

*maszyny elektryczne, silniki synchroniczne,
magnesy trwałe, napędy pomp, sprawność*

Szymon LIPIŃSKI, Jan ZAWILAK*

ENERGOOSZCZĘDNE SILNIKI ELEKTRYCZNE W NAPĘDACH POMP WIROWYCH

W pracy przedstawiono model silnika wzbudzanego magnesami trwałymi, który może być zastosowany jako napęd pompy w głównej stacji odwodnienia kopalni podziemnej. Porównano właściwości i parametry zamodelowanej maszyny i energooszczędnego silnika indukcyjnego. Obliczono punkty pracy pompy w przypadku zastosowania obu typów napędów oraz porównano wartości charakterystyczne opisujące pracę stacji pomp. Na podstawie wyników obliczeń wykazano korzyści wynikające z zastosowania silników nowego typu zamiast maszyn indukcyjnych do napędu pomp.

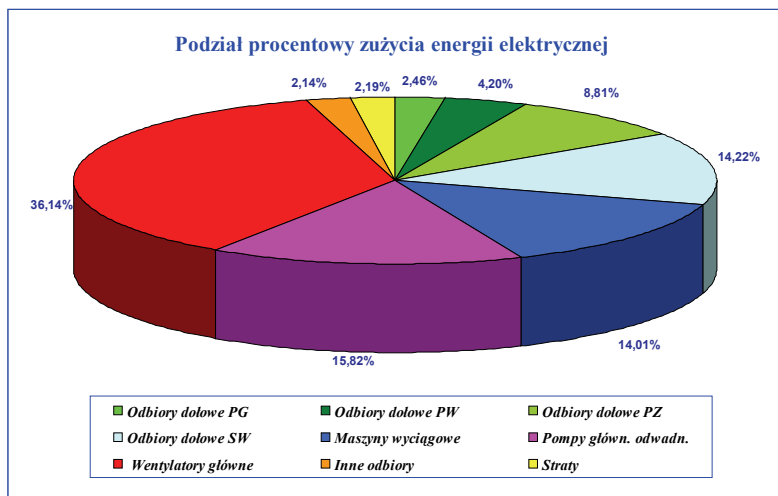
1. WSTĘP

Duże zużycie energii w procesach produkcyjnych powoduje wzrost kosztów eksploatacyjnych oraz większe zapotrzebowanie w systemie elektroenergetycznym. Związane to jest również z większym zanieczyszczeniem środowiska spowodowanym zwiększoną emisją CO₂. W wielu zakładach produkcyjnych zainstalowane są pompy i wentylatory, których zużycie energii elektrycznej stanowi duży procent poboru energii. Przykładem jest kopalnia podziemna, w której pompy i wentylatory pobierają ok. 52% zużywanej energii elektrycznej (rys. 1). Do napędu tych urządzeń stosowane są silniki elektryczne o niezadowalających parametrach eksploatacyjnych. Najczęściej są to silniki indukcyjne. Przy pracy ciągłej tych urządzeń nawet niewielkie zwiększenie parametrów eksploatacyjnych napędu powoduje duże oszczędności energii. Dlatego wiele ośrodków badawczych zajmuje się poszukiwaniami nowych, energooszczędnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn elektrycznych.

Celem pracy jest poszerzenie wiedzy nt. energooszczędnych układów napędowych z silnikami elektrycznymi o nowych strukturach obwodów magnetycznych wzbudza-

* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wydział Elektryczny, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: szymon.lipinski@pwr.edu.pl, jan.zawilak@pwr.edu.pl

nych magnesami trwałymi, których wdrożenie pozwoli na znaczne zmniejszenie zużycia energii.



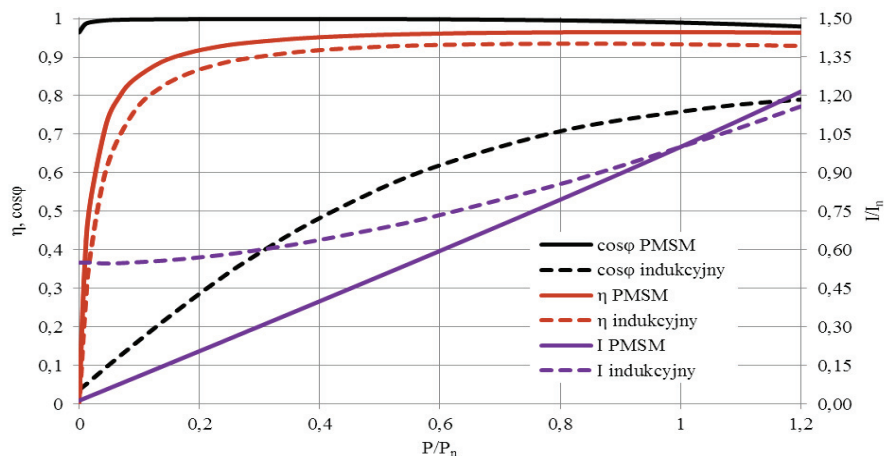
Rys. 1. Podział zużycia energii elektrycznej w kopalni podziemnej

Nowe maszyny elektryczne powinny mieć nie gorsze właściwości eksploatacyjne od obecnie stosowanych silników indukcyjnych a mianowicie łatwy rozruch oraz dużą niezawodność działania. Ponadto silniki te powinny być przystosowane do zmiennego trybu pracy napędów (wentylatorów i pomp) i umożliwiać skokową lub ciągłą regulację prędkości obrotowej pozwalającą na racjonalizację zużycia energii. W wielu publikacjach pokazano budowę i konstrukcję silników synchronicznych wzbudanych magnesami trwałymi, przystosowanymi do rozruchu bezpośredniego spełniających te wymagania.

2. PORÓWNANIE SILNIKA SYNCHRONICZNEGO WZBUDZANEGO MAGNESAMI TRWAŁYMI Z WYSOKOSPRAWNYM SILNIKIEM INDUKCYJNYM

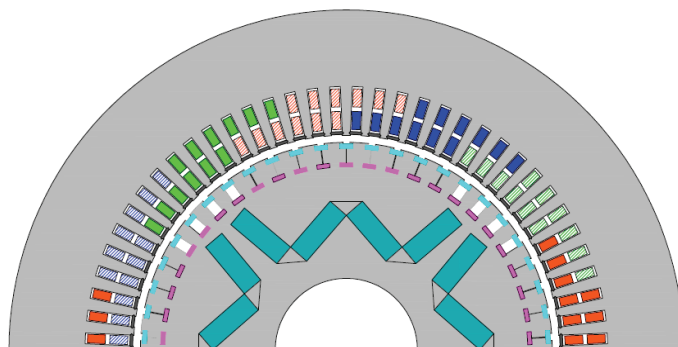
W wielu ośrodkach badawczych opracowywane i doskonalone są konstrukcje silników synchronicznych z magnesami trwałymi, które mają bardzo dobre właściwości statyczne i dynamiczne. Dzięki możliwości rozruchu bezpośredniego (przez bezpośrednie przyłączenie napięcia) stanowią obiecującą alternatywę zastosowań praktycznych dla powszechnie stosowanych silników indukcyjnych. Ich zaletą jest większa sprawność i praca ze współczynnikiem mocy bliskim jedności [3]–[5]. Badania prowadzono zaczynając od małych mocy, następnie zbudowano silniki średniej mocy

(160 kW, 500 V) a ostatecznie doświadczenia praktyczne dotyczą silników bardzo dużej mocy (1000 kW, 500 obr/min, 6000 V w napędach wentylatorów głównych kopalni podziemnej). Na rysunku 2 zestawiono charakterystyki obciążenia porównywalnych silników: indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi [6], [7].



Rys. 2. Porównanie charakterystyk silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi

Bardzo interesujące jest zastosowanie takich silników w napędach pomp dużej mocy, w których obecnie stosowane są silniki indukcyjne klatkowe.

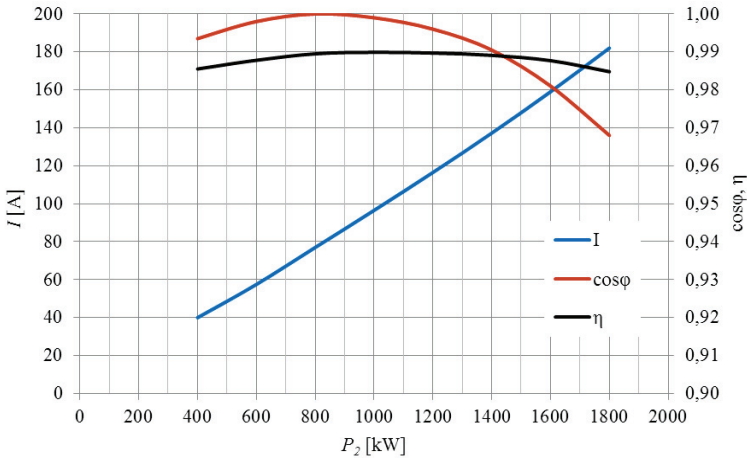


Rys. 3. Schemat poprzeczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Wykorzystując metody obliczeń MES opracowano konstrukcję silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi do napędu pompy dużej mocy np. pompy głównego odwodnienia kopalni. Przekrój poprzeczny modelu obliczeniowego pokazano na rysunku 3. W wirniku silnik ten ma zabudowane uzwojenia dwuklatkowe o specjalnym rozkładzie i rozmiarach prętów zapewniające uzyskanie odpowiedniej

charakterystyki rozruchowej momentu (również odpowiedni moment synchronizujący) oraz minimalizację prądu rozruchowego. Neodymowe magnesy trwałe typu N42SH umieszczone są wewnątrz wirnika w grupach w kształcie litery **W**. Obliczone wykresy charakterystyk obciążenia tego silnika pokazano na rysunku 4.

Do napędu analizowanej pompy zastosowany może być alternatywnie silnik indukcyjny typu Sh 560 H4A, który oferowany jest jako najnowszy, energooszczędny wyrób fabryki. Parametry eksploatacyjne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (obliczone) oraz indukcyjnego typu Sh 560 H4A (z katalogu fabrycznego) zestawiono w tabeli 1.



Rys. 4. Charakterystyki obciążenia silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Tabela 1. Zestawienie parametrów silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i energooszczędnego indukcyjnego typu Sh 560 H4A

Typ silnika	U_n	n_n	P_n	I_n	$\cos\varphi$	η
	V	obr/min	kW	A	–	–
Synchroniczny z magnesami trwałymi	6 000	1500	1600	159	0,98	0,988
Indukcyjny Sh 560 H4A	6 000	1495	1600	178	0,89	0,976

3. ANALIZA PRACY UKŁADU POMPOWEGO

W pracy analizowana jest praca zespołu pompowego jednej z kopalń podziemnych (rys. 5) przy założeniu, że pompy napędzane są alternatywnie silnikami energooszczęd-

czędnymi: synchronicznymi wzbudzonymi magnesami trwałymi lub indukcyjnymi. Ponieważ prędkości obrotowe układu pompowego napędzanego silnikiem asynchronicznym i synchronicznym są różne to wyznaczono parametry pracy układu pompowego też są różne i wyznaczono je dla obu przypadków.

Do obliczeń założono prosty układ pompowy przedstawiony na rysunku 6, w którym przyjęto: geometryczną wysokość podnoszenia $H_z = 720$ m, długość rurociągu $l = 1000$ m, średnicę rurociągu $d = 300$ mm, chropowatość rury $e = 1$ mm. Duża chropowatość e wynika z faktu wieloletniej eksploatacji tego układu i osadzania się kamienia na ściankach rury. Analizowany układ składa się z pompy wirowej typu HK200 750×8 napędzanej przez silnik indukcyjny bądź synchroniczny z magnesami trwałymi.



Rys. 5. Widok wielostopniowej pompy odśrodkowej w głównej stacji odwadniania kopalni

Do wyznaczenia punktu pracy układu pompowego niezbędna jest znajomość charakterystyki rurociągu, która obliczonej z zależności:

$$H = H_z + \Delta h, \quad (1)$$

w której Δh jest wysokością strat ciśnienia wynikającą z przepływu cieczy. Wyraża się ona równaniem według metody Darcy'ego–Weisbacha [2]

$$\Delta h = rQ^2 + mQ^2. \quad (2)$$

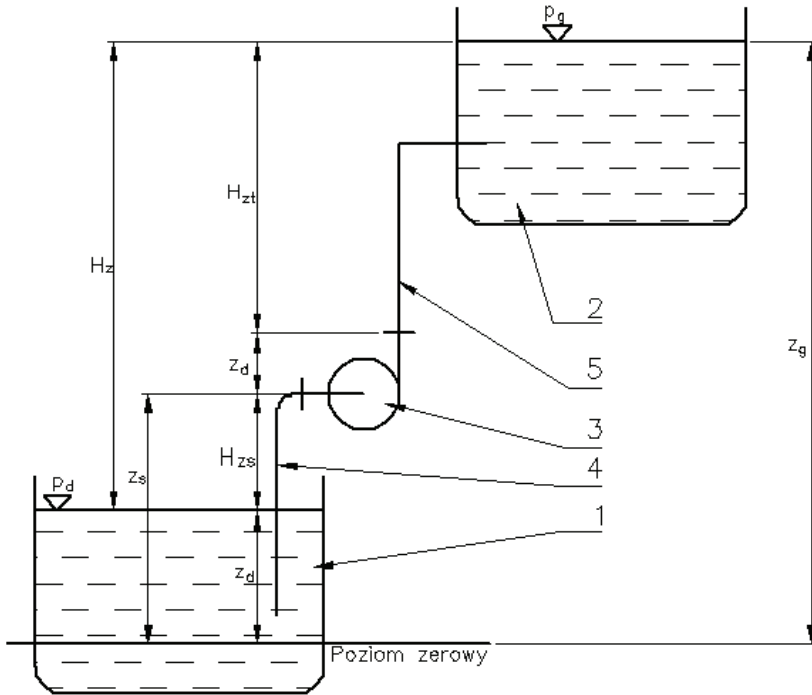
Wartości r oraz m są to zastępcze współczynniki oporów liniowych i miejscowych natomiast symbolem Q oznaczono przepływ cieczy. Opory miejscowe powstają na przeszkodach w rurociągu takich jak zawory, filtry, zwężki pomiarowe itp. Opory

liniowe powstają w wyniku tarcia płynu o ścianki rurociągu. W rozpatrywanym rurociągu pominięto wyznaczanie oporów miejscowych.

Wysokości strat ciśnienia można również obliczyć zależnością (3) przyjmując odpowiednio większą długości rurociągu

$$\Delta h = \lambda \frac{16l}{2\pi^2 g d^5} Q^2, \quad (3)$$

w której g – przyspieszenie ziemskie, λ – współczynnik strat liniowych.



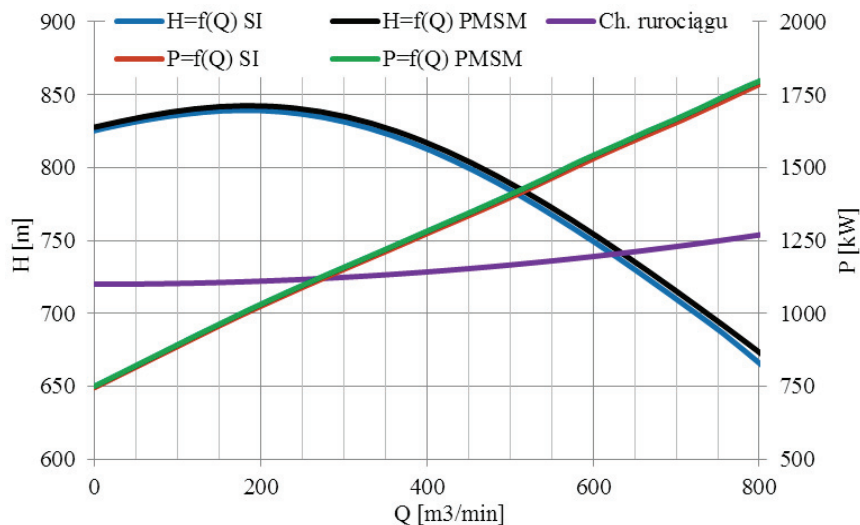
Rys. 6. Schemat analizowanego układu pompowego:

1 – zbiornik dolny, 2 – zbiornik górny, 3 – zestaw pompowy, 4 – rurociąg ssawny, 5 – rurociąg tłoczny

Współczynnik strat liniowych można obliczyć z wzoru Colebrooka–White’a

$$\lambda = \left(-2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{e}{3,72} \right) \right)^{-2}. \quad (4)$$

Efektem iteracyjnych obliczeń jest wyznaczenie charakterystyk rurociągu pokazanych na rysunku 7.



Rys. 7. Charakterystyki układu pompowego napędzanego silnikiem indukcyjnym oraz synchronicznym z magnesami trwałymi

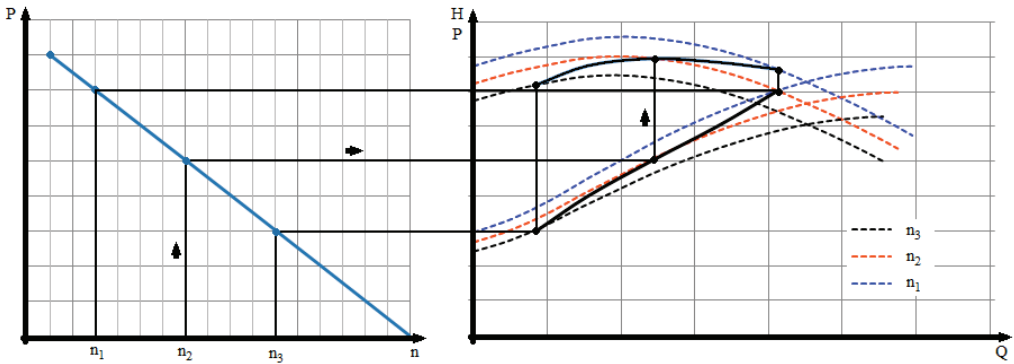
Punkt pracy zespołu dla obu typów silników napędowych wyznaczono z obliczonych charakterystyk przedstawionych na rysunku 7 [1]. W obliczeniach wykorzystano charakterystykę pompy typu HK200-750×8 podaną przez jej producenta. Zgodnie z powszechnie znanymi zależnościami, zmianę prędkości obrotowej układu można uwzględnić wg następujących zależności:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2, \quad (6)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3. \quad (7)$$

Podczas pracy układu napędzanego silnikiem synchronicznym przyjęto stałą (synchroniczną) prędkość obrotową. Obliczanie charakterystyki zestawu pompowego napędzanego silnikiem indukcyjnym jest bardziej złożone. Zmiana obciążenia powoduje zmianę prędkości obrotowej a to skutkuje pracą przy innych parametrach układu pompowego. Sposób wykreślania charakterystyk roboczych zespołu pompowego dla różnych prędkości obrotowych pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Sposób wyznaczania charakterystyki zespołu pompowego napędzanego silnikiem indukcyjnym

4. ZUŻYCIE ENERGII I EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA ZESTAWU POMPOWEGO

Zużycie energii elektrycznej można obliczyć na podstawie charakterystyki zestawu pompowego (rys. 7). Punkt pracy zestawu pompowego (wysokość pompowania cieczy H i przepływu Q) określa się jako punkt przecięcia się charakterystyki rurociągu z charakterystyką wysokości pompowania zestawu. Dla wyznaczonego natężenia przepływu Q , moc P_s pobieraną przez pompę odczytuje się z charakterystyki mocy. Wyznaczoną moc pobieraną przez pompę P_s należy podzielić przez współczynnik sprawności silnika napędowego i dodać straty elektryczne w układzie zasilającym. Obliczona moc elektryczna pobierana przez zespół napędowy wynosi

$$P_{el} = \frac{P_s}{\eta} + RI^2. \quad (8)$$

Jednostkowe zużycie mocy elektrycznej, tj. moc potrzebna do wypompowania 1 m^3 wody wyraża się zależnością

$$e_j = \frac{P_{el}}{Q}. \quad (9)$$

W pracy podjęto próbę obliczenia efektywności wynikającej z zastosowania silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o większej sprawności.

Na podstawie informacji uzyskanych u producentów maszyn elektrycznych cena silnika synchronicznego z magnesami trwałymi jest większa o ok. 50 000 zł od porównywalnego energooszczędnego silnika indukcyjnego.

Objętość wody, która musi być wypompowana by skompensować dodatkowe koszty zakupu silnika synchronicznego i opłatę za zużyta energię, opisana jest zależnością

$$V = \frac{50000}{(e_{j1} - e_{j2})c} \quad (10)$$

w której e_{j1} , e_{j2} – jednostkowe zużycie energii dla silnika indukcyjnego oraz synchronicznego, c – koszt energii elektrycznej (przyjęto cenę energii elektrycznej w KGHM Polska Miedź równą 0,26 zł/kWh).

Przepływy w obu zestawach są różne dlatego czasy potrzebne do wypompowania określonej objętości cieczy są inne dla napędu z silnikiem indukcyjnym oraz silnikiem synchronicznym. Czasy te można obliczyć z zależności:

$$t_i = \frac{V}{Q_i} \quad (11)$$

W tabeli 2 pokazano obliczone czasy pracy zestawów pompowych potrzebne na wypompowanie określonej objętości cieczy. Zastosowanie silnika synchronicznego z magnesami trwałymi zmniejsza jednostkowe zużycie energii ok. 1,5% a jednocześnie sprawność zestawu pompowego wzrasta o 0,3 punktu procentowego.

Tabela 2. Obliczenie czasu wypompowania określonej objętości cieczy przez zestawy pompy z różnymi silnikami napędowymi

Rodzaj silnika	Q	H	P_{el}	η_{pompy}	e_j	t	V
	m ³ /h	m	kW	%	kWh/m ³	h	m ³
Indukcyjny Sh 560 H4A	623,0	740,5	1612	80,8	2,60	7447	4 639 627
Synchroniczny z magnesami trwałymi	635,5	741,3	1618	81,1	2,55	7301	

5. WNIOSKI

Na podstawie wyników obliczeń można stwierdzić, że zastosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi umożliwia uzyskanie znacznych oszczędności energii elektrycznej w procesie pompowania cieczy.

Zastosowany silnik synchroniczny z magnesami trwałymi pobiera mniejszy prąd o ok. 8% ($\cos\varphi \approx 1$, $\eta = 0,988$) od silnika indukcyjnego. Uwzględniając straty

w transformatorze oraz straty przesyłu energii elektrycznej (linia kablowa długości około 1500 m) zastosowanie silnika synchronicznego zmniejsza straty całkowite o ok. 16%.

Należy zwrócić uwagę, że kablami szybowymi, przy takim samym ich wykorzystaniu można przesłać większą moc czynną do podziemi kopalni.

LITERATURA

- [1] JEŃDRAŁ W., *Pompy Wirowe*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [2] SKOWROŃSKI M., *Układy pompowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
- [3] ZAWILAK J., ZAWILAK T., *Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim*, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechniki Wrocławskiej, 2013.
- [4] ZAWILAK T., *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 2013, Vol. 89, No. 2b, 177–179.
- [5] ZAWILAK J., ZAWILAK T., *Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi*, *Napędy i Sterowanie*, 2014, vol. 16, nr 2, 102–105.
- [6] ZAWILAK J., ZAWILAK T., *Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim*, *Górnictwo Odkrywkowe*, 2014, vol. 55, nr 1, 29–33.
- [7] ZAWILAK J., ZAWILAK T., *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 2014, vol. 90, nr 1, 224–226.

ENERGY-SAVING ELECTRIC MOTORS AS A DRIVE OF CENTRIFUGAL PUMPS

In this paper is presented model of permanent magnet synchronous motor suitable for drive of pump in main mine's pump station. Properties of modelled machine are compared to energy-saving induction motor. There are presented calculations of operating point for both types of drive and characteristic values of process of pumping are compared. On the basis of given results are presented advantages of application PMSM instead of high-efficient induction motor.