

**Mariusz Barański, Krzysztof Kowalski, Wiesław Łyskawiński, Dorota Stachowiak,  
Rafał M. Wojciechowski**  
Politechnika Poznańska

## **ANALIZA WPLYWU LICZBY I ROZMIESZCZENIA PRĘTÓW UZWOJENIA ROZRUCHOWEGO NA WYBRANE PARAMETRY FUNKCJONALNE SILNIKA SYNCHRONICZNEGO MAGNETOELEKTRYCZNEGO**

### **THE INFLUENCE ANALYSIS OF NUMBER AND ARRANGEMENTS BARS OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR ON THE FUNCTIONAL PARAMETERS**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę wpływu liczby i rozmieszczenia w wirniku prętów uzwojenia klatkowego silnika synchronicznego magnetoelektrycznego przystosowanego do rozruchu bezpośredniego (*LSPMSM*) na jego parametry funkcjonalne. Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu polowo-obwodowego modelu silnika opracowanego w programie Maxwell. Rozpatrzono 6-cio biegunowy silnik o wirniku z magnesami trwałymi ułożonymi w obszarze podziałki biegunowej w kształcie litery U. Badano wpływ sposobu rozmieszczenia i liczby prętów uzwojenia klatkowego na przebiegi momentu elektromagnetycznego, prędkości obrotowej, sprawność i na współczynnik mocy silnika. Przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne, dla którego uzyskuje się małe pulsacje momentu oraz bardzo dobre parametry funkcjonalne.

**Abstract:** The paper presents an analysis of the impact of the number and distribution of the rotor cage bars of the line start permanent magnet synchronous motor (*LSPMSM*) on the values of the functional parameters and the waveforms of the electromagnetic torque and the rotational speed. The calculations have been performed using the field model developed in the Maxwell Entertainment. The 6-pole of *LSPMSM*, with the magnets arranged in the U-shaped, has been considered. The design solution has been discussed and presented, which achieves a small torque ripple and good functional parameters.

**Słowa kluczowe:** *Silnik synchroniczny o rozruchu bezpośrednim, parametry funkcjonalne, analiza numeryczna.*

**Keywords:** *Line start permanent magnet synchronous motor, functional parameters, numerical analysis.*

### **1. Wstęp**

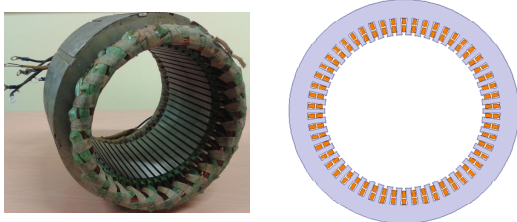
Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM) charakteryzują się dużą sprawnością i współczynnikiem mocy bliskim jedności [9, 15]. Parametry te są stałe w szerokim zakresie zmian obciążenia. Do budowy tych silników często wykorzystuje się stojany maszyn indukcyjnych. Wymaga to jednak odpowiednich zmian w technologii wytwarzania poszczególnych podzespołów silnika, a w szczególności wirnika. W celu obniżenia kosztów i czasu produkcji proponuje się m.in. wykonywanie w jednym procesie technologicznym elementów obwodu magnetycznego silników PMSM z materiałów proszkowych [13, 14]. Opracowano również interesujące konstrukcje z dzielnymi magnesami powierzchniowymi [10, 11] umożliwiające redukcję strat wirowych w magnesach trwałych.

Główną wadą PMSM jest konieczność zastosowania do ich rozruchu układów przekształt-

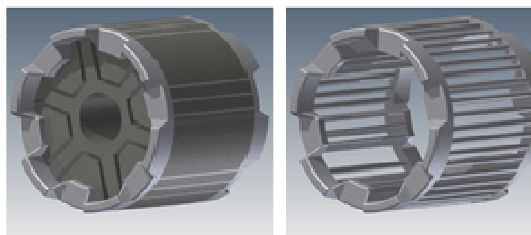
nikowych, które zwiększają koszt układów napędowych z tymi silnikami. W celu uniknięcia tej wady w wielu ośrodkach naukowo-badawczych [1] prowadzone są intensywne prace nad silnikami synchronicznymi przystosowanymi do rozruchu asynchronicznego przy bezpośrednim podłączeniu do sieci elektrycznej (*Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors-LSPMSM*). Tego typu silniki ze względu na zalety coraz częściej stosowane są w napędach pomp, wentylatorów i kompresorów wykorzystywanych zwłaszcza w przemyśle ciężkim oraz górnictwie [4, 5, 12]. Silniki *LSPMSM* stanowią zamienniki powszechnie stosowanych silników indukcyjnych. Często do ich budowy wykorzystuje się podzespoły silników indukcyjnych, zastępując klasyczny wirnik klatkowy wirnikiem z magnesami trwałymi i z uzwojeniem rozruchowym [3]. Silniki *LSPMSM* podobnie jak silniki indukcyjne cechują się dużą przeciążalnością i niezawodnością pracy. Ich zaletą są lepsze parametry eks-

ploatacyjne (większa sprawność, współczynnik mocy oraz mniejszy prąd pobierany z sieci zasilającej) [6]. Badania nad nowymi strukturami tych silników oraz intensywne prace nad opracowaniem i wdrożeniem do produkcji maszyn o coraz to większych mocach znamionowych pozwoli na znaczne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej.

Niniejszy artykuł jest kontynuacją wcześniejszych prac autorów związanych z opracowaniem nowych konstrukcji silników synchronicznych o rozruchu własnym [2, 7, 8] realizowanych w ramach projektu „Nowa generacja energo-oszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”. W pracy dążono do znalezienia takiej liczby i sposobu rozmieszczania prętów klatki w wirniku, aby zaprojektowany silnik LSPMSM charakteryzował się dużymi wartościami momentu rozruchowego i momentu wpadu [7], pożądanymi wartościami parametrów znamionowych, a także niską zawartością harmonicznych w przebiegu momentu. Jako bazę do rozważań przyjęto silnik synchroniczny o rozruchu bezpośrednim, mocy 7.5 kW i prędkości synchronicznej równej 1000 obr/min, zasilany z sieci trójfazowej o napięciu 400 V. Widok obwodu stojana oraz wirnika rozpatrywanego silnika pokazano odpowiednio na rysunku 1 i 2. W celu przeprowadzenia analizy wpływu liczby i rozmieszczenia prętów klatki rozruchowej na parametry funkcjonalne badanego silnika opracowano jego połowo-obwodowy model w środowisku Maxwell ver. 15. W modelu sparаметryzowano wybrane wymiary wirnika, prętów uzwojenia klatkowego, liczby zwojów uzwojenia stojana oraz charakterystykę odmagnesowania materiałów magnetycznie twardych. W celu wykonania obliczeń projektowo- optymalizacyjnych sprzężono środowisko symulacyjne Maxwell z oprogramowaniem własnym.



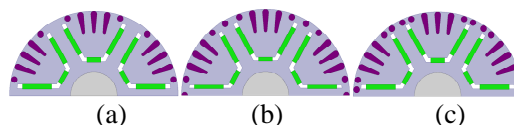
Rys. 1. Widok oraz przekrój poprzeczny obwodu stojana



Rys. 2. Widok obwodu magnetycznego oraz klatki wirnika opracowanego silnika LSPMSM

## 2. Wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych

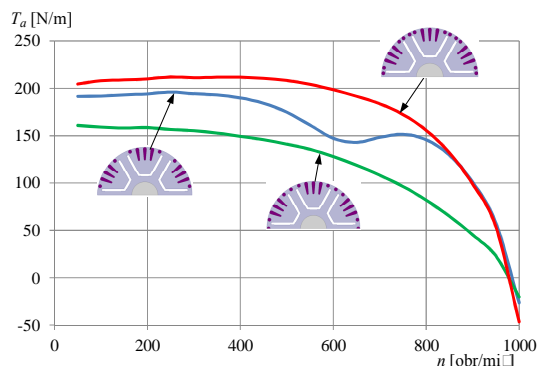
Analizowano wpływ zmiany liczby prętów na przebieg momentu, prędkość obrotową oraz wartości wybranych parametrów funkcjonalnych. W rozpatrywanym silniku modyfikowano strukturę wirnika zmieniając liczbę prętów. Badania symulacyjne wykonano dla 30, 36 i 42 prętów klatki rozruchowej umieszczonych w wirniku jak na rys. 3.



Rys. 3. Struktury wirników silnika LSPMSM:

a) wirnik z 30 prętami, b) wirnik z 36 prętami, c) wirnik z 42 prętami

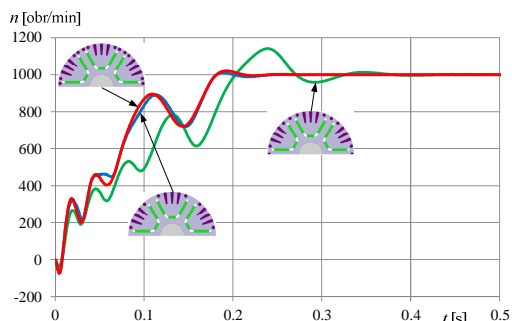
Wykorzystując wcześniejsze doświadczenie autorów w projektowaniu tego typu maszyn [7] badania rozpoczęto od wyznaczenia dla rozpatrywanych wariantów silnika zależności momentu asynchronicznego  $T_a$  od prędkości  $n$ . Na rysunku 4 zestawiono charakterystyki  $T_a(n)$  wyznaczone przy braku magnesów trwałych w wirnikach.



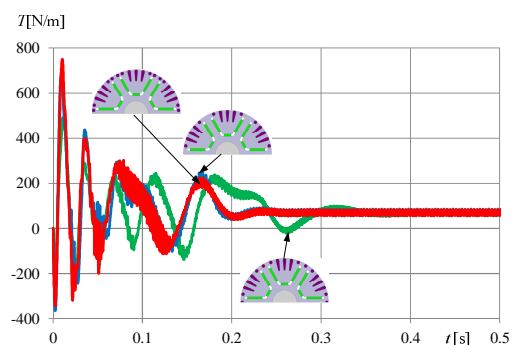
Rys. 4. Moment elektromagnetyczny w funkcji prędkości obrotowej – wirnik bez magnesów

W celu porównania parametrów rozruchowych rozpatrywanego silnika wyznaczono przebiegi prędkości obrotowej i momentu

podczas rozruchu (rys. 5 i rys. 6). Obliczenia symulacyjne wykonano przy uwzględnieniu magnesów trwałych w wirnikach. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń stwierdzono, że silnik z wirnikiem o 42 prętach charakteryzuje się najlepszymi parametrami rozruchowymi.



Rys. 5. Przebiegi prędkości obrotowej podczas rozruchu silnika



Rys. 6. Przebiegi momentu podczas rozruchu silnika

Następnie analizowano wpływ liczby prętów w wirniku na wartości parametrów funkcjonalnych badanego silnika w stanach ustalonych. W tabeli 1 zestawiono obliczone wartości sprawności ( $\eta$ ), współczynnika mocy ( $\cos\phi$ ), współczynnika energooszczędności ( $\eta \cdot \cos\phi$ ), średniej wartości momentu elektromagnetycznego ( $T_{av}$ ) i współczynnika pulsacji momentu ( $\Delta T$ ). Pulsacje momentu elektromagnetycznego wyznaczano z zależności:

$$\Delta T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{av}} \cdot 100\%$$

gdzie:  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ ,  $T_{av}$  – odpowiednio wartość maksymalna, minimalna i średnia momentu jakie wystąpiły w jednym okresie przebiegu w stanie ustalonym.

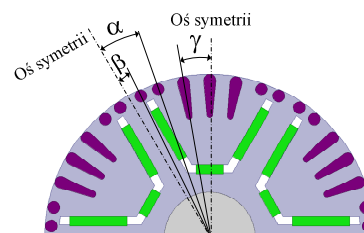
Na podstawie zestawionych w tabeli 1 wartości parametrów funkcjonalnych analizowanych wariantów silnika stwierdzono, że w warunkach znamionowych najmniejszą energo-

chłonnością charakteryzuje się silnik o 42 prętach (największa wartość współczynnika  $\eta \cdot \cos\phi$ ). Głównie z tego względu do dalszych badań wybrano silnik o 42 prętach. Dla wytypowanej struktury zbadano wpływ rozmieszczenia prętów na przebiegi momentu elektromagnetycznego, prędkości obrotowej oraz na wybrane parametry funkcjonalne.

Tabela 1. Wybrane parametry funkcjonalne w ustalonym stanie pracy

Liczba prętów	$\eta$	$\cos\phi$	$\eta \cdot \cos\phi$	$T_{av}$	$\Delta T$
	[-]	[-]	[-]	[Nm]	[%]
30	0.931	0.912	0.849	71.25	41.42
36	0.936	0.934	0.874	71.31	24.68
42	0.946	0.943	0.892	71.38	36.65

Analizowano rozmieszczenie prętów o przekroju kołowym i kropłowym. Podczas badań zmieniano ich położenie kątowe. W rozważaniach założono, że kąty pokazane na rys. 7 zmieniają się zgodnie z zależnościami:  $\alpha = \alpha_p + \Delta\alpha$ ;  $\beta = \beta_p + \Delta\alpha + \Delta\beta$ ,  $\gamma = \gamma_p + \Delta\gamma$  przy czym kąty  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ ,  $\gamma_p$  oznaczają położenia początkowe.

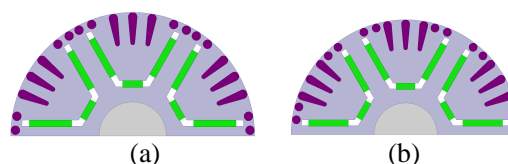


Rys. 7. Oznaczenie kątów określających rozmieszczenia prętów

Autorzy rozpatrzyli wiele sposobów rozmieszczenia prętów w wirniku. W niniejszej pracy ograniczyli się do przedstawienia trzech wybranych wariantów kątowej zmiany rozmieszczenia prętów, tj.:

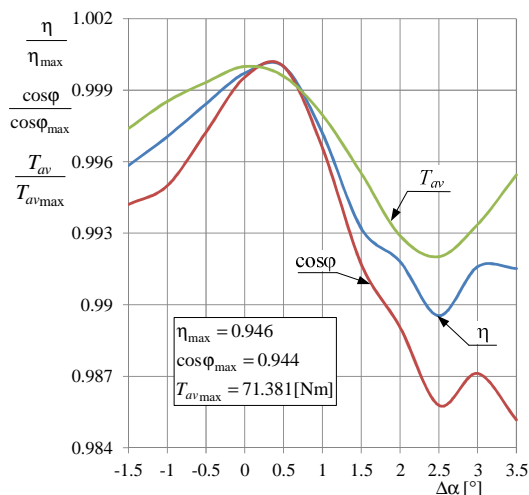
1. zmiana  $\Delta\alpha$  przy  $\Delta\beta = 0^\circ$ ,  $\Delta\gamma = 0^\circ$
2. zmiana  $\Delta\beta$  przy  $\Delta\alpha = 1^\circ$ ,  $\Delta\gamma = 0^\circ$
3. zmiana  $\Delta\gamma$  przy  $\Delta\alpha = 1^\circ$ ,  $\Delta\beta = -0.5^\circ$

Na rys. 8 przedstawiono dwa skrajne położenia żłobków o przekroju kołowym dla wariantu 1:

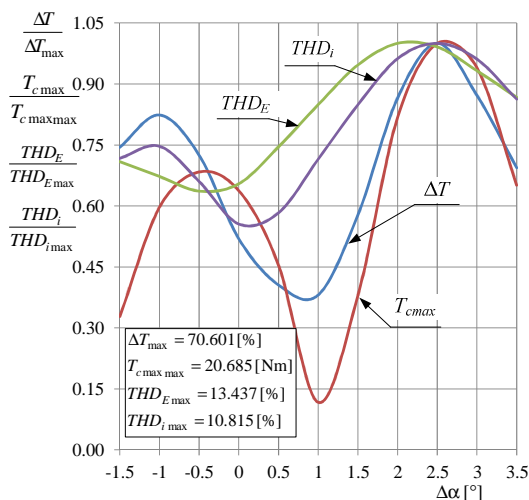


Rys. 8. Dwa skrajne położenia żłobków o przekroju kołowym dla wariantu 1: a)  $\Delta\alpha = -1.5$ ; b)  $\Delta\alpha = 3.5$

Wyniki obliczeń sprawności, współczynnika mocy i momentu średniego przy zmianie kątów  $\alpha$  i  $\beta$  o  $\Delta\alpha$  dla ustalonego stanu pracy pokazano na rys. 9. Na rysunku 10 przedstawiono zmianę wartości współczynnika pulsacji momentu, momentu zaczepowego maksymalnego, zawartości wyższych harmonicznych w sile elektromotorycznej  $THD_E$ , i prądzie  $THD_i$  w funkcji zmiany kąta  $\Delta\alpha$ . W tabeli 2 zestawiono obliczone wartości wybranych parametrów funkcjonalnych.



Rys. 9. Sprawność, współczynnik mocy, moment średni w funkcji zmiany kąta  $\Delta\alpha$

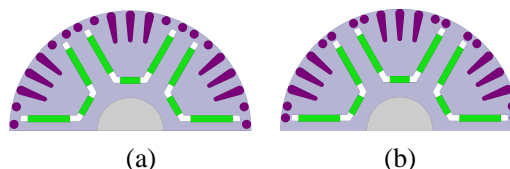


Rys. 10. Współczynnik pulsacji momentu, moment zaczepowy maksymalny,  $THD_E$ , i  $THD_i$  w funkcji zmiany kąta  $\Delta\alpha$

Na rysunku 11 pokazano dwa skrajne położenia żłobków o przekroju kołowym dla 2 wariantu kątowej zmiany rozmieszczenia prętów.

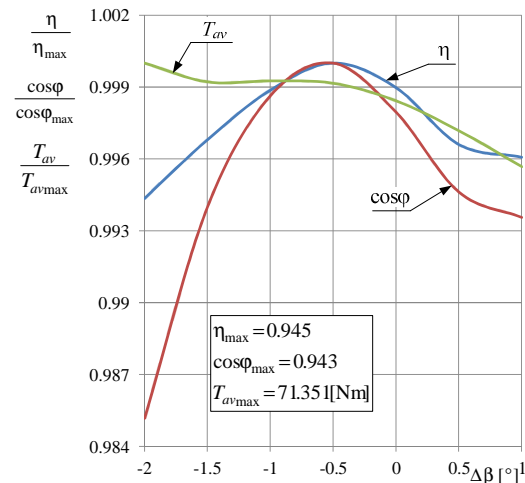
Tabela 2. Wybrane parametry funkcjonalne dla ustalonego stanu pracy przy zmianie kąta  $\Delta\alpha$

$\Delta\alpha$ [°]	$\eta \cdot \cos\phi$ [-]	$I_{rms}$ [A]	$E_{rms}$ [V]	$T_{av}$ [Nm]	$\Delta T$ [%]
-1.5	0.884	11.47	224.94	71.20	52.56
-1	0.886	11.47	225.66	71.28	58.16
-0.5	0.889	11.46	225.84	71.33	51.17
0	0.892	11.44	226.21	71.38	36.65
0.5	0.893	11.43	226.61	71.35	28.62
1	0.888	11.45	226.78	71.24	26.88
1.5	0.880	11.48	226.63	71.06	40.80
2	0.876	11.48	225.25	70.87	61.11
2.5	0.871	11.50	222.60	70.81	70.60
3	0.874	11.50	218.91	70.91	61.55
3.5	0.872	11.55	214.29	71.06	48.98

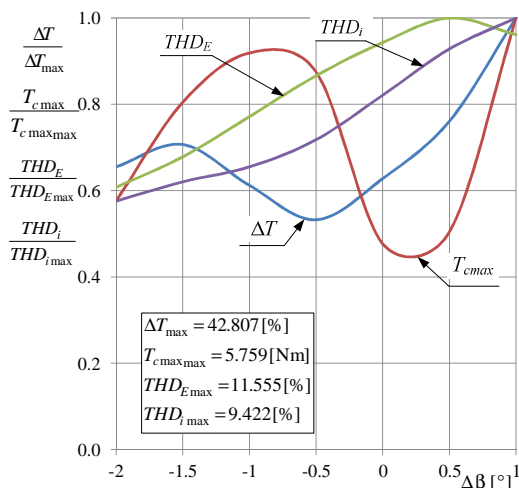


Rys. 11. Dwa skrajne położenia żłobków o przekroju kołowym dla przypadku 2: a)  $\Delta\beta = -2^\circ$ ; b)  $\Delta\beta = 1^\circ$

Wyniki obliczeń sprawności, współczynnika mocy i momentu średniego przy zmianie kąta  $\beta$  o  $\Delta\beta$  również dla ustalonego stanu pracy pokazano na rys. 12. Natomiast na rys. 13 zilustrowano współczynnik pulsacji momentu, moment zaczepowy maksymalny, współczynniki  $THD_E$ , i  $THD_i$  w funkcji zmiany kąta  $\Delta\beta$ . W tabeli 3 zestawiono obliczone parametry funkcjonalne. Obliczenia wykonano dla wariantu 1 silnika o najlepszych parametrach funkcjonalnych, tj. dla  $\Delta\alpha = 1^\circ$ .



Rys. 12. Sprawność, współczynnik mocy, moment średni w funkcji zmiany kąta  $\Delta\beta$

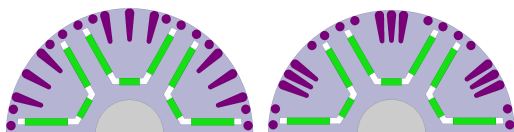


Rys. 13. Współczynnik pulsacji momentu, moment zaczepowy maksymalny,  $THD_E$ , i  $THD_i$  w funkcji zmiany kąta  $\Delta\beta$

Tabela 3. Wybrane parametry funkcjonalne w ustalonym stanie pracy przy zmianie kąta  $\Delta\beta$

$\Delta\beta$	$\eta \cdot \cos\phi$	$I_{rms}$	$E_{rms}$	$T_{av}$	$\Delta T$
[°]	[-]	[A]	[V]	[Nm]	[%]
-2	0.872	11.61	218.41	71.35	28.05
-1.5	0.882	11.50	220.95	71.29	30.26
-1	0.888	11.45	223.50	71.29	26.20
-0.5	0.890	11.43	225.41	71.29	22.80
0	0.888	11.45	226.78	71.23	26.88
0.5	0.883	11.47	227.41	71.15	32.57
1	0.881	11.46	226.39	71.04	42.81

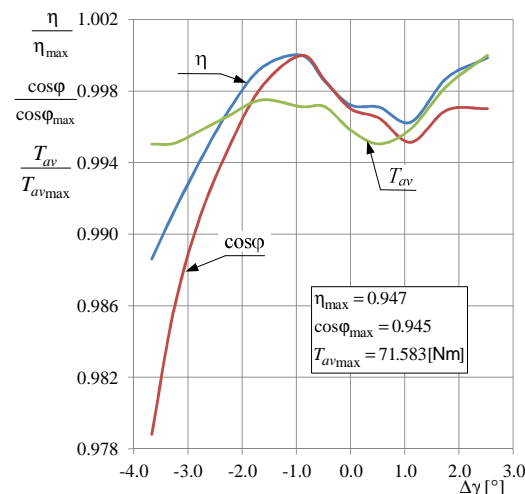
Na rysunku 14 przedstawiono dwa skrajne położenia żłobków o przekroju kropkowym dla wariantu 3.



Rys. 14. Dwa skrajne położenia żłobków o przekroju kropkowym dla wariantu 3: a)  $\Delta\gamma = 2.5^\circ$ ; b)  $\Delta\gamma = -3.7^\circ$

Uzyskane dla stanu ustalonego wyniki obliczeń sprawności, współczynnika mocy i momentu średniego przy zmianie kąta  $\gamma$  o  $\Delta\gamma$  pokazano na rys. 15. Natomiast na rysunku 16 przedstawiono współczynnik pulsacji momentu, moment zaczepowy maksymalny,  $THD_E$ , i  $THD_i$  w funkcji zmiany kąta  $\Delta\gamma$ . W tabeli 4 zestawiono obliczone wartości parametrów funkcjonalnych. Obliczenia wykonano dla wariantów 1 i 2 silnika

charakteryzujących się najlepszymi parametrami funkcjonalnymi, tj.  $\Delta\alpha = 1^\circ$  i  $\Delta\beta = -0.5^\circ$ .



Rys. 15. Sprawność, współczynnik mocy, moment średni w funkcji zmiany kąta  $\Delta\gamma$

Tabela 4. Wybrane parametry funkcjonalne w ustalonym stanie pracy przy zmianie kąta  $\Delta\gamma$

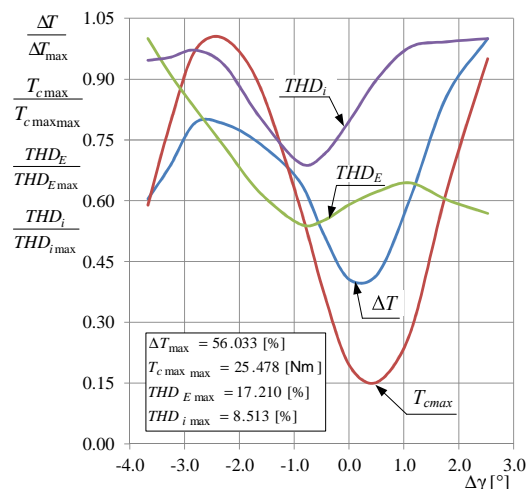
$\Delta\gamma$	$\eta \cdot \cos\phi$	$I_{rms}$	$E_{rms}$	$T_{av}$	$\Delta T$
[°]	[-]	[A]	[V]	[Nm]	[%]
2.5	0.893	11.48	222.86	71.58	56.03
1.8	0.892	11.46	224.32	71.46	48.03
1.1	0.888	11.45	225.40	71.29	33.96
0.5	0.890	11.43	225.63	71.23	23.55
0.0	0.890	11.43	225.44	71.28	22.75
-0.5	0.893	11.43	225.00	71.38	29.15
-0.9	0.895	11.41	224.83	71.38	36.28
-1.6	0.893	11.44	224.01	71.40	41.62
-2.3	0.888	11.47	222.85	71.34	44.24
-2.8	0.882	11.50	220.99	71.28	44.39
-3.3	0.875	11.55	218.94	71.23	38.40
-3.7	0.866	11.64	217.01	71.23	33.90

### 3. Podsumowanie

Przeprowadzona przez autorów analiza wpływu liczby i rozmieszczenia prętów klatki w wirniku na parametry funkcjonalne badanego silnika pozwoliła na wytypowanie struktury wirnika, która umożliwi zmniejszenie energochłonności silnika i poziomu pulsacji momentu elektromagnetycznego. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że niewielka zmiana rozmieszczenia kąтового okrągłych prętów  $\Delta\alpha$  może znacząco zwiększyć pulsacje momentu. Związane jest to

przede wszystkim ze znaczącą zmianą momentu zaczepowego, który dla pierwszego wariantu, przy niekorzystnym rozmieszczeniu prętów, może wzrosnąć nawet 10-krotnie w stosunku do optymalnej struktury silnika.

Przeprowadzona szczegółowa analiza parametrów funkcjonalnych pozwoliła wytypować finalną konstrukcję silnika. Obecnie trwają prace związane z budową prototypu silnika. Po zbudowaniu prototypu przewiduje się weryfikację pomiarową wyników badań symulacyjnych.



Rys. 16. Współczynnik pulsacji momentu, moment zaczepowy maksymalny,  $THD_E$ , i  $THD_i$  w funkcji zmiany kąta  $\Delta\gamma$

#### 4. Literatura

- [1] A.D. Aliabad, M. Mirsalim, N.F. Ershad "Line-start permanent-magnet motors: significant improvements in starting torque, synchronization, and steady-state performance" *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 46, pp. 4066-4072, 2010.
- [2] M. Barański, P. Idziak, W. Królikowski, W. Łyskawiński "Analiza stanów pracy silników indukcyjnego i synchronicznego magnetoelektrycznego o rozruchu bezpośrednim" *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, Nr 99, s. 227-232, 2013.
- [3] M. Barański, W. Szelaż, C. Jędrzycka, J. Mikołajewicz, P. Łukaszewicz "Analiza i badanie silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim i magnesach w wirniku rozłożonych w kształcie litery U" *Przegl. Elektrotech.*, R. 89, Nr 2b, s. 107-111, 2013.
- [4] T. Ding, N. Takorabet, F.M. Sargos "Design and analysis of different line-start PM synchronous motors for oil-pump applications" *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 45, No. 3, pp. 1816-1819, 2009.

[5] A. Dzikowski "Zastosowanie silnika z magnesami trwałymi do napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego" *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 94, s. 165-170, 2012.

[6] P. Idziak, M. Barański, W. Łyskawiński, K. Kowalski "Ocena wybranych parametrów energetycznych modelowych silników prądu przemiennego małej mocy o różnych konstrukcjach wirnika", *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 100, s. 53-57, 2013.

[7] C. Jędrzycka, R. Wojciechowski, A. Demenko "Finite element analysis of the asynchronous torque in LSPMSM with non-symmetrical squirrel cage winding" *IJAEM*, Vol. 46, No. 2, pp. 367-373, 2014.

[8] C. Jędrzycka, W. Łyskawiński, D. Stachowiak "Analiza nasycenia strefy przyszczelinowej w silniku synchronicznym z magnesami ułożonymi w kształcie litery „V”" *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 59, nr 10, s. 1089-1092, 2013.

[9] K. Kurihara, M.A. Rahman "High-efficiency line-start interior permanent-magnet synchronous motors" *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 40, No. 3, pp. 789-796, 2004.

[10] H. May, R. Palka, P. Paplicki, S. Szkolny, W.R. Canders "Modified concept of permanent magnet excite synchronous machines with improved high-speed features" *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 60, No. 4, pp. 531-540, 2011.

[11] A. Młot, M. Korkosz, M. Łukaniszyn "Iron loss and eddy-current loss analysis in a low-power BLDC motor with magnet segmentation" *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 61, No. 1, pp. 33-46, 2012.

[12] B. Polnik "Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych" *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 94, s. 81-86, 2012.

[13] H. Wiśniewska-Weinert, V. Leshchynsky, J. Wendland, J. Lisowski "Rozwój technologii metalurgii proszków" *Stal Metale & Nowe Technologie*, Nr 11-12, s. 52-59, 2008.

[14] R.M. Wojciechowski, C. Jędrzycka, P. Łukaszewicz, D. Kapelski "Analysis of high speed permanent magnet motor with powder core material" *COMPTEL*, Vol. 31, No. 5, pp. 1528-1540, 2012.

[15] J. Zawilak, T. Zawilak "Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności", *Przegl. Elektrotech.*, Vol. 90, Nr 1, s. 224-226, 2014.

#### Autorzy

dr inż. Mariusz Barański, dr inż. Krzysztof Kowalski, dr hab. inż. Wiesław Łyskawiński, dr inż. Dorota Stachowiak, dr inż. Rafał Wojciechowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, {Mariusz.Barański/Krzysztof.Kowalski/Wiesław.Łyskawiński/Dorota.Stachowiak/Rafał.Wojciechowski}@put.poznan.pl