

**Marcin Baszyński, Roman Dudek, Aleksander Dziadecki, Andrzej Stobiecki**  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## **BADANIE SPRAWNOŚCI UKŁADU MASZYNA PMSM – PRZEKSZTAŁTNIK W SZEROKIM ZAKRESIE PRZETWARZANEJ MOCY**

### **INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF PMSM – INVERTER SYSTEM IN WIDE RANGE OF PROCESSED POWER**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badania mocy strat i sprawności przetwarzania energii w układzie laboratoryjnym, złożonym z maszyny synchronicznej o magnesach trwałych (PMSM), o mocy 14,6 kW, pracującej jako generator i czterokwadrantowego przekształtnika, oddającego energię do sieci elektroenergetycznej. Generator był napędzany układem złożonym z maszyny indukcyjnej i czterokwadrantowego przekształtnika. Układ napędzający pracował w reżimie zadanego momentu, zaś układ z maszyną PMSM stabilizował zadaną prędkość obrotową. Badania przeprowadzono dla prędkości obrotowych wału zmienianych w zakresie od 100 obr/min do 1000 obr/min oraz momentu na wale zmienianego w zakresie ok. 10 - 100%  $T_{max}$ . Uzyskane wyniki pokazano na wykresach, ilustrujących moc strat i sprawność przetwarzania energii w poszczególnych elementach toru przetwarzania w funkcji momentu na wale, dla różnych prędkości obrotowych wału. Otrzymane rezultaty pozwalają lepiej określić sprawność elektrowni wiatrowej, która z istoty swojej przez znaczną część czasu pracuje przy relatywnie małych wartościach przetwarzanej mocy.

**Abstract:** The paper shows the results of investigation of power processing efficiency and power losses in PMSM – inverter system, in wide range of processed power. The laboratory system tested consists of the Permanent Magnet Synchronous Generator and four-quadrant inverter, transferring the energy produced directly to the main supply. The generator was driven by the induction motor drive system, supplied from the inverter stabilising the torque of the motor. The rotational speed was stabilised by the PMSM drive system. The investigations has been made for the rotational speed in the range 100 to 1000 rpm and the torque between 10 and 100 percent of maximum value. The results are presented on plots showing the power losses and efficiency of energy processing in each part of power processing system as a function of torque, for various values of rotational speed.

**Słowa kluczowe:** maszyna PMSM, sprawność przetwarzania energii

**Keywords:** PMSM, energy conversion efficiency

### **1. Wstęp**

Celem badań było przeprowadzenie laboratoryjnych pomiarów układu maszyna PMSM – przemiennik częstotliwości dla określenia mocy strat i sprawności przetwarzania energii w szerokim zakresie prędkości obrotowych i momentu na wale generatora. Taki układ napędowy bywa często stosowany w elektrowniach wiatrowych. Szeroki zakres przetwarzanej mocy odpowiada charakterowi pracy elektrowni i zmienności prędkości wiatru.

### **2. Opis układu i przyjętej metodologii badawczej**

Laboratoryjne stanowisko badawcze składało się z maszyny synchronicznej o magnesach trwałych (PMSM) typu SDM 261-110N0-190/15-IW3-60A1, pracującej jako generator, sprzężonej na wale z maszyną indukcyjną typu

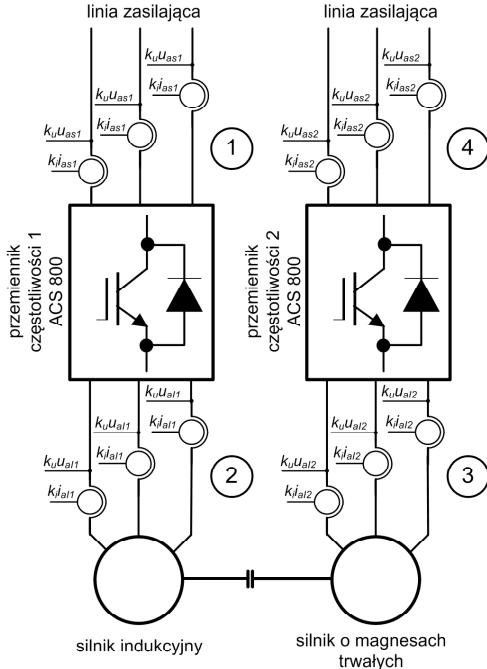
2SUg 200L4A. Dane znamionowe obu maszyn zestawiono w tabeli 1.

*Tabela 1. Dane znamionowe maszyn [1,2]*

	masz. ind.	PMSM
producent	Celma - Indukta	ABB
moc [kW]	18,5	14,6
napięcie [V]	400	400
prąd [A]	34,5	31,8
częstotliwość [Hz]	50	75
pręd. obr. [obr/min]	1455	1500
sprawność [%]	89,6	
cosφ	0,87	

Obie maszyny współpracowały z czterokwadrantowymi przekształtnikami serii ACS800. Maszyna indukcyjna wraz z przekształtnikiem

stanowiła napęd badanego układu. Schemat stanowiska pokazano na rysunku 1. Na rysunku tym pokazano też punkty, w których dokonywane były pomiary mocy. Stanowisko nie było wyposażone w czujnik pomiarowy momentu.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnego stanowiska pomiarowego

Prędkość obrotową  $n$  zadawano w układzie sterowania przetwornika częstotliwości ABB ACS800 współpracującego z maszyną synchroniczną o magnesach trwałych. Informacji o prędkości rzeczywistej dostarczał enkoder, w który wyposażona jest ta maszyna. Moment  $T$  na wale układu maszynowego zadawano w układzie sterowania przetwornika częstotliwości zasilającego silnik indukcyjny.

Wielkościami, których charakterystyki (zmienność w funkcji momentu na wale  $T$ ) wyznaczono bezpośrednio z pomiarów są:

- prąd silnika indukcyjnego  $I_{ind}$ ,
- prąd maszyny synchronicznej wzbudzanej magnesami trwałymi  $I_{PMSM}$ ,
- moc pobierana przez silnik indukcyjny  $P_{ind}$  (pomiar w punkcie oznaczonym numerem 2 na rysunku 1),
- moc oddawana przez maszynę synchroniczną  $P_{PMSM}$  (pomiar w punkcie oznaczonym numerem 3 na rysunku 1),
- moc oddawana przez przetwornik częstotliwości współpracujący z maszyną PMSM  $P_{fal}$  (pomiar w punkcie oznaczonym numerem 4 na rysunku 1).

Pomiary dokonywane były przy pomocy analizatora mocy Yokogawa WT1806 [3], za pośrednictwem odpowiednich przetworników LEM.

Na bazie wartości pomiarowych wyżej wymienionych wielkości wyznaczono na drodze obliczeniowej zmienność w funkcji momentu  $T$  następujących wielkości:

- sprawność silnika indukcyjnego  $\eta_{ind}$ ,
- sprawność maszyny synchronicznej  $\eta_{PMSM}$ ,
- sprawność przetwornika częstotliwości 2 współpracującego z maszyną PMSM  $\eta_{fal}$ ,
- sprawność układu maszyna PMSM – przetwornik częstotliwości 2  $\eta_u$ .

Różnica pomiędzy mocą pobieraną przez silnik indukcyjny  $P_{ind}$ , a mocą oddawaną przez maszynę  $P_{PMSM}$  określa wartość strat  $\Delta P$  rozważanego zestawu maszynowego (wzór 1). Przyjęto, że przy stałej prędkości wału na straty  $\Delta P$  składają się [4,5]:

- straty stałe obu maszyn  $\Delta P_m$ , niezależne od obciążenia, tworzone głównie przez straty mechaniczne i straty w żelazie,
- straty zależne od obciążenia (prądu) - straty w miedzi  $\Delta P_{Cu}$ .

$$\Delta P = P_{ind} - P_{PMSM} = \Delta P_m + \Delta P_{Cu} \quad (1)$$

Straty stałe  $\Delta P_m$  wyznaczono poprzez wykonanie dla obu maszyn niezależnych pomiarów biegu jałowego (wzór 2). Dla pomiarów biegu jałowego maszyny zostały rozłączone i zmieniony został kierunek przepływu energii w zestawie maszyna PMSM – przetwornik częstotliwości 2.

$$\Delta P_m = \Delta P_{indm} + \Delta P_{PMSMm} \quad (2)$$

przy czym:

$$\Delta P_{indm} = P_{ind} - \Delta P_{indCu} \quad (3)$$

$$\Delta P_{PMSMm} = P_{PMSM} - \Delta P_{PMSMCu} \quad (4)$$

Straty w miedzi silnika indukcyjnego  $\Delta P_{indCu}$  na biegu jałowym wyznaczono z wzoru 5, przyjmując, że prąd wirnika ma zerową wartość. Straty w miedzi maszyny PMSM  $\Delta P_{PMSMCu}$  wyznaczono z wzoru 6.

$$\Delta P_{indCu} = 3I_{ind}^2 R_{indst} \quad (5)$$

$$\Delta P_{PMSMCu} = 3I_{PMSM}^2 R_{PMSMst} \quad (6)$$

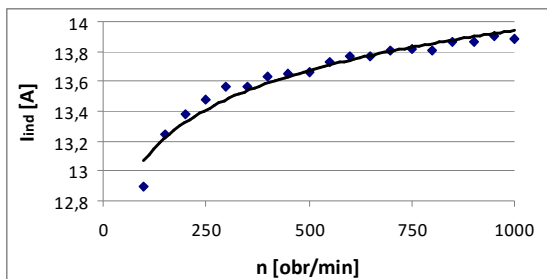
gdzie:

$$R_{PMSMst} = 0,255 \Omega [2],$$

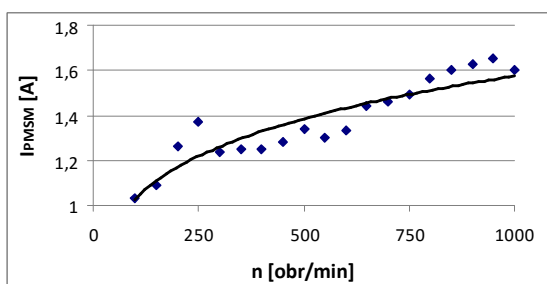
$$R_{indst} = 0,167 \Omega.$$

Wobec braku danych katalogowych rezystancję stojana silnika indukcyjnego wyznaczono metodą techniczną pomiaru rezystancji.

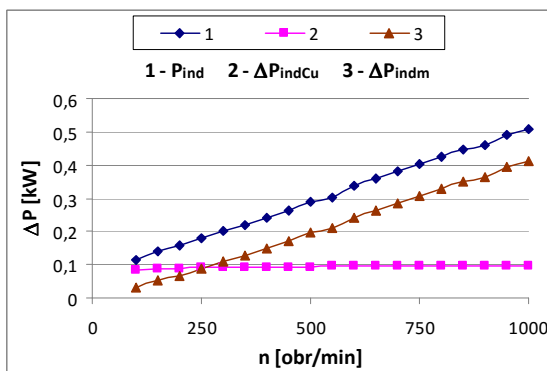
Wyniki pomiarów i obliczeń przeprowadzonych dla stanu biegu jałowego maszyn pokazano na rysunkach 2 – 5.



Rys. 2. Prąd silnika indukcyjnego  $I_{ind}$  w funkcji prędkości  $n$  na biegu jałowym

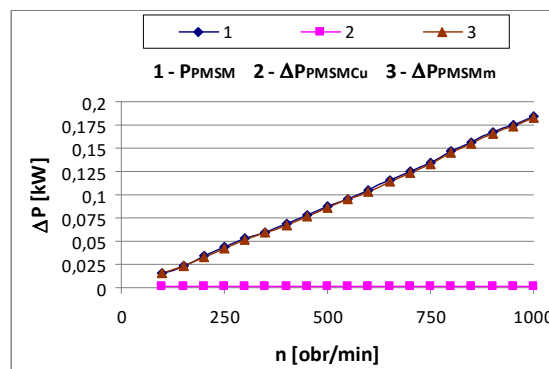


Rys. 3. Prąd silnika PMSM  $I_{PMSM}$  w funkcji prędkości  $n$  na biegu jałowym



Rys. 4. Moc pobrana  $P_{ind}$ , straty stałe  $\Delta P_{indm}$  i straty w miedzi  $\Delta P_{indCu}$  w funkcji prędkości  $n$  dla silnika indukcyjnego na biegu jałowym

Do wyznaczenia sprawności poszczególnych maszyn niezbędna jest wartość mocy na wale zestawu maszynowego  $P_{mech}$ . Wartość strat całkowitych zestawu  $\Delta P$  i wartość strat stałych zestawu  $\Delta P_m$  dla danej prędkości zostały wykorzystane do obliczenia strat w miedzi  $\Delta P_{Cu}$  obu maszyn (zgodnie z wzorem 1).



Rys. 5. Moc pobrana  $P_{PMSM}$ , straty stałe  $\Delta P_{PMSMm}$  i straty w miedzi  $\Delta P_{PMSMCu}$  w funkcji prędkości  $n$  dla maszyny PMSM na biegu jałowym

Znana wartość prądu i rezystancji maszyny PMSM pozwalają określić straty w miedzi maszyny synchronicznej  $\Delta P_{PMSMCu}$  (wzór 6), a to prowadzi do zapisania strat w miedzi silnika indukcyjnego  $\Delta P_{indCu}$  jako:

$$\Delta P_{indCu} = \Delta P_{Cu} - \Delta P_{PMSMCu} \quad (7)$$

W efekcie moc na wale  $P_{mech}$  określa wzór:

$$P_{mech} = P_{ind} - \Delta P_{indm} - \Delta P_{indCu} \quad (8)$$

Uzyskanie wartości mocy na wale  $P_{mech}$  pozwala na wyliczenie sprawności poszczególnych elementów badanego układu według wzorów od 9 do 12:

- sprawność silnika indukcyjnego:

$$\eta_{ind} = \frac{P_{mech}}{P_{ind}} 100 [\%] \quad (9)$$

- sprawność maszyny synchronicznej:

$$\eta_{PMSM} = \frac{P_{PMSM}}{P_{mech}} 100 [\%] \quad (10)$$

- sprawność przemiennika częstotliwości 2:

$$\eta_{fal} = \frac{P_{fal}}{P_{PMSM}} 100 [\%] \quad (11)$$

- sprawność układu maszyna synchroniczna – przemiennik częstotliwości 2:

$$\eta_u = \frac{P_{fal}}{P_{mech}} 100 [\%] \quad (12)$$

### 3. Wyniki badań

Badania przeprowadzono dla prędkości obrotowych wału zmienianych w zakresie od 100 obr/min do 1000 obr/min oraz momentu na wale zmienianego w zakresie ok. 10 - 100%  $T_{max}$ , gdzie  $T_{max}$  odpowiada momentowi znamionowemu maszyny PMSM.

Uzyskane rezultaty zostały pokazane na rysunkach 6 - 9. Charakterystyki zaprezentowane na rysunkach 6 i 7 pokazują zależność mocy czynnej silnika indukcyjnego  $P_{ind}$ , mocy na wale  $P_{mech}$ , mocy maszyny synchronicznej  $P_{PMSM}$  i mocy przemiennika częstotliwości 2  $P_{fal}$  od momentu  $T$ , oraz odpowiednio sprawności silnika indukcyjnego  $\eta_{ind}$ , maszyny synchronicznej  $\eta_{PMSM}$ , przemiennika częstotliwości 2  $\eta_{fal}$  oraz układu maszyna synchroniczna - przemiennik częstotliwości 2  $\eta_u$  także od momentu  $T$ , dla wybranych wartości prędkości obrotowej wału. Sprawność maszyny synchronicznej  $\eta_{PMSM}$  i sprawność układu maszyna PMSM - przemiennik częstotliwości 2  $\eta_u$  w funkcji momentu  $T$  i prędkości obrotowej  $n$  pokazano na rysunkach 8 i 9, w zobrażeniu 3D.

Przeprowadzone badania i pomiary potwierdziły znany powszechnie fakt, że przy znacznym obniżeniu wartości przetwarzanej mocy (prędkości obrotowej i momentu na wale) następuje wyraźne obniżenie sprawności toru przetwarzania energii, przy czym to obniżenie dotyczy obu głównych elementów toru - maszyny PMSM i przekształtnika. W skrajnych przypadkach straty w torze przetwarzania energii, a zwłaszcza straty w przekształtniku, mogą okazać się wyższe niż dostarczana do układu moc mechaniczna. Dla laboratoryjnego stanowiska badawczego w przekształtniku występują wyraźne straty stałe, np. od stale zasilanego układu sterowania czy załączonego wentylatora chłodzenia przekształtnika.

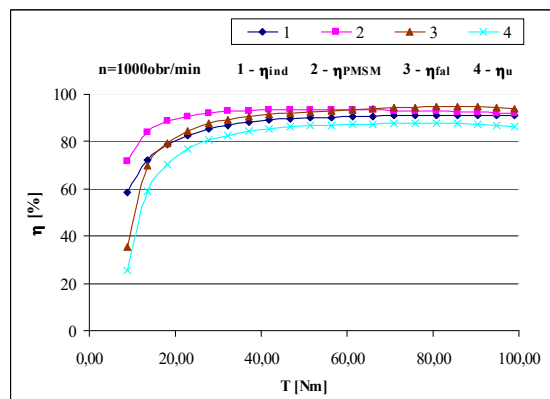
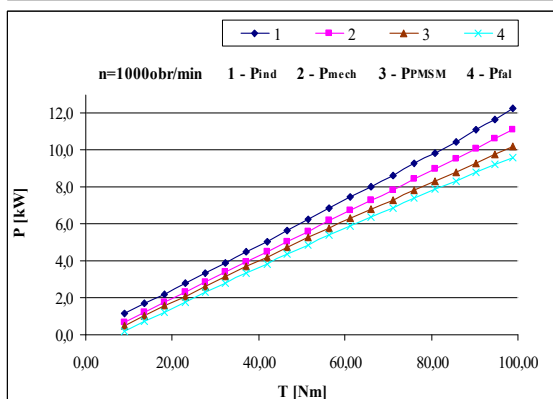
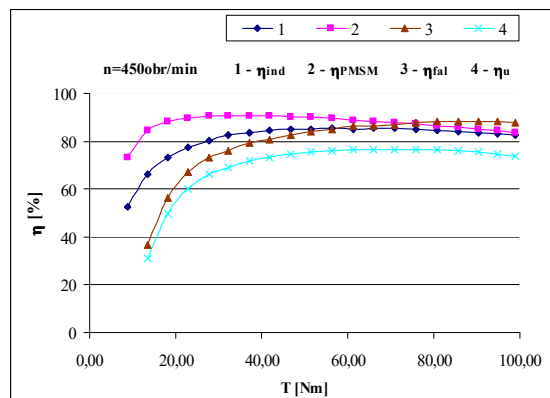
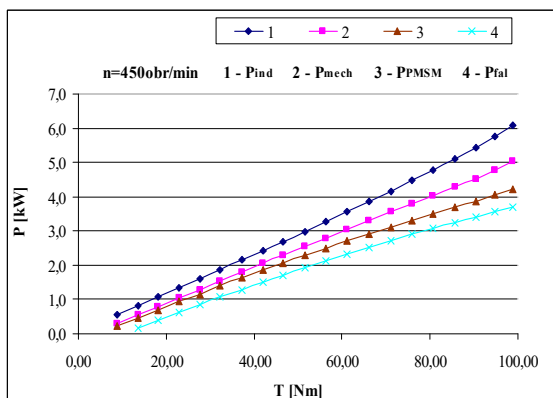
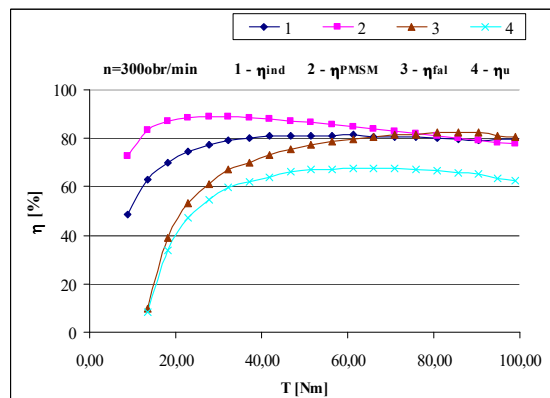
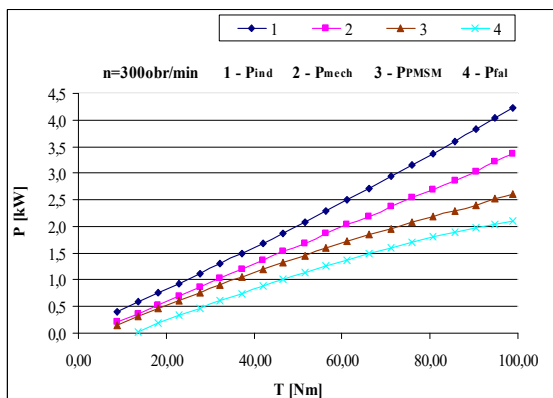
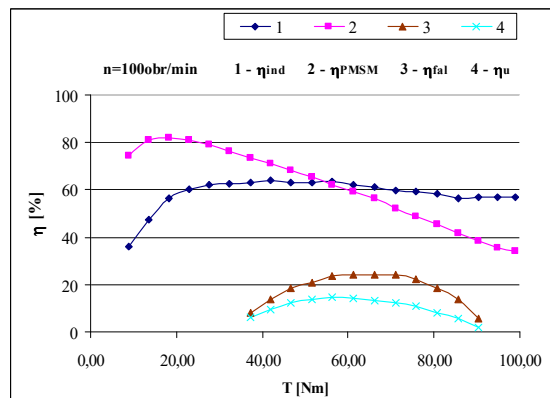
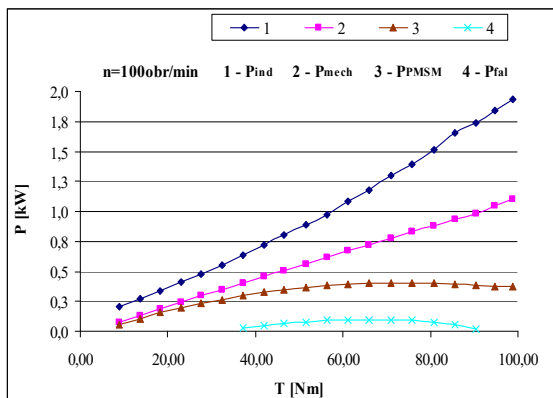
Deklarowana przez producenta sprawność znamionowa maszyny PMSM wynosi 97-98%, zaś sprawność przekształtnika - 97%. Zmierzone w laboratorium wartości liczbowe są nieco niższe, ale też pomiary nie były wykonywane w znamionowych warunkach.

W zakresie małych prędkości obrotowych daje się zaobserwować ciekawa prawidłowość. I tak dla przykładu można przeanalizować zależność

sprawności maszyny PMSM od momentu na wale dla prędkości obrotowej 100 obr/min (rysunek 7 i 8). Przy bardzo małych wartościach momentu (na poziomie 10%  $T_{max}$ ) sprawność maszyny PMSM jest stosunkowo wysoka i wynosi nieco poniżej 80%. Ze wzrostem obciążenia ta sprawność początkowo jeszcze nieco wzrasta, osiągając maksimum na poziomie przeszło 80% dla momentu równego ok. 15%  $T_{max}$ , ale dalej wyraźnie spada (niemal liniowo z obciążeniem), aż do poziomu poniżej 40% dla 100%  $T_{max}$ . Przy zwiększaniu prędkości obrotowej opisana prawidłowość nadal występuje, utrzymuje się punkt maksymalnej sprawności, nieco się przesuwając w kierunku większych momentów, jednak spadek sprawności przy wzroście momentu na wale jest coraz mniejszy. Tak np. dla prędkości 350 obr/min sprawność maszyny PMSM osiąga maksimum na poziomie 90% dla ok. 30%  $T_{max}$ , a dalej spada do 80% przy 100%  $T_{max}$ .

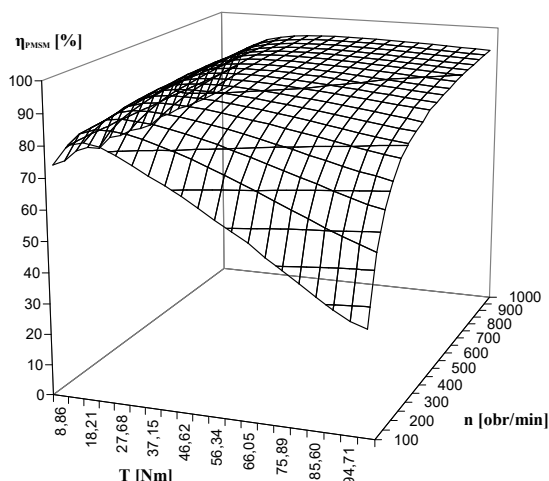
Dla średnich i wysokich prędkości obrotowych napędu sprawność maszyny PMSM utrzymuje się na wysokim poziomie w szerokim zakresie obciążenia. Załamanie i szybki spadek sprawności występuje dla momentów na wale poniżej 10 - 15%  $T_{max}$ . Warto jednak zwrócić uwagę, że w bilansie energetycznym elektrowni ten zakres pracy nie ma większego znaczenia, z uwagi na bardzo małą wartość przetwarzanej mocy. Trzeba też pamiętać, że w układzie elektrowni wiatrowej generator pracuje jedynie w pewnym obszarze układu współrzędnych  $T - n$ , określonym rodziną charakterystyk wirnika turbiny dla pełnego zakresu prędkości wiatru.

Taki przebieg charakterystyki sprawności maszyny synchronicznej o magnesach trwałych (PMSM), to znaczy wysoka sprawność, utrzymująca się w szerokim zakresie momentu na wale, predestynuje ten rodzaj maszyny do pracy w układach elektrowni wiatrowych, które ze swojej istoty muszą efektywnie pracować w szerokim zakresie zmian generowanej mocy. Dla porównania na wykresach umieszczono analogiczne charakterystyki sprawności w funkcji momentu na wale, ale dla maszyny indukcyjnej (przy pracy silnikowej).

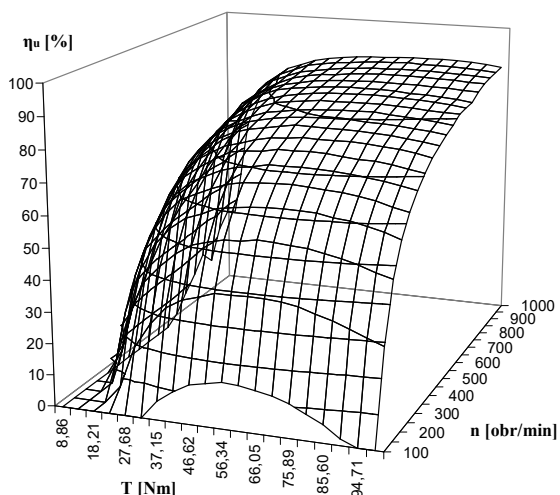


Rys. 6. Moc czynna silnika indukcyjnego  $P_{ind}$ , moc na wale  $P_{mech}$ , moc maszyny synchronicznej  $P_{PMSM}$  i moc przemiennika częstotliwości 2  $P_{fal}$  w funkcji momentu  $T$

Rys. 7. Sprawność silnika indukcyjnego  $\eta_{ind}$ , maszyny synchronicznej  $\eta_{PMSM}$ , przemiennika częstotliwości 2  $\eta_{fal}$  oraz układu maszyna synchroniczna – przemiennik częstotliwości 2  $\eta_u$  w funkcji momentu  $T$



Rys. 8. Sprawność maszyny synchronicznej  $\eta_{PMSM}$  w funkcji momentu  $T$  i prędkości obrotowej  $n$



Rys. 9. Sprawność układu maszyna PMSM - przemiennik częstotliwości 2  $\eta_u$  w funkcji momentu  $T$  i prędkości obrotowej  $n$

Jest oczywiste, że uzyskane wyniki liczbowe dotyczą konkretnych typów maszyn i konkretnych przekształtników, jakie zostały zabudowane na stanowisku badawczym. Przekształtniki realizowały określone algorytmy sterowania. Uzyskane rezultaty dają się jednak, zdaniem autorów, rozszerzyć na większe maszyny i stosowne przekształtniki. Najbardziej istotne różnice mogą dotyczyć przebiegu charakterystyki mocy strat w funkcji obciążenia dla przemiennika częstotliwości współpracującego

z maszyną PMSM. Należy oczekiwać, że dla większych napędów straty na chłodzenie przekształtnika będą relatywnie mniejsze i mogą zmieniać się z obciążeniem na skutek użycia inteligentnych (adaptacyjnych) systemów chłodzenia.

#### 4. Literatura

- [1]. „Silniki pierścieniowe 2SUG 200L4A. Karta katalogowa.”, [http://www.cantonigroup.com/pl/motors/celma\\_indukta/product/1039/2sug-200l4a/](http://www.cantonigroup.com/pl/motors/celma_indukta/product/1039/2sug-200l4a/) (11.2015).
- [2]. “AC Servo Motors SDM261. User’s Manual.” Dokument firmy ABB. [http://www.multiprojekt.pl/ftp/abb\\_serwonapedy/silniki\\_serwo/](http://www.multiprojekt.pl/ftp/abb_serwonapedy/silniki_serwo/) (11.2015).
- [3]. WT1800 high performance power analyzer. <http://tmi.yokogawa.com/br/products/digital-power-analyzers/digital-power-analyzers/wt1800-high-performance-power-analyzer/> (11.2015).
- [4]. A. Plamitzer: „Maszyny elektryczne”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
- [5]. E. Król: „Silniki z magnesami trwałymi oraz silniki indukcyjne – czynniki obniżające sprawność”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 80, str. 223-226, 2008.

#### Autorzy

dr inż. Marcin Baszyński  
 mbaszyn@agh.edu.pl  
 dr inż. Roman Dudek  
 roman.dudek@agh.edu.pl  
 dr inż. Aleksander Dziadecki  
 dziadeck@agh.edu.pl  
 dr inż. Andrzej Stobiecki  
 astob@agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiB, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

Niniejsza praca jest wynikiem projektu: „Innowacyjna elektrownia wiatrowa z pionową osią obrotu, o mocy 1,5 MW wyposażona w układ przekształtnikowy umożliwiający uzyskanie wysokiej efektywności przetwarzania energii wiatru w energię elektryczną przy niskich prędkościach wiatru.”

Umowa NCBiR UOD-DEM-1-153/001 zawarta w dniu 10.12.2013