

Szymon Lipiński, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ANALIZA PRACY STACJI GŁÓWNEGO ODWODNIENIA KOPALNI Z ENERGOOSZCZĘDNYMI SILNIKAMI O MAGNESACH TRWAŁYCH

ANALYSIS OF OPERATING POINT MINE'S MAIN PUMP STATION WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Streszczenie: Przedstawiono możliwości budowy i zastosowania silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi do napędów pomp dużej mocy np. w pompowniach głównego odwodnienia kopalni podziemnej. Porównano parametry eksploatacyjne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i energooszczędnego silnika indukcyjnego. Wykazano korzyści wynikające z zastosowania tego typu silników w napędach pomp w porównaniu do najlepszych energetycznie silników indukcyjnych. Zbadano wpływ zastosowania silników energooszczędnych na pracę istniejącej stacji pomp.

Abstract: In this paper is presented opportunity of deployment permanent magnet synchronous motor as a drive of high power centrifugal pump, e.g. in pump station for underground mining. Operating properties of PMSM and energy-saving asynchronous motor are collated. Profits of application PMSM as a pump drive are shown in comparison to the best high-performance induction motor. Influence of application PMSM as a drive in running pump station is investigated.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, silniki synchroniczne, magnesy trwałe, napędy pomp, sprawność*
Keywords: *electrical machines, synchronous motors, permanent magnets, drive of pump, efficiency*

1. Wstęp

Duże zużycie energii w procesach produkcyjnych powoduje wzrost kosztów oraz uszczuplenie zasobów mocy w systemie elektroenergetycznym. Związane to jest jednocześnie z większym zanieczyszczeniem środowiska spowodowanym zwiększoną emisją CO₂. W wielu zakładach produkcyjnych zainstalowane są pompy i wentylatory. Do napędu tych urządzeń zastosowane są silniki elektryczne o niezadowalającej sprawności. Najczęściej są to silniki indukcyjne. Przy dużej ilości tego typu urządzeń o pracy ciągłej, już niewielkie zwiększenie sprawności napędu sumarycznie pozwoli na 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 wzbudzanych magnesami trwałymi, których wdrożenie pozwoli na znaczne zmniejszenie zużycia energii.

Poszukiwanie nowych struktur maszyn elektrycznych zdeterminowane jest postawionym celem, a mianowicie uzyskaniem niezawodnych napędów energooszczędnych. Zbudowa-

nie silników napędowych o sprawności większej niż sprawność obecnie stosowanych energooszczędnych silników indukcyjnych wymaga użycia w ich strukturach nowoczesnych materiałów, a w szczególności magnesów trwałych. Ponadto silniki powinny być przystosowane do zmiennego trybu pracy napędów tzn. umożliwiać skokową lub ciągłą regulację prędkości obrotowej pozwalającą na racjonalizację zużycia energii. Niezawodność silników powinna być nie mniejsza i eksploatacja nie gorsza od silników indukcyjnych co oznacza możliwie najprostszą konstrukcję poszukiwanych nowych struktur maszyn elektrycznych.

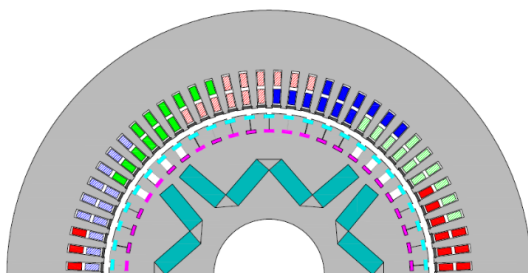
2. Porównanie silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi z wysokosprawnym silnikiem indukcyjnym

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 dla powszechnie stosowanych silników indukcyjnych. Ich zaletą jest większa sprawność i praca ze współczynnikiem mocy bliskim jedności

[3, 4, 5]. Do chwili obecnej wyprodukowano kilka egzemplarzy silników synchronicznych z magnesami trwałymi dużej mocy (ok. 1000 kW, 500 obr/min) z rozruchem bezpośrednim [6, 7]. Zastosowano je do napędów wentylatorów głównego przewietrzania w kopalni węgla kamiennego. Bardzo interesujące jest zastosowanie takich silników w napędach pomp dużej mocy, w których obecnie stosowane są silniki indukcyjne klatkowe.

Na podstawie obliczeń opracowano konstrukcję silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi do napędu pompy dużej mocy np. pompy głównego odwodnienia kopalni. Przekrój poprzeczny modelu silnika pokazano na rysunku 1. 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. Magnesy trwałe umieszczone wewnątrz wirnika w grupach w kształcie litery W. Są to magnesy neodymowe o oznaczeniu N42SH.

Do napędu analizowanej pompy zastosowany może być alternatywnie silnik indukcyjny typu Sh 560 H4A, który oferowany jest jako najnowszy, energooszczędny wyrób fabryki. Wyniki obliczeń parametrów technicznych silnika synchronicznego z magnesami trwałymi oraz indukcyjnego typu Sh 560 H4A zestawiono w tabeli 1.

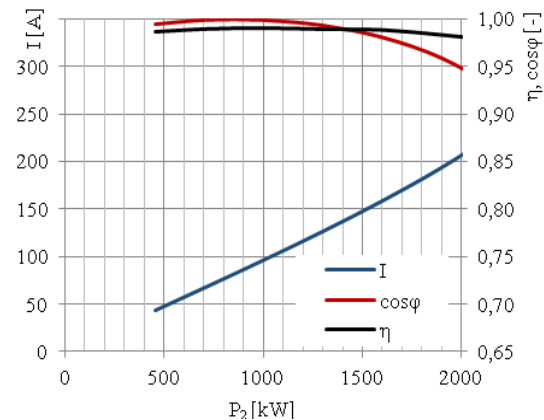


Rys. 1. Model symulacyjny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Na rysunku 2 pokazano obliczone charakterystyki obciążenia silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Z przedstawionych wykresów współczynnika mocy i sprawności wynika, że ich wartości są duże i praktycznie niezależne od obciążenia. Maksymalna wartość współczynnika mocy wynosi $\cos\phi=1$.

Tabela 1 Zestawienie parametrów silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i energooszczędnego indukcyjnego

typ silnika	n_n	P_n	I_n	$\cos\phi$	η
	obr/min	kW	A	-	-
synchroniczny z magnesami trwałymi	1500	1600	159	0,98	0,988
indukcyjny Sh 560 H4A	1495	1600	178	0,89	0,976



Rys. 2. Charakterystyki obciążenia silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

3. Analiza pracy układu pompowego

W pracy analizowano pracę zespołu pompowego jednej z kopalń podziemnych. W analizie pracy układu pompowego uwzględniono napęd za pomocą silnika synchronicznego z magnesami trwałymi oraz energooszczędnego silnika indukcyjnego. Ponieważ prędkości obrotowe układu pompowego są różne przy napędzaniu silnikiem asynchronicznym i synchronicznym dlatego wyznaczono parametry pracy układu pompowego przy napędzie obu typów silników.

Do obliczeń założono prosty układ pompy przedstawiony na rysunku 3, w którym przyjęto: geometryczną wysokość podnoszenia $H_z=720$ m, długość rurociągu $l=1000$ m, średnica 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 HK200-750x8 napędzanej przez silnik indukcyjny bądź synchroniczny z magnesami trwałymi.

Do wyznaczenia punktu pracy układu pompowego niezbędna jest znajomość charakterystyki rurociągu, która wyznaczana jest następująco:

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

gdzie Δh to wysokość strat ciśnienia wynikająca z przepływu cieczy i wyraża się równaniem (2) według metody Darcy'ego-Weisbacha [2]

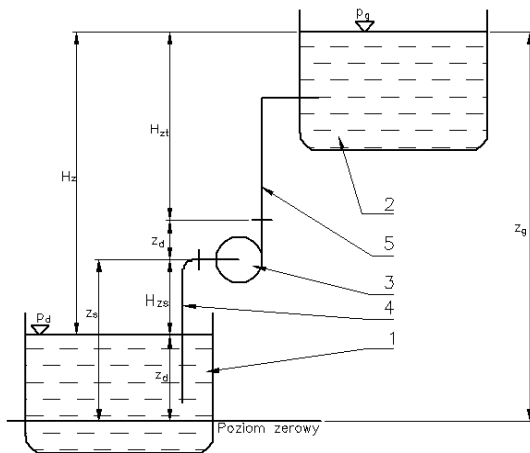
$$\Delta h = rQ^2 + mQ^2 \quad (2)$$

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.

Podobny wynik obliczenia wysokości start ciśnienia można uzyskać przez przyjęcie odpowiednio większej długości rurociągu i może być wyznaczony z wzoru:

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

w którym: g – przyspieszenie ziemskie, λ – współczynnik strat liniowych.

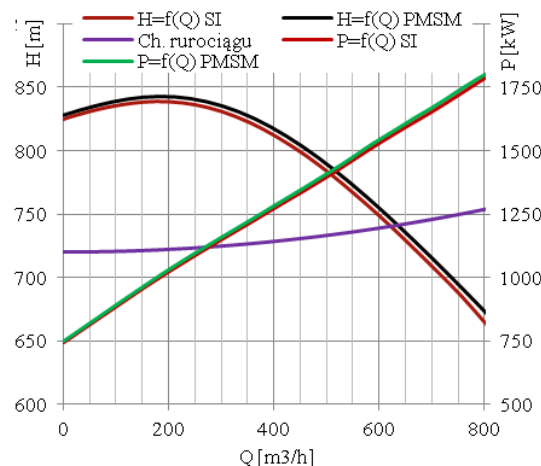


Rys. 3. Schemat analizowanego układu pompowego: 1 – zbiornik dolny, 2 – zbiornik górny, 3 – zestaw pompowy, 4 – rurociąg ssawny, 5 – rurociąg tłoczny

Współczynnik strat liniowych można obliczyć z wzoru Colebrooka-White'a

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

Efektem iteracyjnych obliczeń jest wyznaczenie charakterystyki rurociągu (rys. 4). Na jego podstawie wyznaczono punkty pracy dla obu typów napędu [1].



Rys. 4. Charakterystyki układu pompowego napędzanego silnikiem indukcyjnym oraz synchronicznym z magnesami trwałymi

W obliczeniach wykorzystano charakterystykę pompy typu HK200-750x8 podaną przez jej producenta. Wykorzystującymi podobieństwem przepływów można uwzględnić zmianę prędkości obrotowej układu wg następujących zależności:

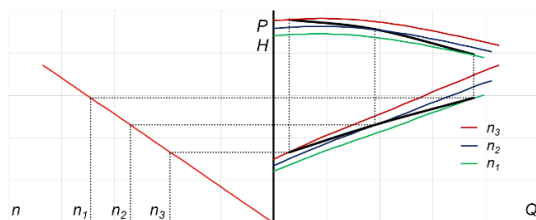
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

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

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

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 5.



Rys. 5. Sposób wyznaczania charakterystyki zespołu pompowego dla różnych prędkości obrotowych

4. Zużycie energii i efektywność ekonomiczna zestawu pompowego

Zużycie energii elektrycznej można obliczyć na podstawie charakterystyki zestawu pompowego (rys. 4). 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 założono, że cena silnika synchronicznego z magnesami trwałymi jest większą o ok. 50 000 zł od ceny

porównywalnego energooszczędnego silnika indukcyjnego.

Objętość wody, która musi być wypompowana by skompensować dodatkowe koszty zakupu silnika synchronicznego i opłatę za zużytą 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 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.

5. Współpraca wielu zestawów pompowych

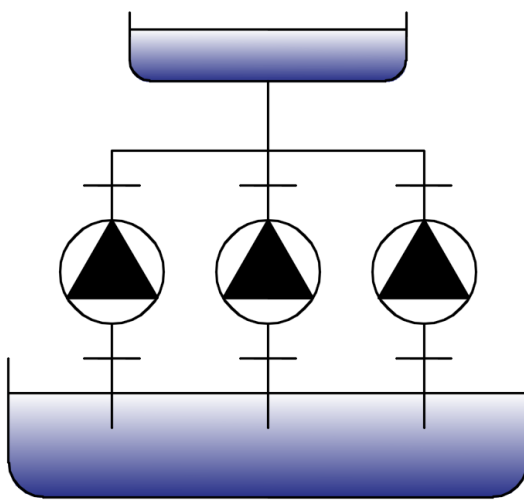
W pompowni głównego odwodnienia kopalni pracuje więcej niż jedna pompa tłocząc wodę równolegle do wspólnego rurociągu (rys. 6). Ponieważ w omawianym układzie pompy współpracują równolegle konieczne jest wyznaczenie wypadkowej charakterystyki przepływu. Sumowanie wydajności poszczególnych zestawów dla tych samych wysokości podnoszenia opisują równania:

$$Q = \sum Q_i \quad (12)$$

$$H = H_1 = H_2 = \dots = H_n \quad (13)$$

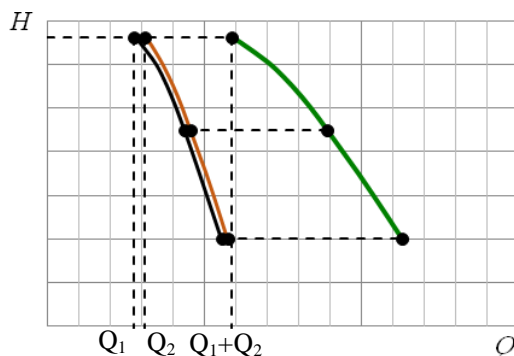
Tabela 2 Obliczenie czasu wypompowania określonej objętości cieczy przez zestawy pompowe z różnymi silnikami napędowymi

rodzaj silnika	Q	H	P_{el}	η_{pompy}	e_j	t	V
	m ³ /h	m	kW	%	kWh/m ³	h	mln m ³
indukcyjny Sh 560 H4A	623,0	740,5	1612	80,8	2,59	7447	4,64
synchroniczny z magnesami trwałymi	635,5	741,3	1618	81,1	2,55	7301	



Rys. 6. Schemat układu pompowego dla trzech pomp pracujących równolegle

Praktycznie sumuje się tylko stateczne części charakterystyk pomp (rys. 7).



Rys. 7. Konstrukcja charakterystyki wypadkowej pomp pracujących równolegle

W zaprezentowany sposób można wyznaczyć krzywe dla różnych przypadków jak np.

zastosowanie różnych jednostek napędowych lub różnej liczby współpracujących zestawów. Dla wybranych wariantów można wyznaczyć punkty pracy posługując się znaną już charakterystyką rurociągu. Przyjęto uproszczenie, że dopływy od poszczególnych pomp do głównego rurociągu nie mają wpływu na jego charakterystykę.

Wyznaczony w ten sposób punkt pracy umożliwia określenie poboru mocy przez każdą z pomp oddzielnie nie tylko wtedy gdy wszystkie współpracujące zestawy są jednakowe. Można również określić korzyści wynikające z zastosowania silników energooszczędnych różnych typów. Sytuacja taka może wystąpić np. w przypadku częściowej modernizacji stacji pomp.

W tabeli 3 zebrano wyniki obliczeń dla różnych konfiguracji zestawów pompowych pracujących na wspólny rurociąg. Ponieważ w takim przypadku natężenie przepływu zwiększy się kilkukrotnie, do obliczeń przyjęto średnicę rurociągu 400 mm. Skutkuje to bardziej płaską charakterystyką rurociągu oraz zapewnia stabilny punkt pracy układu. Prezentowane obliczenia wskazują, że różnica jednostkowego zużycia energii pomiędzy silnikiem indukcyjnym i synchronicznym z magnesami trwałymi jest stała niezależnie od ilości pracujących jednocześnie zestawów pompowych.

Większa liczba pracujących równocześnie pomp powoduje większą wydajność procesu pompowania. Przy czym oszczędności energii związane są z zastosowaniem silników o określonej sprawności. Z tego wynika, że przy ograniczonych funduszach, uzasadniona jest nawet częściowa modernizacja stacji pomp.

Tabela 3 Porównanie wydajności energetycznej procesu pompowania

Rodzaj napędu	e_{jPMSM}	e_{jSI}	Q
2xSI	-	2,58	1250
2xPMSM	2,54	-	1275
SI+PMSM	2,54	2,58	1263
3xPMSM	2,65	-	1764
2xPMSM+SI	2,64	2,69	1754
PMSM+2xSI	2,64	2,69	1743
3xSI	-	2,69	1732

6. Wnioski

Na podstawie analizy wykonanych obliczeń dotyczących pracy pompowni głównego odwodnienia kopalni podziemnej pracującej z silnikiem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi lub indukcyjnym o największej sprawności można stwierdzić, że:

zastosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi umożliwia wypompowanie określonej objętości cieczy w krótszym czasie przy mniejszym zużyciu energii elektrycznej, silniki synchroniczne z magnesami trwałymi pobierają znacznie mniej energii biernej od silników indukcyjnych, a ich moc bierna może być skompensowana (współczynnik mocy $\cos\phi=1$),

większa sprawność i współczynnik mocy powodują zmniejszenie prądu pobieranego przez silniki z magnesami trwałymi o ok. 8% w porównaniu do obecnie stosowanych maszyn indukcyjnych, co umożliwia zmniejszenie strat przesyłowych w układzie zasilania o ok. 16%,

możliwa jest energooszczędna praca pompowni, w której na wspólny rurociąg pracują silniki indukcyjne i z magnesami trwałymi.

7. Literatura

- [1] **W. Jędral „Pompy Wirowe”**, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001
- [2] M. Skowroński „Układy pompowe”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wr-w 2009
- [3] J. Zawilak, T. Zawilak „Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim”, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wrocławska, 2013
- [4] T. Zawilak “Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines”, Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 2b, s. 177-179,
- [5] J. Zawilak, T. Zawilak „Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi”, Napędy i Sterowanie. 2014, R. 16, nr 2, s. 102-105,
- [6] J. Zawilak, T. Zawilak „Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim”, Górnictwo Odkrywkowe. 2014, R. 55, nr 1, s. 29-33
- [7] J. Zawilak, T. Zawilak „Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności”, Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 1, s. 224-226

Autorzy

Szymon Lipiński, Jan Zawilak
 Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
 szymon.lipinski@pwr.edu.pl
 jan.zawilak@pwr.edu.pl