.

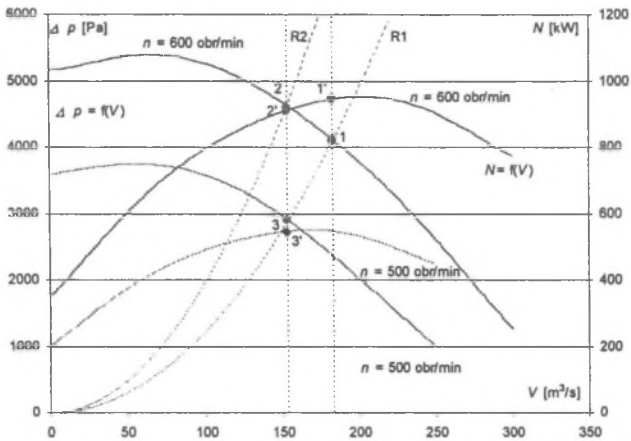
Przebudowa silnika synchronicznego polega na skonstruowaniu i dopasowaniu do istniejącego magnetowodu przełączalnego uzwojenia twornika oraz odpowiedniego przełączania biegunów uzwojenia wzbudzenia przez zabudowanie dodatkowej pary pierścieni ślizgowych. Sposoby konstruowania, obliczania i wykonania takiego silnika opisano w [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Wykazanie zalet jednowozwojonych, dwubiegowych silników synchronicznych do napędu wentylatorów kopalnianych jest celem niniejszej pracy. Obliczono koszty przebudowy silnika i porównano je z ofertami producentów układów przekształtnikowych dużej mocy o napięciu 6 kV.



Rys. 1. Charakterystyki wentylatora – ciśnienie Δp i sprawność η w funkcji wydajności V przy zmianie oporu przepływu R i zmianie prędkości obrotowej n

Fig. 1. Fan performance – ram pressure Δp and efficiency η as a function of flow V at various flow resistances R and rotational speed n



Rys. 2. Charakterystyki wentylatora – ciśnienie Δp i moc N w funkcji wydajności V przy zmianie oporu przepływu R i zmianie prędkości obrotowej n

Fig. 2. Fan performance – ram pressure Δp and power N as a function of flow V at various flow resistances R and rotational speed n

Wykonano badania eksploatacyjne układu napędowego wentylatora ze zmodernizowanym dwubiegowym silnikiem synchronicznym typu GAe 1510/12p o danych znamionowych zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1

Dane znamionowe zmodernizowanego silnika synchronicznego typu GAe1510/12p

przed modernizacją			po modernizacji	
wielkość			2p=10	2p=12
P_n	kW	1250	1050	600
n_n	obr/min	600	600	500
U_n	V	6000	6000	6000
I_n	A	140	120	62
$\cos\varphi_n$	-	0,9poj	0,9poj	1,0
η	-	0,955	0,95	0,93
I_m	A	230	230	230
M_{max}/M_n	-	1,75	---	---
I_r	A	700	670	270

2. KOSZTY MODERNIZACJI SILNIKA SYNCHRONICZNEGO

Rzeczywiste koszty modernizacji silnika synchronicznego typu GAe1510p porównano z cenami zakupu urządzeń oferowanych przez renomowanych producentów układów przekształtnikowych. Wartości względne tych kosztów (odniesione do kosztu przebudowy silnika synchronicznego) zestawiono w tabeli 2. W rozważaniach pominięto istotne koszty związane z pracami budowlanymi, choć większość z proponowanych układów wymaga znacznych dodatkowych powierzchni, np. układ TOSHIBY – 13,2 m², ABB – 12,2 m².

Wszystkie przekształtnikowe układy napędowe są droższe od 2,1 do 5,5 - krotnie niż modernizacja silnika synchronicznego.

Tabela 2

Względne koszty modernizacji układu napędowego z regulacją prędkości obrotowej wentylatorów kopalnianych

Lp.	Oferta	Koszty względne	Silnik	Układ
1	TOSHIBA	5,5	synchroniczny	2 równoległe transformatory, przekształtnik 18-pulsowy
2	ABB	3,8	synchroniczny	Transformatory: podwyższający i obniżający, przekształtnik 6-pulsowy, filtr
3	SIEMENS	2,2	asynchroniczny	Transformator, przekształtnik 6-pulsowy
4	KAPEKO	2,3	asynchroniczny	Transformator, przekształtnik 6-pulsowy
5	HITACHI	5,4	asynchroniczny	2 równoległe transformatory, przekształtnik 12-pulsowy
6	EMAG	2,1	asynchroniczny	Tyrystorowa kaskada podsynchroniczna

3. WYNIKI POMIARÓW

Badany silnik napędza wentylator o następujących parametrach znamionowych:

- wydajność 183,411 m³/s,
- spiętrzenie 4120 Pa,
- sprawność 86 %.

Przy prędkości obrotowej 600 obr./min i całkowicie otwartym aparacie kierowniczym wentylator miał wydajność 240 m³/s, a silnik pobierał moc czynną 975 kW. Przy prędkości obrotowej 500 obr./min i całkowicie otwartym aparacie kierowniczym wentylator miał wydajność 195 m³/s, a silnik pobierał moc czynną 583 kW. Tak więc różnica mocy pobieranej po zmianie prędkości obrotowej wyniosła 392 kW.

Z analizy zapotrzebowania na powietrze wynika, że niższa prędkość obrotowa będzie wykorzystywana codziennie w dni robocze - w czasie jazdy ludzi (3 godz./dobę) i w czasie rewizji szybu (3 godz./dobę), w soboty (8 godz.), oraz wszystkie niedziele i święta. Liczba godzin pracy napędu wentylatora przy obniżonej prędkości obrotowej w ciągu roku wyniesie 2583 godziny. Wynika stąd, że roczna oszczędność energii z pracy jednego silnika synchronicznego typu GAe-1510/12p to 1 025 451 kWh.

Charakterystyki wentylatora przy dla dwóch prędkości obrotowych przedstawia rysunek 3. Przy mniejszej prędkości obrotowej wentylator pracuje z większą sprawnością, natomiast silnik z minimalnie mniejszą.

Sprawność silnika dla obu prędkości obrotowych i dwóch stanów obciążenia (aparat kierowniczy całkowicie otwarty i całkowicie zamknięty) zestawiono w tabeli 3.

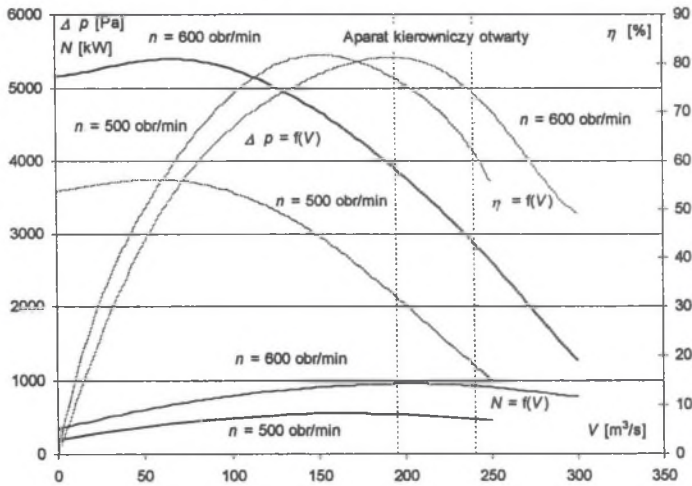
Zakres kompensacji mocy biernej zbadano mierząc krzywe V dla obu prędkości obrotowych (rys.4). Dla mniejszej prędkości obrotowej minimum krzywej V odpowiadające $\cos\varphi = 1$ przesuwa się w stronę większych wartości prądu wzbudzenia. Zjawisko to wynika z celowo silnie odkształconego pola wzbudzenia, w którym podstawowa harmoniczna indukcji dla tej prędkości wynosi 53% indukcji maksymalnej. Konsekwencją tej sytuacji jest niestabilna praca przy przewzbudzeniu maszyny.

Tabela 3

Sprawność silnika dwubiegowego GAe1510/12p

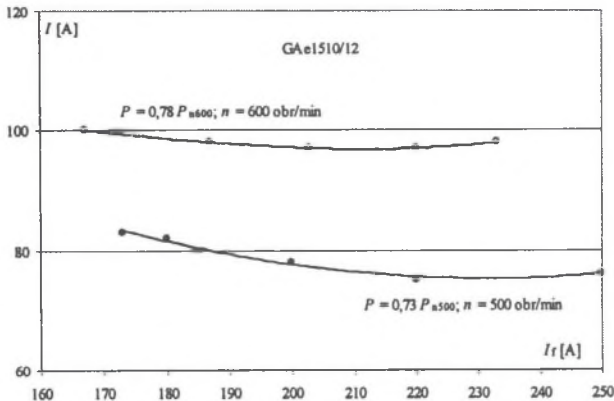
n	Aparat kierowniczy otwarty			Aparat kierowniczy zamknięty		
	N	P	η	N	P	η
obr/min	kW	kW	-	kW	kW	-
500	540	583	0,93	202	288	0,70
600	925	975	0,95	349	375	0,93

Jednakże maszyna pracuje stabilnie przy $\cos\varphi = 1$, co jest dopuszczalne w warunkach zmniejszonego obciążenia zakładu, a właśnie w takich warunkach będzie zmniejszana wydajność przepływu powietrza przez zmniejszenie prędkości obrotowej.



Rys. 3. Spiętrzenie Δp , moc N i sprawność η w funkcji wydajności V wentylatora przy zmianie prędkości obrotowej n z 600 na 500 obr/min

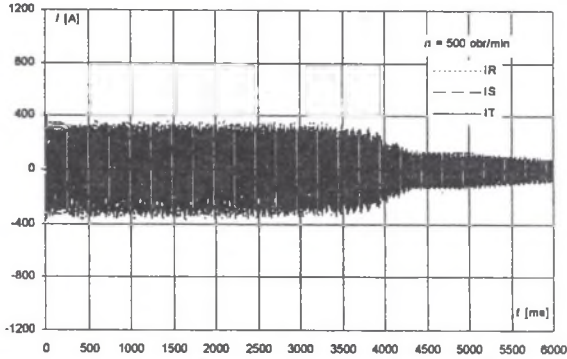
Fig. 3. Ram pressure Δp , power N and efficiency η as a function of flow V at various rotational speeds n (600 and 500 rpm)



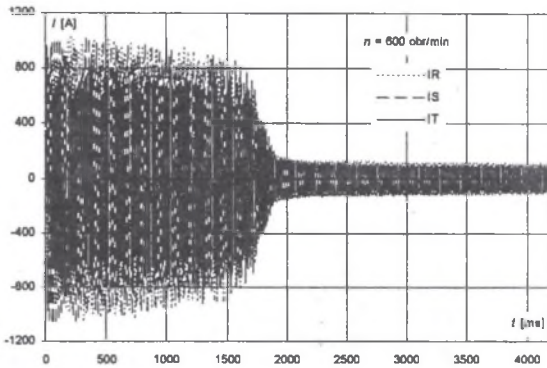
Rys. 4. Krzywe V zmierzone przy otwartym aparacie kierowniczym i dwóch różnych prędkościach obrotowych
Fig. 4. „ V ” curves measured at open guide apparatus and two different rotational speeds

Rejestracja przebiegów prądów w czasie rozruchu dwubiegowego silnika synchronicznego wykazała, że prąd rozruchowy dla mniejszej prędkości jest 2,5 - krotnie mniejszy niż dla prędkości większej (rys. 5 i 6).

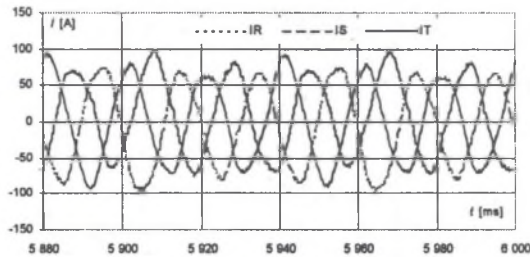
Analiza harmoniczna zarejestrowanych przebiegów prądów i napięcia wykazała, że dla prędkości większej są to przebiegi praktycznie sinusoidalne. Natomiast dla mniejszej prędkości prądy twornika są silnie odkształcone (rys. 7), przy napięciu zbliżonym do sinusoidalnego (rys. 8). Wartości harmonicznych prądu zestawiono w tabeli 4, a harmonicznych napięcia w tabeli 5.



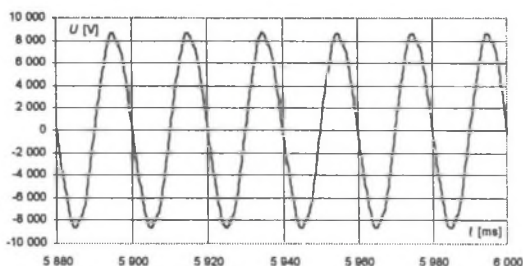
Rys. 5. Przebieg prądów twornika w czasie rozruchu asynchronicznego maszyny do prędkości 500 obr/min
 Fig. 5. Transients of starting currents at $n = 500$ obr/min



Rys. 6. Przebieg prądów twornika w czasie rozruchu asynchronicznego maszyny do prędkości 600 obr/min
 Fig. 6. Transients of starting currents at $n = 600$ obr/min



Rys. 7. Przebiegi prądów twornika przy pracy ustalonej z prędkością 500 obr/min
 Fig. 7. Transients of stator currents at $n = 500$ obr/min



Rys. 8. Przebieg napięcia zasilającego przy pracy ustalonej z prędkością 500 obr/min

Fig. 8. Supply voltage wave form at $n = 500$ obr/min

Tabela 4

Harmoniczne prądu twornika
($n = 500$ obr/min)

n	f	I	
	Hz	A	%
2	16,67	13,3	16,63
4	33,33	4,8	6,00
6	50,00	80	100,00
8	66,67	1,2	1,50
10	83,33	0,2	0,25
12	100,00	0,3	0,38
14	116,67	1,1	1,38
16	133,33	6,4	8,00
22	183,33	0,4	0,50

Tabela 5

Harmoniczne napięcia
zasilającego ($n = 500$ obr/min)

n	f	U	
	Hz	V	%
2	16,67	4	0,07
4	33,33	9	0,15
6	50,00	5895	100,00
8	66,67	17	0,29
16	133,33	18	0,31
18	150,00	40	0,68

4. PODSUMOWANIE

Badany silnik synchroniczny dwubiegowy typu GAe 1510/12p jest najmniejszym i najtrudniejszym w realizacji z wszystkich zmodernizowanych silników do napędu wentylatorów przewietrzania kopalni miedzi. Zamodelowanie 12-biegunowego pola wzbudzenia w wirniku 10-biegunowym wymagało odłączenia dwóch biegunów przy pracy z mniejszą prędkością obrotową. W wyniku tych działań efektywny prąd wzbudzenia jest mniejszy, co wpływa na zakres kompensacji mocy biernej i wartość momentu maksymalnego dla mniejszej prędkości obrotowej (500 obr/min). Silnik ten pokrywa zapotrzebowanie mocy wentylatora dla tej prędkości obrotowej, pozwala na kompensację mocy biernej przy większej prędkości, łagodzi procesy rozruchowe układu napędowego. Jego przebudowa jest tańsza od alternatywnych napędów przekształtnikowych. Roczna oszczędność energii elektrycznej z tytułu zastosowania mniejszej prędkości obrotowej przekracza 10^5 kWh. Wstępne badania zmodernizowanych silników o mocach 1600 i 3150 kW sugerują, że oszczędności energii dla tych maszyn będą relatywnie większe, a ich cechy eksploatacyjne, lepsze.

LITERATURA

1. Antal L., Zawilak J.: Pole magnetyczne dwubiegowego silnika synchronicznego z wirnikiem o biegunach jawnych, - mat. konf. XXX Symp. Maszyn Elektr., Kazimierz 1994.
2. Antal L., Zawilak J.: Silnik synchroniczny jawnobiegunowy o dwóch prędkościach obrotowych, mat. konf. XXXI Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Ustroń 1995.
3. Antal L., Zawilak J.: Pole magnetyczne synchronicznego silnika jawnobiegunowego o dwóch prędkościach obrotowych, Zagadnienia maszyn i napędów elektrycznych, 1996, Prace Nauk. Instytutu Maszyn i Napędów Elektrycz. PWr. nr 45, Studia i Materiały nr 19.
4. Antal L., Zawilak J.: Torque of two-speed synchronous motor, - mat. konf. XXXIV Symp. Maszyn Elektr. Łódź 1998.
5. Antal L., Zawilak J.: Kompensacja mocy biernej silnikiem synchronicznym, dwubiegowym o ułamkowym stosunku prędkości, Prace Nauk. Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycz. PWr. nr 48, Studia i Materiały nr 20 - mat. konf. XXXVI Symp. Maszyn Elektr., Szklarska Poręba 2000.
6. Zawilak J.: Projektowanie trójfazowych uzwojeń ułamkowo-żłobkowych, Pr. Nauk. Inst. Układów Elektromasz. PWr. Nr 43 seria SiM nr 18, 1993.
7. Zawilak J.: Uzwojenia zmiennobiegunowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Pr. Nauk. Inst. Układów Maszynowych PWr. nr 37 seria M. nr 7, Wrocław 1986.
8. PN -70/G-04161 Wentylatory kopalniane główne. Badania podstawowych parametrów pracy.

Recenzent: Dr hab. inż. Maria Dems
Profesor Politechniki Łódzkiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 marca 2001 r.

Abstract

A two - speed synchronous motor with a salient – pole rotor and windings of changeable pole - pairs number is presented. The GAe 1510/12p motor of 1250 kW is equipped with switchable windings in the stator as well as in the rotor. The motor characteristics make it suitable for drives of fan – type machines. Application of this kind of motors as drives for ventilators in underground mines permits the two – step control of the ventilator output which results in considerable energy savings. Curves of ram pressure Δp , power N and efficiency η as a function of flow V at rotational speeds $n = 600$ and 500 rpm show this effect (Fig. 3). The capital cost of such a speed control method is much lower than if an electronic converter were applied (Table 2). There is a possibility of reactive power compensation at the both motor speeds. „V” curves measured at open guide apparatus and two different rotational speeds are presented in Fig. 4. A proper choice of rotor winding improves the motor starting current and dynamic torque characteristics. Some results of testing the GAe 1510/12p motor of 1250 kW obtained in its normal operating conditions are given in the paper. The transients of starting currents at $n = 500$ obr/min and $n = 500$ obr/min are shown in Figs. 5 and 6. The stator currents and supply voltage wave form at $n = 500$ obr/min are given in Figs. 7 and 8.

