

Tomasz Zawilak, Jan Zawilak  
Politechnika Wrocławska

## WPŁYW WARUNKÓW ZASILANIA NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### INFLUENCE OF THE SUPPLY VOLTAGE QUALITY ON THE LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR RUNNING PROPERTIES.

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono skorygowane doświadczalnie obliczenia charakterystyk eksploatacyjnych oraz rozruchowych silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi dużej mocy. Obliczenia wykonano dla stałej wartości napięcia zasilającego oraz dla napięcia pomniejszonego o spadek napięcia podczas rozruchu silnika.

**Abstract:** The paper deals with simulation and experimental results of running and starting properties of high power permanent magnet synchronous motor. Results were obtained for constant value of the supply voltage and including the voltage drop during motor starting.

**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni

**Keywords:** synchronous motor, permanent magnet, direct on line starting

#### 1. Wstęp

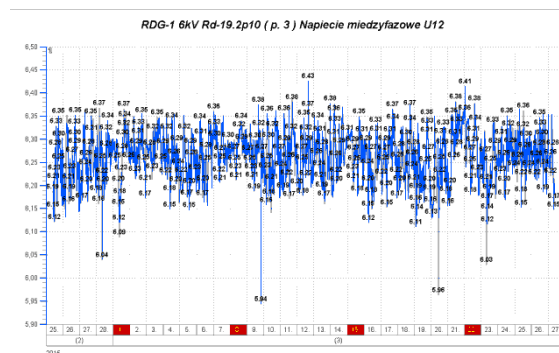
Zakłady wydobywcze są bardzo dużymi odbiorcami energii elektrycznej. Duże zużycie energii przez kopalnie węgla i miedzi powoduje wzrost kosztów wydobycia oraz uszczuplenia zasobów mocy w systemie elektroenergetycznym. W każdej kopalni podziemnej, oprócz podstawowych maszyn i urządzeń takich jak maszyny wydobywcze, transportowe zainstalowanych jest wiele pomp i wentylatorów. Napędy wentylatorów i pomp głównych pobierają rocznie w jednej kopalni ok. 115 200 MWh co stanowi ok. 48 % energii zakładu. Są to urządzenia dużej mocy pracujące w systemie ciągłym. Dlatego nawet niewielka poprawa sprawności napędu sumarycznie pozwoli na duże oszczędności energii.

Dlatego wiele ośrodków badawczych zajmuje się poszukiwaniami nowych, energooszczędnych, rozwiązań konstrukcyjnych, niezawodnych w eksploatacji maszyn elektrycznych [1, 2, 3, 5, 6, 8].

Maszyny te projektowane dla warunków określonych jako znamionowe często pracują przy innych parametrach zasilania (zgodnie z tolerancjami opisanymi w obowiązujących przepisach np. [9]). Badania wpływu odkształcenia napięcia na sprawność Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) omówiono np. w pracy [4] natomiast wpływ spadków napięcia w pracy [7].

Na rysunku 1 pokazano wykres napięć zasilających pompy głównego odwodnienia kopalni

podziemnej pomierzonych w odstępach 15 min w czasie 1 miesiąca. Skuteczne wartości tych napięć zmieniają się skrajnie od 5,94 do 6,43 kV.



Rys. 1. Wykres napięć zasilających silniki głównego odwodnienia w kopalni podziemnej

Celem pracy jest poszerzenie wiedzy nt. energooszczędnych układów napędowych z silnikami elektrycznymi LSPMSM pracującymi przy zasilaniu innym niż znamionowe.

#### 2. Badany obiekt

Przedstawiany model prototypowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim powstał na potrzeby napędzania zmodernizowanej pompy głównego odwodnienia kopalni. W projekcie określono, że silnik napędowy ma moc znamionową 1600 kW przy prędkości obrotowej 1500 obr/min.

Przy współpracy Politechniki Wrocławskiej oraz DFME Damel zaprojektowano a następnie

wykonano prototypowy model silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (SI 560X-4Apm rys. 2).

a)



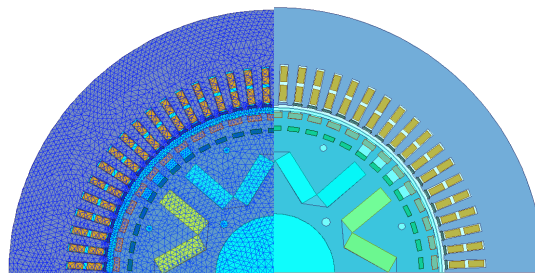
b)



Rys 2. Prototypowy model silnika LSPMSM (SI 560X-4Apm): podczas montażu (a), na stacji prób (b)

### 3. Analiza właściwości badanego silnika

Specyfika maszyn typu LSPMSM powoduje, że do chwili obecnej nie opracowano jednoznacznych wytycznych pozwalających na określenie ich parametrów z określoną dokładnością [1]. Z tego powodu analizę właściwości dokonano dwiema uzupełniającymi się metodami: pomiarową oraz połowo-obwodowym modelem symulacyjnym. W symulacjach programu Maxwell wybrano typ rozwiązania „transient”, pozwalający na modelowanie pracy maszyny przy wymuszeniu napięciowym z jednoczesnym uwzględnieniem ruchu, najbliższej odzwierciedlający rozpatrywane zjawiska (rys. 3).



Rys 3. Geometria modelu badanego silnika LSPMSM (SI 560X-4Apm)

### 3.2. Wpływ napięcia zasilającego na parametry silnika w stanie obciążenia

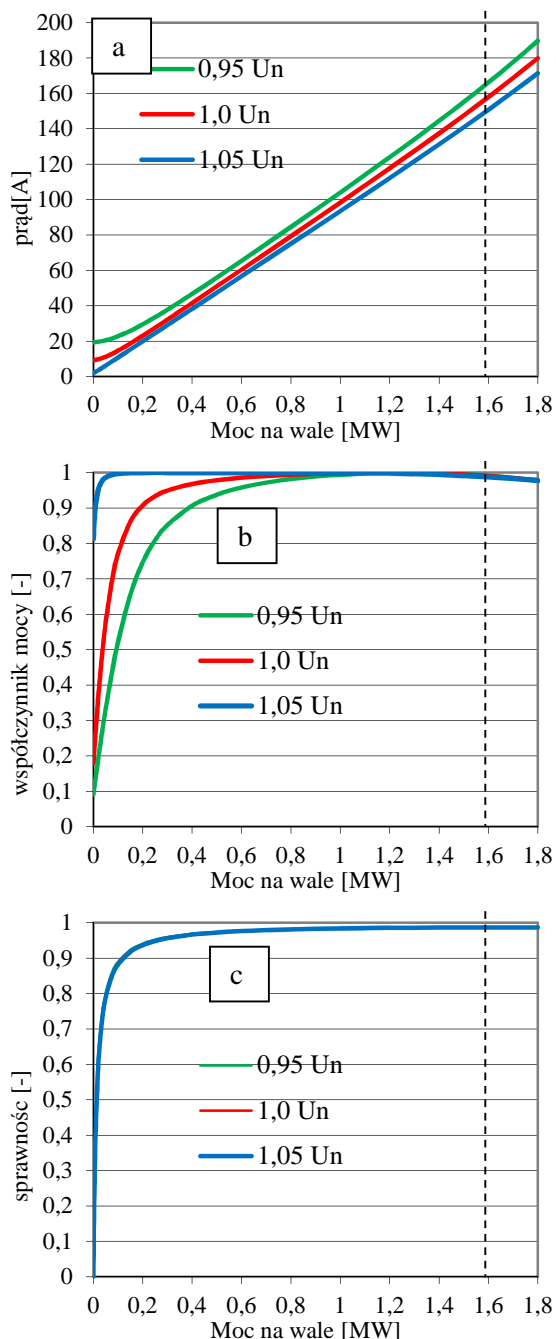
Parametry znamionowe badanego silnika zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry znamionowe silnika LSPMSM (SI 560X-4Apm)

Moc znamionowa	kW	1600
Prędkość obrotowa	obr/min	1500
Moment znamionowy	kN·m	10,2
Napięcie znamionowe	V	6000
Prąd znamionowy	A	158
Współczynnik mocy	---	0,99
Sprawność	%	98,7
Ustalony przyrost temperatur. uzwojenia	°C	70
Prąd rozruchowy	$I_r/I_n$	6,5
Początkowy moment rozruchowy	$M_r/M_n$	2,6
Minimalny moment rozruchowy	$M_{rmin}/M_n$	1,7

Na rysunku 4 pokazano obliczone wykresy prądu stojana, współczynnika mocy i sprawności badanego silnika w funkcji zmian obciążenia dla różnych wartości napięć zasilających. Z wykresów wynika, że w zakresie obciążenia (0,7-1,0)  $P_n$  wartość współczynnika mocy jest bardzo duża (większa niż 0,99) i praktycznie nie zależy od wartości napięcia zasilającego (dla odchyłek  $\pm 5\% U_n$ ). Dla mniejszych obciążeń współczynnik mocy maleje, jednak przyjmuje charakter pojemnościowy dla  $U_n$  oraz  $0,95U_n$ , zaś jest niemal stały w pełnym zakresie obciążeń dla  $1,05U_n$ . Maszynę można również zaprojektować w ten sposób, aby najmniejsza zmienność współczynnika mocy odpowiadała napięciu znamionowemu. Jednak wówczas

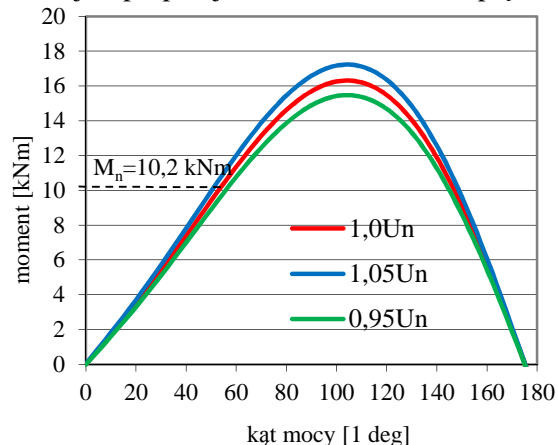
przy  $1,05U_n$  i małych obciążeniach współczynnik mocy miałby charakter indukcyjny. Z wykresu sprawności można wnioskować, że napięcie zasilające ma znikomy wpływ na ten parametr. Rzeczywista zmienność sprawności jest poniżej zakresu mierzalnego określonego przez normy.



Rys.4. Charakterystyki eksploatacyjne badanego silnika LSPMSM dla różnych wartości napięcia zasilającego: (a-prąd stojana, b- współczynnik mocy, c- sprawność)

Na rysunku 5 pokazano charakterystykę kątową badanego silnika LSPMSM dla różnych

wartości napięć zasilających, z której wynika, że obciążenie znamionowe uzyskiwane jest przy kącie  $\vartheta=55$  deg. Statyczna przeciążalność momentem dla napięcia znamionowego wynosi 1,65 i jest proporcjonalna do wartości napięcia.



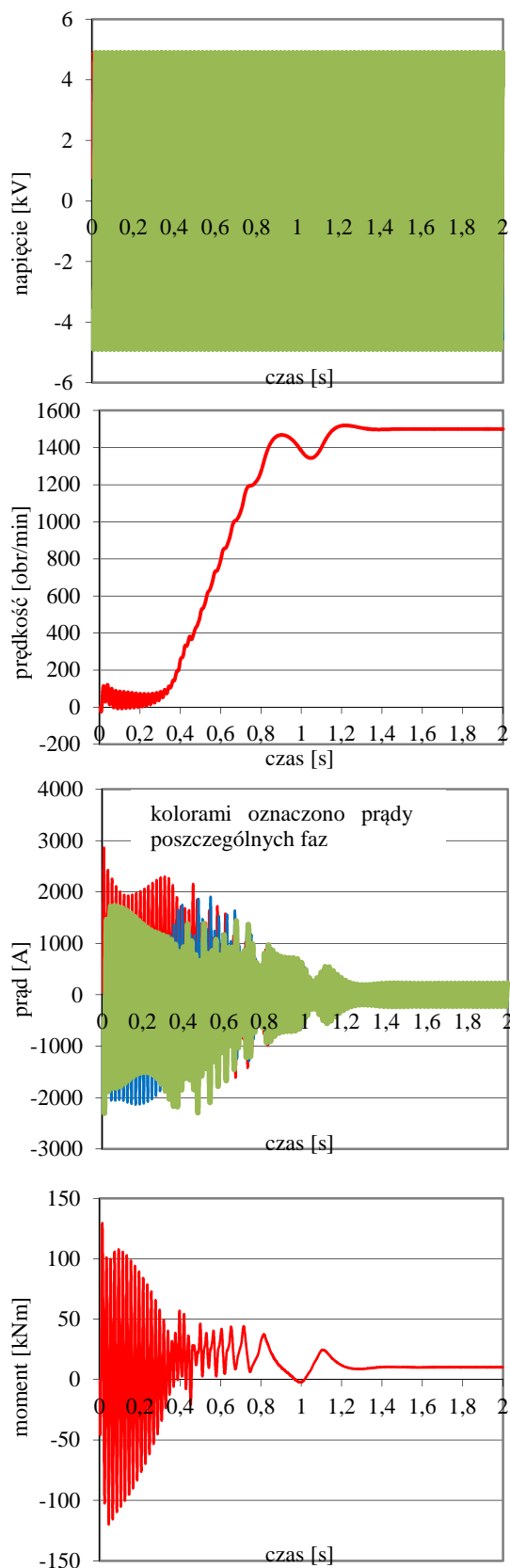
Rys.5 Charakterystyki kątowe silnika  $M=f(\vartheta)$  dla różnych wartości napięć zasilających

### 3.3. Wpływ spadku napięcia na właściwości rozruchowe silnika

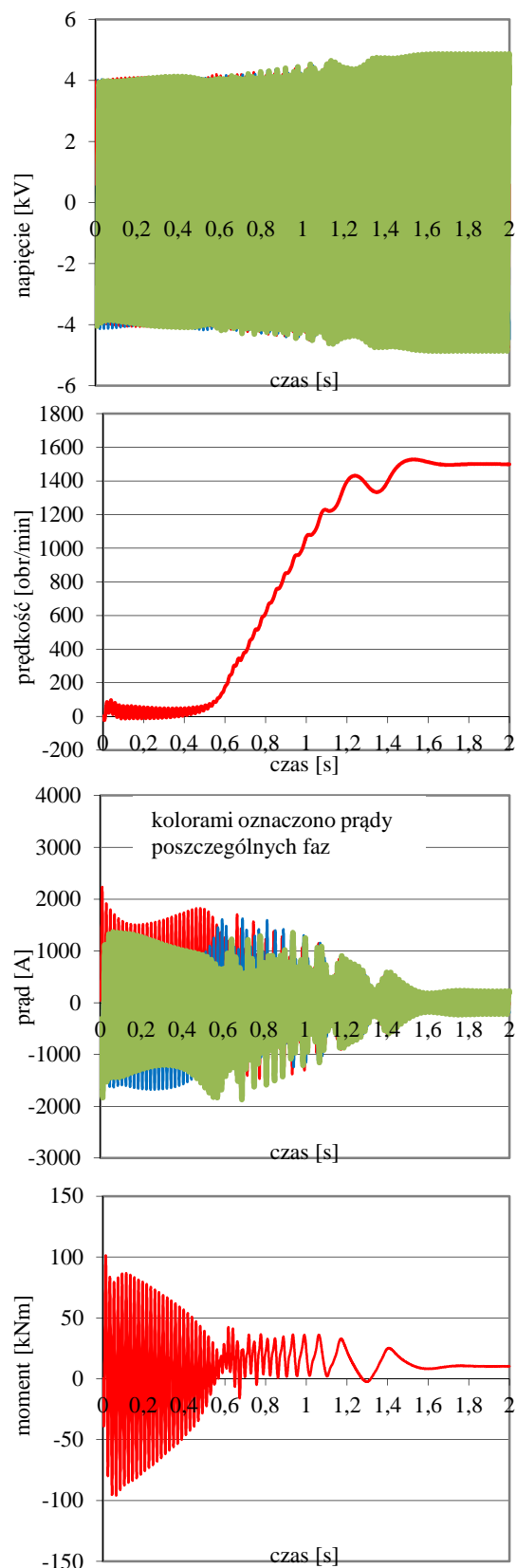
Właściwości rozruchowe maszyn LSPMSM mają bezpośredni wpływ na ich eksploatację. Moment hamujący od magnesów trwałych, występujący w dolnym zakresie prędkości obrotowych, w znacznym stopniu utrudnia proces rozruchu.

Dzięki wykonanej pomiarowo charakterystyce zwarcia skorygowano elementy modelu obliczeniowego (min. indukcyjności połączeń czołowych oraz parametry materiałowe) istotne z punktu widzenia właściwości rozruchowych a następnie wyznaczono średnie wartości momentu i statyczne charakterystyki mechaniczne (rys. 6). Z przedstawionego wykresu wynika, że osiągnięty moment rozruchowy silnika jest wystarczająco duży, nawet przy zasilaniu napięciem uwzględniającym możliwy spadek napięcia (17 %).

Obliczenia wykonano zakładając, że silnik w czasie rozruchu obciążony był pompą (obciążenie zgodne z charakterystyką pompy) dla momentu bezwładności równego 1,2 momentu bezwładności wirnika silnika (suma bezwładności wirnika i pompy).

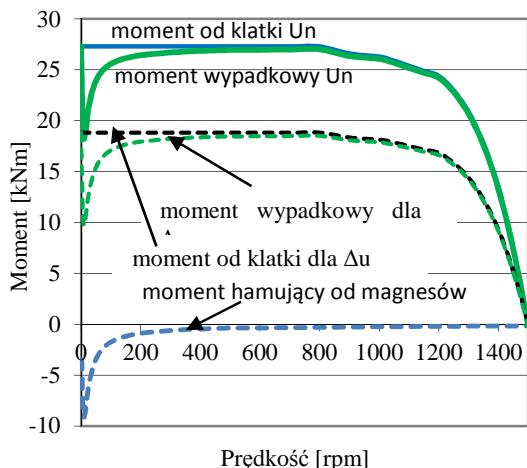


Rys. 8. Przebiegi podczas rozruchu silnika zasilanego napięciem znamionowym.



Rys. 9. Przebiegi podczas rozruchu silnika zasilanego napięciem uwzględniającym początkowy spadek napięcia  $\Delta u=17\%$ .

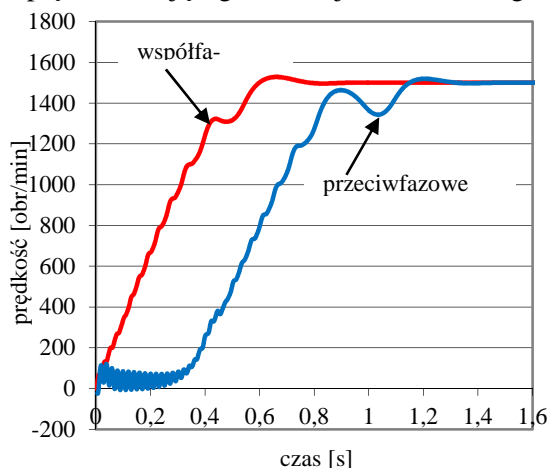




Rys.6 Wypadkowy moment asynchroniczny (średnia wartość) oraz jego składowe w funkcji prędkości obrotowej silnika LSPMSM dla znamionowego napięcia zasilającego  $U_n$  oraz uwzględniające spadek napięcia  $\Delta u=17\%$

### 3.4. Rozruch silnika w rzeczywistych warunkach zasilania

Podczas rozruchu silnika wzbudzanego magnesami trwałymi istotne jest położenie osi pola stojana i pola wirnika. Można to wykazać również na podstawie analizy prędkości obrotowej w czasie rozruchu silnika dla różnych faz początkowych napięcia zasilania stojana. Na rysunku 7 pokazano wykresy prędkości obrotowych silnika podczas rozruchu dla skrajnych położenia wirnika względem początkowej fazy napięcia zasilającego: równej 0 oraz 180 deg.



Rys. 7 Przebieg prędkości obrotowej podczas rozruchu silnika dla dwóch położenia wirnika względem początkowej fazy napięcia zasilającego.

Z przedstawionych wykresów wynika, że położenie osi pola stojana i wirnika wpływa na czas rozruchu układu napędowego. Ma to wpływ na

nagrzewanie się silnika (szczególnie klatki wirnika). W przypadku rozruchu o polach znajdujących się w przeciwfazie przyrost temperatury klatki uzwojenia wirnika jest ok. 10 % większy. Ze względu na dopuszczalną temperaturę pracy magnesów trwałych określona musi być dopuszczalna liczba rozruchów następujących bezpośrednio po sobie.

Na rysunkach 8 oraz 9 pokazano obliczone przebiegi czasowe podczas rozruchu silnika (a- napięcia zasilającego, b- prędkości obrotowej, c- prądów stojana, d- momentu elektromagnetycznego, e- prędkości obrotowej) dla: znamionowej wartości napięcia zasilającego (rys. 8) oraz napięcia uwzględniającego spadek napięcia w sieci zasilającej (rys. 9). Z przedstawionych przebiegów wynika, że czas rozruchu zwiększa się o około 30%, zaś prąd pobierany z sieci zasilającej zmniejsza proporcjonalnie do spadków napięcia.

### 4. Podsumowanie

Na podstawie wykonanych obliczeń można stwierdzić, że odpowiednim zaprojektowaniem silnika LPSMSM można uniezależnić jego właściwości od możliwych zmian napięcia sieci zasilającej (dotyczy to między innymi współczynnika mocy).

Podczas projektowania należy uwzględnić impedancję sieci zasilającej i spadek napięcia by zagwarantować pewny rozruch i synchronizację silnika.

Ponieważ projekt takiego silnika, przystosowanego do określonych warunków zasilania i obciążenia, wykonuje się na indywidualne zamówienie to może on być energooszczędny o maksymalnej sprawności i współczynniku mocy.

### 5. Literatura

- [1] de Almeida A.T, Ferreira F.J.T.E, Quintino Duarte A, *Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, no 2, 2014, pp. 1274-1285
- [2] Lu Q., Huang X., Ye Y., Fang Y.: *Experiment and analysis of high power line-start PM motor*, Przegląd Elektrotechniczny 2/2012
- [3] Bao Y., Mehmood W., Feng X., *Super premium efficiency linestart permanent magnet synchronous motor: design, test and comparison*, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference(PCIC), 2012.
- [4] Debruyne C., Sergeant P., Derammelaere S., Desmet J., Lieven Vandeveld L.: Influence of

Supply Voltage Distortion on the Energy Efficiency of Line Start Permanent Magnet. IEEE Transactions on industry applications, vol. 50, no. 2, march/april 2014

[5] Feng X., Liu L., Kang J., Zhang Y.: *Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor*, XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Roma, Italy

[6] Melfi M.J., Umans S.D., Atem J.E.: *Viability of highly-efficient multi-horsepower line-start permanent-magnet motors*, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC),

[7] Ugale R.T., BalaKrishna Y., Chaudhari B. N.: *Effects of Short Power Interruptions and Voltage Sags on the Performance of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*. 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008 (str. 184-188)

[8] Zawilak T.: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*, Przegląd Elektrotechniczny, 2/2013, s. 177–179.

[9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 4 maja 2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. Nr 93, poz. 623 z dnia 29 maja 2007 r.).

### **Autorzy**

dr inż. Tomasz Zawilak

dr hab. inż. Jan Zawilak prof. PWr.

Politechnika Wroclawska

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr.

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl