

Nowa konstrukcja maszyny o polu poprzecznym z wykorzystaniem rdzenia płaskiego

Streszczenie. Artykuł przedstawia nowe podejście do konstrukcji maszyny o polu poprzecznym. W proponowanym rozwiązaniu zastosowano rdzeń stojana znany z maszyn pola wirującego. Takie rozwiązanie znacznie upraszcza konstrukcję maszyny jednocześnie poprawiając wykorzystanie powierzchni magnesów i minimalizując strumień rozproszenia.

Abstract. The article presents a new approach to the construction of a transverse flux machine. The proposed solution uses a stator core known from rotating field machines. This solution significantly simplifies the structure of the machine while improving the use of the magnet surface and minimizing the leakage flux. (**New design of the transverse flux machine using a flat core**).

Słowa kluczowe: maszyna elektryczna o polu poprzecznym.

Keywords: transverse flux machine.

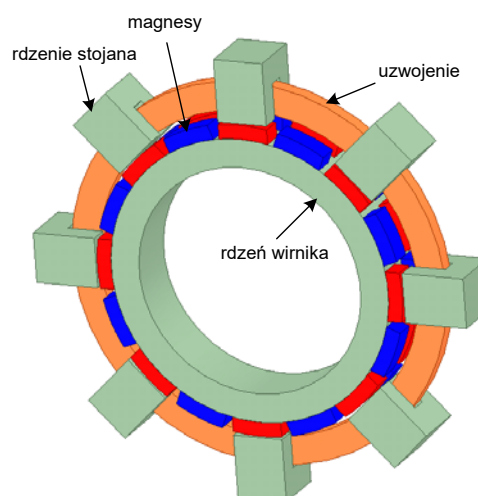
Wstęp

Dynamiczny rozwój nowych konstrukcji maszyn elektrycznych, który można obserwować w ostatnich latach, związany jest przede wszystkim z rozwojem elektromobilności oraz poszukiwaniem nowych rozwiązań generatorów stosowanych w odnawialnych źródłach energii. Jednym z głównych kryteriów oceny pod kątem przydatności maszyny do zastosowań w napędach mobilnych jest stosunek mocy do masy. Konstrukcja maszyny elektrycznej z polem poprzecznym ang. Transverse Flux Machine (TFM) została opatentowana w roku 1888 [1], a prawie sto lat później adaptowana do aktualnych technicznych możliwości i technologii [2]. W ciągu minionych od tego czasu ponad trzydzieści lat poświęcono TFM wiele prac badawczych [3,4,5]. Wykazały jej liczne pozytywne własności eksploatacyjne, z których najważniejsza to moment uzyskiwany z jednostki objętości znacznie większy niż w innych maszynach. Mimo to nie jest dotąd powszechnie stosowana i produkowana. Przyczyn należy doszukiwać się w jej wadach, z których najpoważniejsze to:

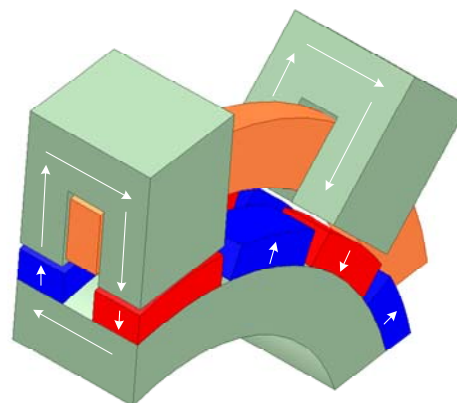
- małe wykorzystanie powierzchni magnesów trwałych,
- duże strumienie rozproszenia,
- skomplikowana konstrukcja rdzenia,
- wyższy koszt produkcji.

Przez maszyny z polem poprzecznym rozumiane są konstrukcje zawierające takie konfiguracje obwodów elektromagnetycznych, w których linie sił pola pośredniczącego w przemianie energii pozostają w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu. Na rysunku 1 przedstawiono widok ogólny jednego segmentu silnika z poprzecznym obwodem magnetycznym [6], na rysunku 2 – fragment jego przekroju poprzecznego. Linie sił pola magnetycznego wytwarzane przez magnesy trwałe znajdujące się na wirniku zamykają się poprzez rdzenie stojana o kształcie odwróconego U. Rdzenie te obejmują cewkę zapewniając sprzężenie magnetyczne. Liczba rdzeni U jest równa połowie liczby par magnesów umieszczonych na wirniku. Kiedy wirnik obróci się po podziałkę biegunową kierunek linii sił pola zmieni się na przeciwny, dzięki czemu w uzwojeniu może się indukować przemienna siła elektromotoryczna. Ze względu na przemienny strumień rdzenie U muszą być wykonane z materiałów magnetycznie miękkich.

Układ przedstawiony na rysunku 1 należy uważać za segment (część) maszyny obejmujący jej jedną fazę. Kilka układów podobnego rodzaju można łączyć w celu utworzenia maszyny dwu- lub wielofazowej.

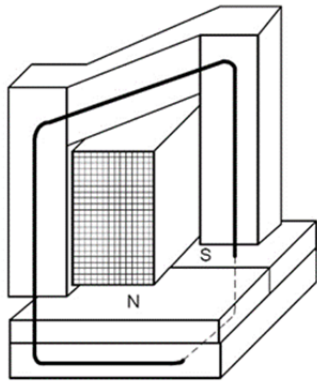


Rys. 1 Widok ogólny segmentu maszyny TFM



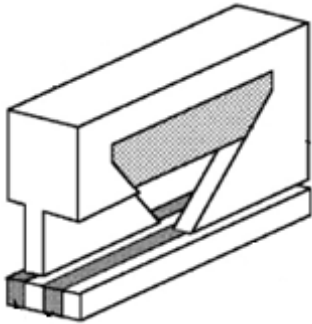
Rys. 2 Fragment przekroju maszyny TFM

Celem poprawy wykorzystania powierzchni czynnej magnesów oraz zmniejszenia strumienia rozproszenia opracowano różne warianty konstrukcji. Najbardziej znaną metodą poprawy tego parametru jest skośna budowa rdzeni U [6]. W tym przypadku rdzenie ustawione są w taki sposób, aby końce każdego z nich znajdowały się nad dwoma sąsiednimi magnesami ułożonymi naprzemiennie na powierzchni wirnika. Przykład takie rozwiązania przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3 Fragment przekroju maszyny TFM ze skośnym rdzeniem [6]

Udoskonaleniem tego rozwiązania jest zastosowanie na końcach rdzenia rozszerzenia, którego zadaniem jest skupienie linii sił pola wychodzących z magnesu [7]. Dodatkowo jako element wzbudzający zastosowano zamiast magnesów powierzchniowych pierścieni złożony z magnesów trwałych i wstawek ferromagnetycznych. Rozwiązanie to zostało przedstawione na rysunku 4.



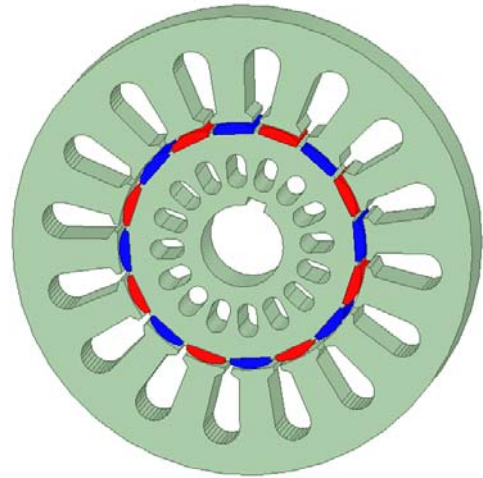
Rys. 4 Rdzeń skośny TFM z rozszerzonym końcem [7]

Jak wcześniej wspomniano, rdzenie U muszą być wykonane z materiałów magnetycznie miękkich. W przypadku konstrukcji przedstawionej na rysunkach 1 i 2 możliwe jest wykonanie ich w postaci pakietowanej z blach elektrotechnicznych. W konstrukcjach z rdzeniami skośnymi (rysunki 3 i 4) zastosowanie blach jest trudne lub wręcz niewykonalne. W takim przypadku rdzenie muszą zostać wykonane z magnetycznych kompozytów proszkowych (MPC - Magnetic Powder Composites). Są to materiały, których podstawowym elementem jest proszek żelazny. Na obecnym etapie rozwoju maszyn elektrycznych zastosowanie materiałów kompozytowych do budowy obwodów magnetycznych nie weszło do powszechnego użytku przemysłowego, ogranicza się raczej do konstrukcji eksperymentalnych. Dlatego też celowym wydaje się dalsze poszukiwanie rozwiązań umożliwiających rozwój bardzo obiecującej konstrukcji jaką jest maszyna TFM.

Nowa koncepcja maszyny o polu poprzecznym

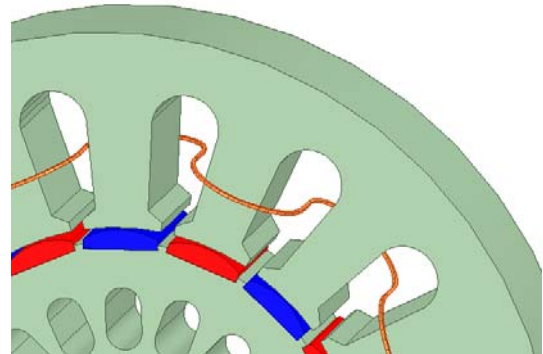
Badania prowadzone nad maszynami z polem poprzecznym doprowadziły do opracowania koncepcji zastosowania w tej konstrukcji rdzenia znanego powszechnie z maszyn prądu przemiennego o polu radialnym. Z magnetycznego punktu widzenia, rdzeń stosowany w klasycznych maszynach o polu wirującym może być traktowany jak ciąg rdzeni U stosowanych w maszynie TFM (rys.1) obróconych o 90° . Przy takiej konfiguracji strumień wzbudzany magnesami nie przepływa już poprzecznie, lecz w płaszczyźnie wektora obrotu wirnika – stąd nazwa płaski. Maszyna z takim rdzeniem przestaje już być maszyną z polem poprzecznym zachowując jednak

jej własności [8]. Dla odróżnienia proponowaną nową konstrukcję nazwano roboczo maszyną zaczepową (Cogging Motor). Widok ogólny jednego segmentu (jednej fazy) maszyny zaczepowej przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5 Widok ogólny jednego segmentu TFM z płaskim rdzeniem

Modyfikacji wymaga również uzwojenie, dokonując obrotu rdzenia U o 90° cewka zamiast płaskiego pierścienia przyjmuje kształt falisty. Uzwojenie zostaje zatem wydłużone o połączenia czołowe co jest niekorzystne z punktu widzenia klasycznej konstrukcji TFM. Można także wykonać uzwojenie w postaci cewek nazębnych stosowanych często w maszynach PMAC i BLCD, w tym przypadku jednak uzwojenia czołowe są o połowę dłuższe. Widok fragmentu segmentu z uzwojeniem falistym przedstawia rysunek 6.



Rys. 6 Fragmentu segmentu z widocznym jednym zwojem uzwojenia falistego

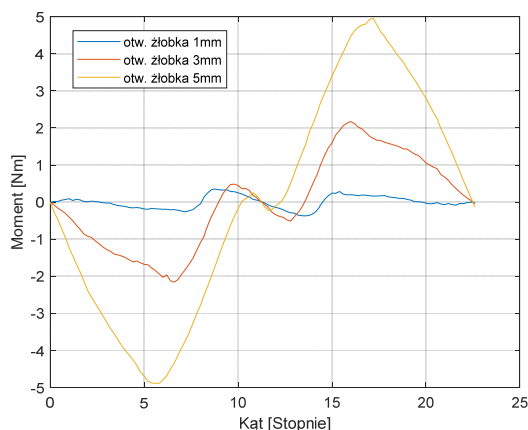
Dla maszyny o zaproponowanej konstrukcji przeprowadzono badania analityczne oraz z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES), których wyniki przedstawiono w pracy [8]. Wynika z nich, że średnia wartość momentu generowanego przez maszynę zaczepową jest około 25% większa od momentu TFM tradycyjnej konstrukcji (Rys. 1) i aż trzykrotnie większa od momentu maszyny indukcyjnej o takich samych gabarytach. Obiecujące wyniki tych badań skłoniły do dalszych prac nad poznaniem właściwości tej konstrukcji oraz możliwości jej aplikacji w praktycznych zastosowaniach.

Moment zaczepowy zmodyfikowanej konstrukcji

Zastosowanie rdzenia płaskiego w konstrukcji maszyny zaczepowej rozwiązuje problem wykorzystania powierzchni magnesów a zarazem zmniejsza strumień rozproszenia. Maszyn trójfazowych o liczbie magnesów

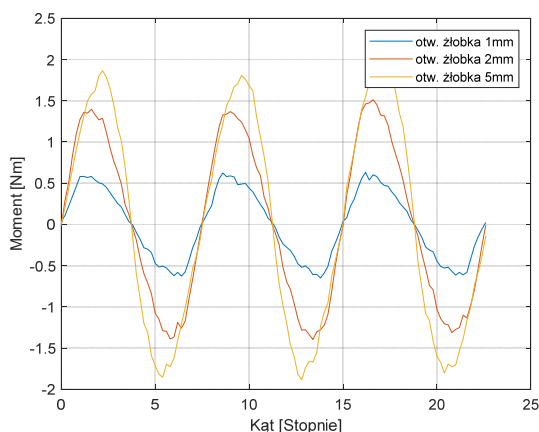
równiej liczbie zębów stojana na ogół nie wykonuje się ze względu na problem momentów zaczepowych. W celu zbadania wartości momentów zaczepowych proponowanej konstrukcji przeprowadzono badania symulacyjne z zastosowaniem metody elementów skończonych. Wszystkie obliczenia prowadzono w pakiecie ANSYS Maxwell 3D.

W obliczeniach przyjęto następujące wymiary maszyny: średnica zewnętrzna stojana 190mm; grubość jednego segmentu 25mm; średnica wewnętrzna stojana 102,8mm, liczba magnesów równa liczbie zębów stojana 16. Z przeprowadzonych badań wynika, że na wartość maksymalną momentu zaczepowego główny wpływ ma otwarcie żłobka. Zmniejszając tą wartość z 5 do 1mm, można kilkukrotnie zredukować moment zaczepowy pojedynczego segmentu. Wyniki obliczeń dla jednego segmentu przy obrocie wirnika o jedną podziałkę żłobkową (22,5°) i różnych otwarcich żłobka przedstawia rysunek 7.



Rys. 7 Przebiegi momentu zaczepowego dla jednego segmentu przy różnym otwarciu żłobka

Obliczenia wykonane dla trzech segmentów przesuniętych o 120° elektrycznych (15° mechanicznych) przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8 Przebieg momentu zaczepowego wypadkowego dla trzech segmentów

Jak widać, po złożeniu trzech segmentów moment zaczepowy dla otwarcia żłobka 5mm ulega redukcji o około 60%. Dla 3mm zmniejsza się o 30%, zaś dla otwarcia żłobka 1mm jest praktycznie niezauważalny. Całkowitej redukcji momentu zaczepowego nie udało się uzyskać za pomocą przedstawionych wyżej zabiegów, zatem jego wartość będzie miała wpływ na wypadkowy moment generowany przez maszynę.

Moment elektromagnetyczny maszyny zaczepowej

Jednym z najistotniejszych aspektów oceny własności każdej maszyny elektrycznej jest określenie wartości i przebiegu rozwijanego momentu elektromagnetycznego. Podstawowy składnik momentu, bez momentu zaczepowego, rozwijanego w jednym segmencie silnika zaczepowego wzbudzanego magnesami trwałymi wynosi:

$$(1) \quad T_e = i \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}$$

gdzie: i – prąd uzwojenia, ψ – strumień skojarzony uzwojenia w stanie bezprądowym.

Strumień skojarzony uzwojenia jest sumą strumieni skojarzonych poszczególnych cewek:

$$(2) \quad \psi = \sum_{k=1}^{2p_b} \psi_{ck} = 2p_b \psi_c$$

Strumień skojarzony pojedynczej cewki żebowej segmentu jest funkcją okresową położenia wirnika:

$$(3) \quad \psi_c = \sum_{\rho=1,3,5,\dots}^{\infty} \Psi_{m\rho} \cos \rho p_b \varphi$$

Jeśli układ zasilania uzwojenia segmentu zapewnia prąd:

$$(4) \quad i = -I_m \sin p_b \varphi$$

wówczas segment wytwarza moment:

$$(5) \quad T_{es} = 2p_b i \frac{\partial \psi_c}{\partial \varphi} = 2p_b^2 I_m \sum_{\rho=1,3,5,\dots}^{\infty} \rho \Psi_{m\rho} \sin p_b \varphi \sin \rho p_b \varphi = p_b^2 I_m \sum_{\rho=1,3,5,\dots}^{\infty} \rho \Psi_{m\rho} \sin p_b \varphi \sin \rho p_b \varphi = p_b^2 I_m \sum_{\rho=1,3,5,\dots}^{\infty} \rho \Psi_{m\rho} (\cos p_b \varphi (\rho - 1) - \cos p_b \varphi (\rho + 1))$$

Moment produkowany przez 3 segmenty o stojanach przesuniętych obwodowo o kąt elektryczny 120° (15° mechanicznych) wytwarzają moment, który jest sumą momentów od poszczególnych segmentów, zasilanych prądami przesuniętymi w fazie o kąt elektryczny 120°. Wirniki segmentów pozostają nieprzesunięte na wspólnym wale. Jeśli we wzorze (5) podstawić uzyskuje się sumując momenty wytwarzane przez trzy segmenty:

$$(6) \quad T_e = p_b^2 I_m \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} (2n-1) \Psi_{m(2n-1)} \left\{ \begin{array}{l} \cos 2p_b \varphi (n-1) + \\ + \cos(2p_b \varphi (n-1) - \frac{4\pi}{3} (n-1)) + \\ + \cos(2p_b \varphi (n-1) - \frac{2\pi}{3} (n-1)) + \\ - \cos 2p_b \varphi n - \cos(2p_b \varphi n - \frac{4\pi}{3} n) - \\ - \cos(2p_b \varphi n - \frac{2\pi}{3} n) \end{array} \right\}$$

Dla kolejnych numerów harmonicznych n otrzymuje się następujące wartości składowych momentu:

$$(7) \quad n = 1: T_{e1} = 3p_b^2 I_m \Psi_{m1}$$

$$n = 2: T_{e2} = 0$$

$$n = 3: T_{e3} = -3 \cdot 5 p_b^2 I_m \Psi_{m5} \cos 6 p_b \varphi =$$

$$= -5 \frac{\Psi_{m5}}{\Psi_{m1}} T_{e1} \cos 6 p_b \varphi$$

$$n = 4: T_{e4} = 3 \cdot 7 p_b^2 I_m \Psi_{m7} \cos 6 p_b \varphi =$$

$$= 7 \frac{\Psi_{m7}}{\Psi_{m1}} T_{e1} \cos 6 p_b \varphi$$

$$n = 5: T_{e5} = 0$$

$$n = 6: T_{e6} = -3 \cdot 11 p_b^2 I_m \Psi_{m11} \cos 12 p_b \varphi$$

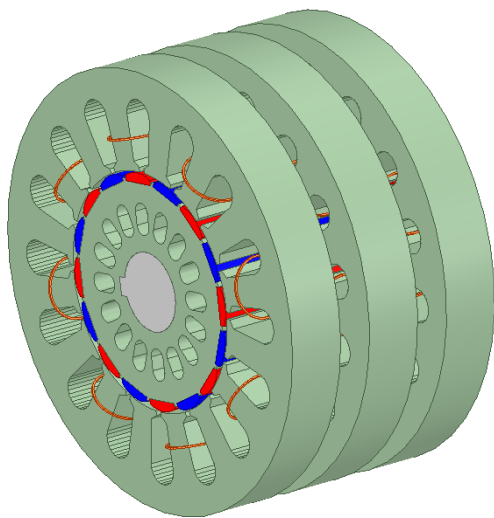
$$n = 7: T_{e7} = 3 \cdot 13 p_b^2 I_m \Psi_{m13} \cos 12 p_b \varphi$$

$$n = 8: T_{e8} = 0$$

Wynika stąd, że wyrażenie dla momentu produkowanego przez 3 segmenty można przedstawić w postaci: (8)

$$T_e = T_{e1} \left(1 + \left(7 \frac{\Psi_{m7}}{\Psi_{m1}} - 5 \frac{\Psi_{m5}}{\Psi_{m1}} \right) \cos 6 p_b \varphi + \right. \\ \left. + \left(13 \frac{\Psi_{m13}}{\Psi_{m1}} - 11 \frac{\Psi_{m11}}{\Psi_{m1}} \right) \cos 12 p_b \varphi + \dots \right)$$

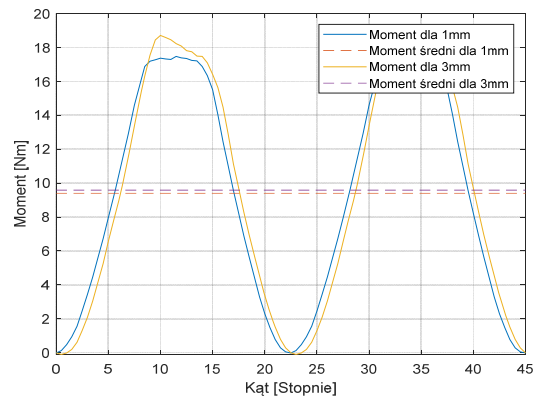
Z powyższego wyprowadzenia wynika, że moment elektromagnetyczny będzie zawierał składową zmienną o pulsacji sześciokrotnie wyższej od pulsacji SEM uzwojenia, pochodzącej od magnesów trwałych. Ze wzoru (8), wynika, że bezpośredni wpływ na amplitudę tej składowej ma 5 i 7 harmoniczna w przebiegu zmian strumienia $\psi_c(\varphi)$. Dla niewielkich prądów uzwojeń (w stanie bliskim biegu jałowego) dominujący wpływ na charakter składowej zmiennej momentu będzie miał moment zaczepowy. Celem potwierdzenia charakteru przebiegu momentu przeprowadzono symulacje dla pojedynczego segmentu oraz na pełnym modelu silnika składającym się z trzech segmentów zasilanych prądem sinusoidalnym o częstotliwości zależnej od kąta położenia wirnika. Widok ogólny modelu przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9 Widok ogólny pełnego modelu silnika

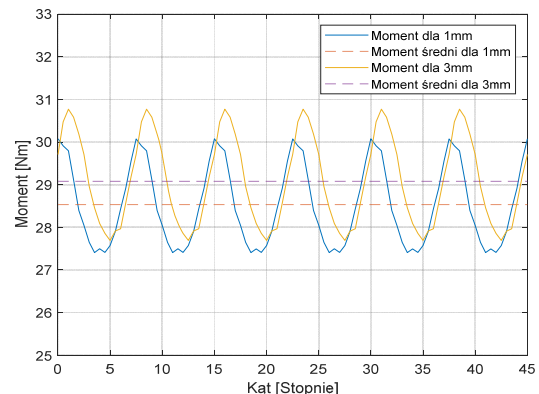
Rysunek 10 przedstawia przebieg momentu elektromagnetycznego generowanego przez pojedynczy segment, wraz z zaznaczeniem jej wartości średniej. Symulację wykonano dla dwóch przypadków otwarcia

żłóbka 3 i 1mm. Jak widać zniekształcenie przebiegu momentu w rejonie wartości szczytowej ma bezpośredni związek z momentem zaczepowym, aczkolwiek jego wpływ na wartość średnią jest pomijalny.

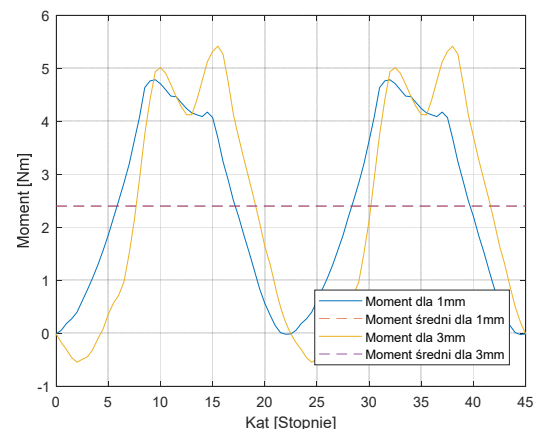


Rys. 10 Przebieg momentu elektromagnetycznego dla jednego segmentu - obciążenie 100%

Zestawienie na wspólnym wale trzech segmentów przesuniętych obwodowo o kąt „elektryczny” 120° zasilanych prądami trójfazowymi, powiększa trzykrotnie moment średni i radykalnie zmniejsza jego składową zmienną – rys.11. Symulacja dla obciążenia 100% potwierdziła także, obecność składowej zmiennej $6p_b\varphi$. Składowa ta w małym stopniu zależy od momentu zaczepowego, ponieważ dla otwarcia żłóbka 3mm wynosi 1,5Nm a dla 1mm 1,2Nm. Udział procentowy składowej zmiennej wynosi dla zasymulowanych przypadków odpowiednio 5,2 i 4,1%.



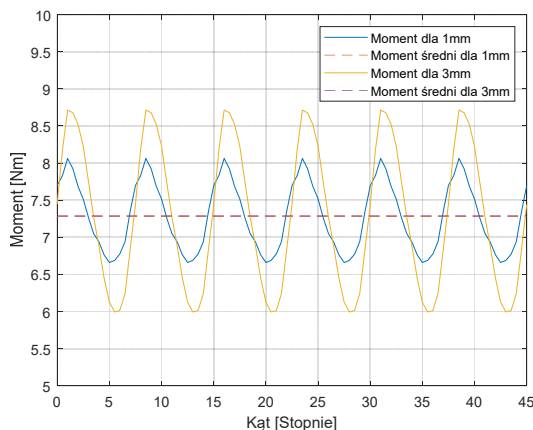
Rys. 11 Przebiegi momentu elektromagnetycznego dla trzech segmentów - obciążenie 100%



Rys. 12 Przebieg momentu elektromagnetycznego dla jednego segmentu - obciążenie 25%

Wpływ momentu zaczepowego na przebieg momentu wypadkowego zgodnie z oczekiwaniem ujawnia się dla mniejszego obciążenia maszyny. Na rysunku 12 przedstawiono przebiegi momentu dla obciążenia 25%. Wartość średnia obu przebiegów pokrywa się, natomiast w przypadku otwarcia żłobka 3mm widać znaczne odkształcenie wartości szczytowej momentu oraz chwilowe wartości ujemne, co wynika z przemiennego charakteru momentu zaczepowego (Rys. 7).

Średni moment wypadkowy dla trzech segmentów (faz) przesuniętych obwodowo o kąt „elektryczny” 120° zasilanych prądami trójfazowymi, podobnie jak poprzednio, jest trzykrotnie większy (Rys. 13). W tym przypadku jednak składowa zmienna pozostaje na znacznie większym poziomie i zależy od momentu zaczepowego, ponieważ widać wyraźnie, że jej amplituda zwiększa się z otwarciem żłobka. Udział procentowy składowej zmiennej dla 3 i 1mm otwarcia żłobka wynosi odpowiednio 18,5% i 8,5%.



Rys. 13 Przebiegi momentu elektromagnetycznego dla trzech segmentów - obciążenie 25%

Dalsze badania proponowanej konstrukcji będą skupiały się na minimalizacji składowej zmiennej momentu poprzez zmianę kształtu magnesów, kształtu główki zęba stojana oraz skoszeniu magnesów lub zębów stojana.

Podsumowanie

Maszyny o strumieniu poprzecznym posiadają znaną i niezaprzeczalną zaletę jaką jest dobry stosunek mocy co do masy. Ze względu jednak na trudności technologiczne z produkcją tego typu konstrukcji nie weszły one jak dotąd do powszechnego użytku. Autor pracy proponuje rozwiązanie, które w znacznym stopniu może ułatwić proces produkcji maszyny o właściwościach silnika TFM poprzez zastosowanie standardowego rdzenia stojana znanego z maszyn pola wirującego. Koncepcja ta na obecną chwilę jest jeszcze niedopracowana. Głównym problemem pozostaje składowa zmienna momentu pod obciążeniem i moment zaczepowy na biegu jałowym. Niemniej jednak wyniki porównawcze przedstawione w pracy [8] powodują, że jest to konstrukcja godna uwagi, dlatego też, na dalszym etapie prac planowana jest optymalizacja zaproponowanej maszyny pod kątem minimalizacji tych niekorzystnych zjawisk.

Autor: dr inż. Tomasz Lerch, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: lerch@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Mordey W.M., Patented in England April 7, 1888, No. 5,162, Patent USA No. 437,501, 1890
- [2] Weh H., May., Achievable Force Densities for Permanent Magnet Excited Machines in New Configurations, *Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM86)*, (1986) 1107-1111
- [3] Sobieraj T., Obserwator siły elektromotorycznej w silniku z magnesami trwałymi o strumieniu poprzecznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 06 (2016) 53-56
- [4] Liu C., Wang X., Wang Y., Lei G., Guo Y., Zhu, J., Comparative study of rotor PM transverse flux machine and stator PM transverse flux machine with SMC cores, *Electrical Engineering*, 104, (2021), 1153–1161.
- [5] Kaiser B., Parspour N., Transverse Flux Machine—A Review, *IEEE Access*, 10, (2022), 18395–18419.
- [6] Gieras, J.F., Performance Characteristics of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator, *Proceedings of the IEEE Internet Conference on Electric Machines and Drives*, (2005) 1293–1299.
- [7] Masmoudi A., Njeh A., Mansouri A., Trabelsi H., Elantably A., Optimizing the Overlap Between the Stator Teeth of a Claw Pole Transverse-Flux Permanent-Magnet Machine, *IEEE Trans. Magn.*, 40 (2004), 1573–1578.
- [8] Drabek T., Kapustka P., Lerch T., Skwarczyński J., A Novel Approach to Transverse Flux Machine Construction, *Energies*, 14, (2021) 7690.