

Permanent magnet brushless DC machines (PMBLDC) for general purpose – part II, results of laboratory measurements

Bezszczotkowe maszyny prądu stałego z magnesami trwałymi (PMBLDC) ogólnego zastosowania – część II, wyniki pomiarów laboratoryjnych

Tomasz Kołacz^a, Krzysztof Madura, Jerzy Skwarczyński^{a,*}, Dominik Zabawa

^aState Higher Vocational School in Tarnów, Mickiewicza 8, 33-100 Tarnów, Poland

Article history:

Received 27 October 2018

Received in revised form

11 November 2018

Accepted 23 December 2018

Available online 27 December 2018

Streszczenie

W pracy dokonano oceny własności silnika PMBLDC małej mocy przeznaczonego do napędu roweru. Część pierwsza opracowania poświęcona jest warunkom powstawania momentu. Zawiera też wzory i zależności, które stanowią podstawę dla opracowania wyników pomiarów laboratoryjnych SEM, prądów, napięć i momentu, przedstawionych w części drugiej. Artykuł ma na celu poszerzenie zasobu informacji o silnikach PMBLDC powszechnego użytku oraz ich własnościach.

Słowa kluczowe: silniki PMBLDC ogólnego zastosowania, specyfika konstrukcji, warunki powstawania momentu, pomiar momentu elektromagnetycznego

Cel pomiarów

Zasadniczym celem przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych było określenie momentu rozwijanego przez wybrany silnik PMBLDC, identyfikacja modelu matematycznego silnika, w tym też uzyskanie na drodze pomiarowej danych oraz informacji umożliwiających wykorzystanie wzorów przedstawionych w pierwszej części artykułu [1]. Obiektem badanym był silnik rowerowy 1kW (przy zasilaniu 48V), 360 obr/min, 23,5A.

1. Pomiar SEM

Dokonano rejestracji cyfrowej SEM indukowanej w uzwojeniu fazy oraz w specjalnej cewce nawiniętej wokół koronki zęba twornika. Przebieg SEM cewki pomiarowej, przy znanej liczbie zwojów tej cewki ($n_{cp} = 8$) oraz znanej rozpiętości cewki (połowa rozpiętości $p_b \vartheta_{cp} = 71^\circ$ umożliwił ocenę liczby zwojów cewek uzwojenia silnika, której producent nie udostępnia, a która potrzebna jest do obliczenia momentu rozwijanego przez silnik. Przy rejestracji SEM uzwojenia stojana pozostawały otwarte i wirnik był napędzany przez inną maszynę. Prędkość obrotowa wirnika w trakcie pomiarów wynosiła $\omega = 10,4 \text{ rad/s}$. Na Rysunku 4 przedstawiono wyniki rejestracji SEM indukowanych w fazach (Rysunek 4a) oraz w cewce pomiarowej (Rysunek 4b).

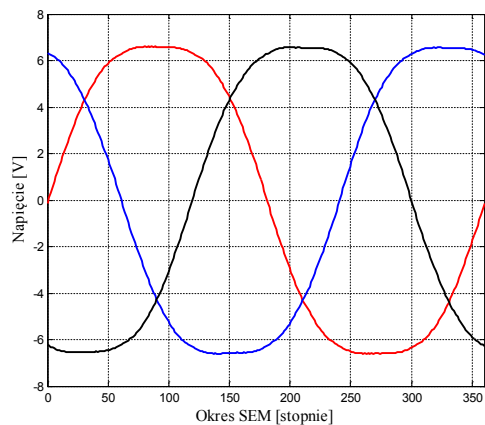
SEM cewki poddano analizie harmoniczej, aby uwzględniając odpowiednie przesunięcia fazowe, wyznaczyć obliczeniowo przebiegi SEM indukowanych w cewkach pomiarowych na zębach sąsiednich (Rysunek 5). Dokonując sumowania SEM poszczególnych cewek uzyskano kształt napięcia fazowego. Liczba zwojów uzwojenia odpowiadała wymaganemu powiększeniu tego kształtu do napięcia fazowego (Rysunek 6).

Przy prędkości kątowej (mechanicznej) $\omega = 10,4 \text{ rad/s}$ uzyskano z pomiaru $E_{clm} = 0,45 \text{ V}$. Wartość podstawowej harmoniczej indukcji pola szczelinowego $B_g(\alpha)$, wymaganą dla uzyskania pierwszej harmoniczej SEM E_{clm} wynika z wzoru (23 – cz. I) i wynosi $B_{g1m} = 1,19 \text{ T}$. Do obliczeń przyjęto:

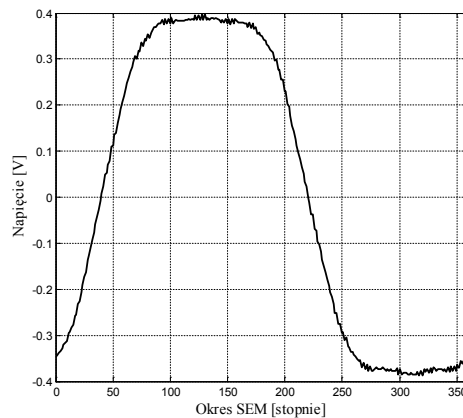
- wymiary: $R_s = 0,266/2 \text{ [m]}$, $l_{Fe} = 0,018 \text{ [m]}$ (Rys. 1 w cz. I artykułu),
- dane cewki pomiarowej $n_{cp} = 8$, $p_b \vartheta_{cp} = 71^\circ$.

Podstawowa harmoniczna przebiegu indukcji pola szczelinowego przedstawionego na Rysunku 2 w części I artykułu wynosi 1,15T i różni się od obliczonej powyżej o 3,5%.

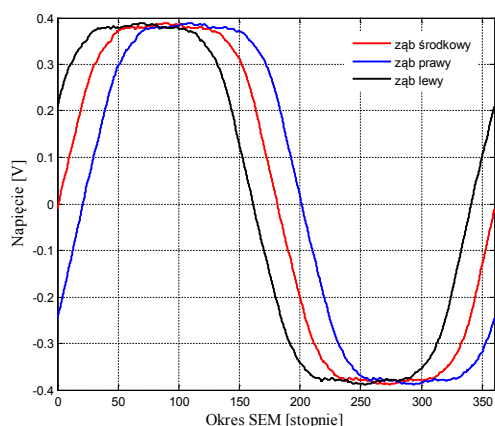
*Corresponding author: j_skw@pwszstar.edu.pl



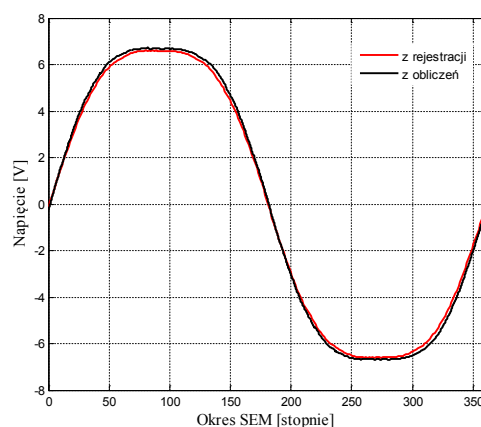
Rysunek 4a. Wyniki rejestracji SEM indukowanych w fazach



Rysunek 4b. Wyniki rejestracji SEM indukowanej w cewce pomiarowej

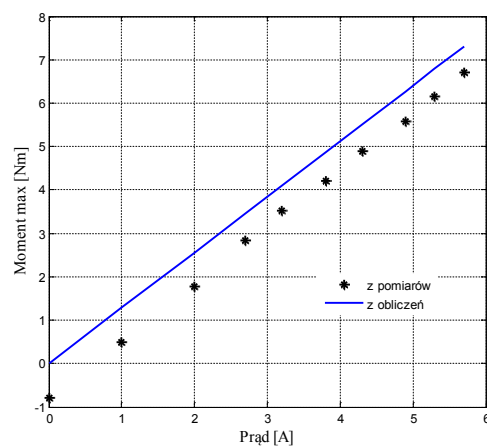


Rysunek 5. Wyznaczone obliczeniowo przebiegi SEM indukowanych w cewkach pomiarowych na trzech zębach sąsiednich

Rysunek 6. Przebiegi SEM fazowej zarejestrowany (czerwony) oraz obliczony (czarny) dla założonej liczby zwojów cewki uzwojenia $n_{cu} = 7$

2. Pomiar momentu maksymalnego

Maksymalny moment wytwarzany przez badany silnik wynika ze wzoru (25), zamieszczonego w pierwszej części artykułu. Moment maksymalny odpowiada minimalnej wartości momentu wymaganej w procesie quasistacjonarnym do obrócenia wirnika z położenia równowagi statycznej do położenia spoza zakresu położenia stabilnych. W praktyce było to realizowane w warunkach zasilania uzwojeń wybranych dwóch faz napięciem stałym i nieruchomym wirniku. Powolne zwiększanie momentu działającego na wirnik powodowało wejście wirnika w stan ciągłego ruchu obrotowego. Najmniejsza wartość momentu wymagana do wprawienia wirnika w ruch obrotowy była poszukiwanym momentem maksymalnym, odpowiadającym zadanej wartości prądu w uzwojeniach zasilanych. Wyniki pomiarów tego momentu przedstawiono na Rysunku 7. Wartość momentu odpowiadająca prądowi równemu zero odpowiada tzw. momentowi zaczepowemu, którego nie uwzględniono w (25).



Rysunek 7. Zależność momentu maksymalnego od prądu uzwojeń

Linia ciągłą na Rysunku 7 wykreślono wartości momentu maksymalnego obliczone wg (25) dla wymiarów, jak na Rysunku 1 w cz. I. Dane cewki uzwojenia badanego silnika wymagane do obliczeń:

$$n_{cu} = 7, w_u = 6/7, \vartheta_{cu} = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{Z_l}, \kappa_{cu} = \frac{3}{40} \vartheta_{cu}.$$

Moment rozwijany przez silnik na podstawie (25):

$$C_{u4} = \frac{1}{3}(\sin 4 \cdot 5\vartheta_{cu} - (6/7)\sin 4 \cdot 3\vartheta_{cu} + \sin 4\vartheta_{cu}) = 0,79;$$

$$T_e = 7 \cdot \frac{0,44}{10,36} \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 7}{8} \cdot \frac{\sin 80^\circ}{\sin 70,95^\circ} \cdot \frac{\sin 4 \cdot 1,5^\circ}{4 \cdot \frac{1}{40} \cdot \frac{\pi}{9}} \cdot 0,79 \cdot i_u(t) \cos 4\varphi = 1,28 \cdot i_u(t) \cos 4\varphi$$

3. Pomiary w warunkach obciążenia silnika

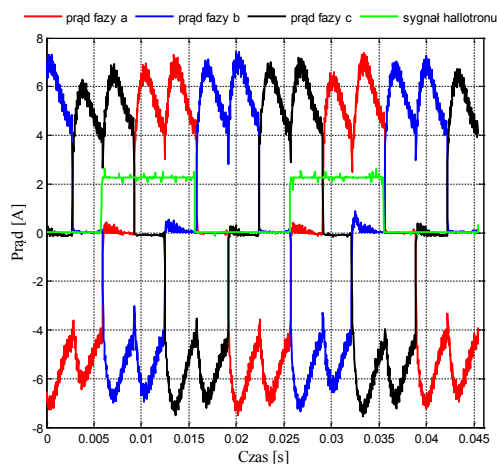
Trudność wykorzystania znanego wzoru:

$$T_e = \frac{1}{\omega} (i_1 e_{1f} + i_2 e_{2f} + i_3 e_{3f}) \quad (1)$$

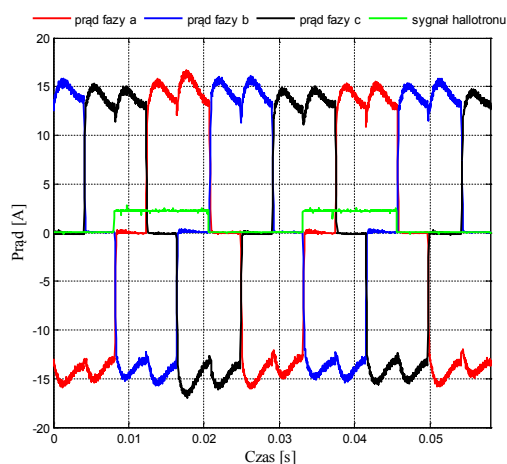
do określenia momentu rozwijanego przez silnik jest spowodowana tym, że SEM e_{1f} , e_{2f} , e_{3f} są mierzalne jedynie na biegu jałowym generatora, gdy w uzwojeniach nie płyną prądy. Wymnożenie SEM zarejestrowanych na biegu jałowym i prądów obciążonego silnika wymaga przedstawienia ich jako funkcji

położenia wirnika, a nie czasu, w którym zostały pomierzone. Zakładając stałą prędkość obrotową wirnika w trakcie pomiaru, ta zmiana jest możliwa, ponieważ położenie wirnika $\varphi = \omega t + \varphi_0$, ale z dokładnością do stałej φ_0 . Dla jej ustalenia konieczny jest znacznik położenia wirnika. Wykorzystany został w tym celu sygnał z hallotronu, fabrycznie zamontowanego na przyszczełinowej powierzchni jarzma twornika. Dalsze trudności wynikają z charakteru cyfrowej rejestracji przebiegów SEM i prądu. Uzyskany ciąg próbek pochodzi z chwil czasu w żaden sposób nie związanych z położeniem wirnika. Do ominięcia tego problemu została wykorzystana analiza harmoniczna SEM i prądu, w wyniku której uzyskano analityczny zapis szeregów trygonometrycznych, przybliżających przebiegi zarejestrowane.

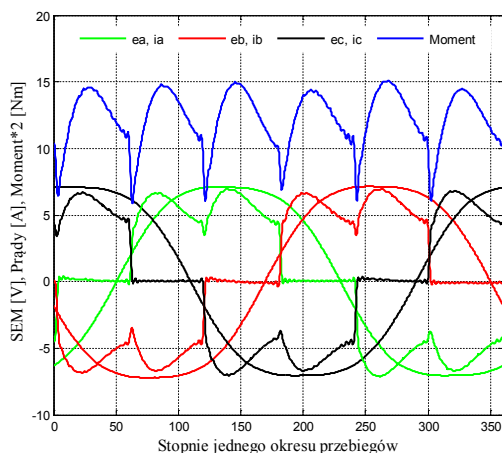
W czasie prób silnik był zasilany napięciem 24V przez oryginalny układ przetwornika DC/DC oraz kluczy energoelektronicznych sterowanych hallotronami. Obciążeniem silnika była prądnicą, zasilająca trzy symetryczne rezystancje. Na rysunkach przedstawiono wybrane wyniki rejestracji, dokonane przy tej samej nastawie regulatora prędkości oraz dwóch różnych wartościach obciążenia (pomiar nr 2 i 5).



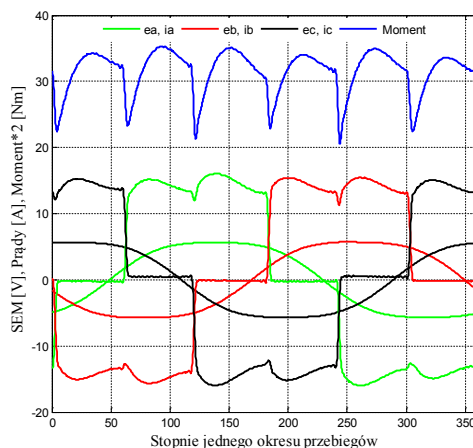
Rysunek 8a. Prądy uzwojeń i sygnał z hallotronu dla obciążenia silnika momentem 6,1Nm



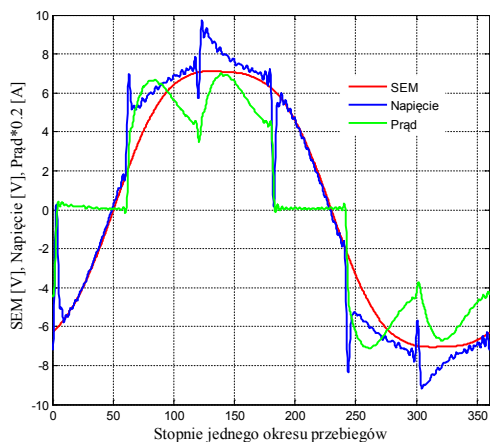
Rysunek 8b. Prądy uzwojeń i sygnał z hallotronu dla obciążenia silnika momentem 15,8Nm



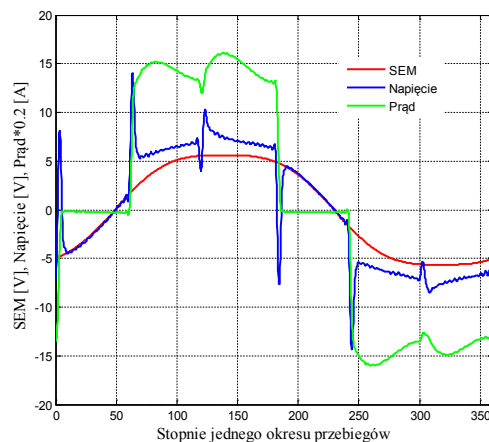
Rysunek 9a. Prądy uzwojeń (po filtracji harmonicznej) na tle przebiegów SEM fazowych oraz przebieg wytwarzanego momentu obliczony wg (1) dla obciążenia silnika momentem 6,1Nm



Rysunek 9b. Prądy uzwojeń (po filtracji harmonicznej) na tle przebiegów SEM fazowych oraz przebieg wytwarzanego momentu obliczony wg (1) dla obciążenia silnika momentem 15,8Nm

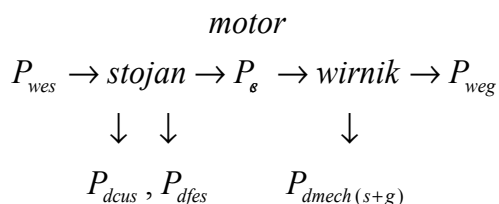


Rysunek 10a. Przebiegi napięć fazowych na tle odpowiednich SEM fazowych oraz przebiegów prądów dla obciążenia silnika momentem 6,1 Nm



Rysunek 10b. Przebiegi napięć fazowych na tle odpowiednich SEM fazowych oraz przebiegów prądów dla obciążenia silnika momentem 15,8 Nm

Wartości poszczególnych składników przetwarzanej mocy, obliczone na podstawie dokonanych rejestracji, przedstawiono w Tabeli 1. Uwzględnione składniki bilansu mocy przedstawiono graficznie.

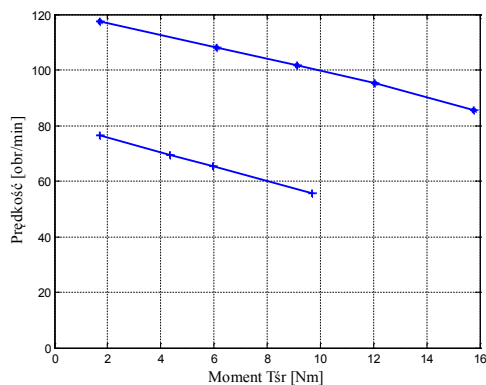


Wartości skuteczne oraz wartość mocy czynnej obliczono zgodnie z definicją, zastępując całkowanie sumowaniem.

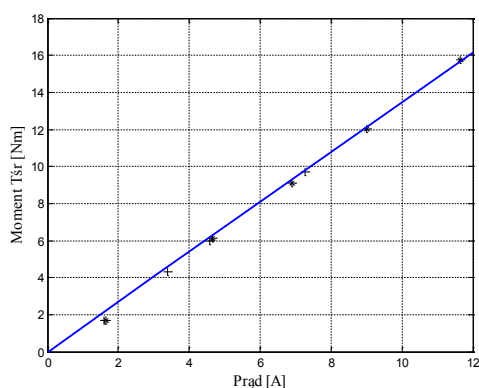
Na Rysunku 11 przedstawiono charakterystyki mechaniczne silnika, na Rysunku 12 – zależność wartości średniej momentu od skutecznej wartości prądu. Obie wykresy wykonano na podstawie danych przedstawionych w Tabeli 1.

Table 1.

nr pomiaru	1	2	3	4	5
wartość skuteczna napięcia fazowego silnika [V]	6,23	6,14	6,1	6,06	5,97
wartość skuteczna prądu fazowego silnika [A]	1,65	4,66	6,89	9,01	11,6
moc pobierana przez silnik P_{wes} [W]	22,2	78,5	115	152	192
straty w uzwojeniach silnika P_{dcus} [W]	0,287	2,36	5,15	9,18	14,7
wartość średnia momentu T_{sr} [Nm]	1,71	6,11	9,11	12,0	15,8
wahania chwilowych wartości momentu $T_{max}/T_{sr}, T_{min}/T_{sr}$	0,71, 0,7	0,21, 0,5	0,16, 0,45	0,14, 0,33	0,12, 0,33
prędkość zespołu [obr/min]	117	108	102	95,1	85,6
moc „elektryczna” silnika $P_{es} = \omega T_{sr}$ [W]	21,0	69,1	97	120	141
straty w rdzeniu silnika $P_{dfes} = P_{wes} - P_{dcus} - P_{es}$ [W]	0,86	7,05	13,1	22,9	35,9
straty mechaniczne silnika $P_{dmech} = \omega T_{dmech}$	10,5	9,61	9,05	8,47	7,6
sprawność silnika $(P_{es} - P_{dmech})/P_{wes}$	0,5	0,76	0,76	0,73	0,7



Rysunek 11. Charakterystyki mechaniczne silnika dla dwóch nastaw regulatora prędkości



Rysunek 12. Zależność wartości średniej momentu od skutecznej wartości prądu

Wykorzystując rejestracje SEM i prądów określono wahania momentu rozwijanego przez silnik. Wyniki przedstawiono w Tabeli 1. Częstotliwość pulsacji momentu $f_{puls} = p_b n/10$, gdzie n [obr/min]. Przy obrocie koła roweru 1/sek moment powoduje wibracje obwodowe 168Hz, przy czym wahania momentu maleją ze wzrostem obciążenia.

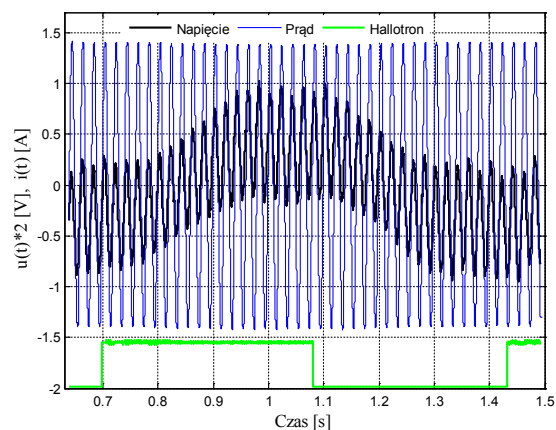
4. Pomiar indukcyjności uzwojeń silnika

Uzwojenia twornika nawinięte są na zębach stojana, nad którymi przy obrocie wirnika przemieszczają się sztabkowe magnesy trwałe, przylepione do cylindrycznego jarzma. Obecność magnesów o przenikalności magnetycznej zbliżonej do przenikalności powietrza, nie powinna wpływać na zmiany permeancji uzwojeń twornika przy ruchu wirnika, jeśli pominąć wpływ napięć magnetycznych w żelazie rdzeni. Dlatego procedurę wyznaczenia pomiarowego indukcyjności własnej i wzajemnych uzwojenia twornika rozpoczęto od wykorzystania tzw. metody technicznej przy zatrzymanym wirniku, zasilając wybrane uzwojenie napięciem przemiennym 50Hz. Pomiaru wykonywano przy prądzie około 6A i napięciu zasilającym około 1V. Rezystancja uzwojenia pomierzona prądem stałym wynosi 0,11Ω. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2.

Impedancja zastępcza [Ω]	Rezystancja zastępcza [Ω]	Indukcyjność zastępcza [mH]	Indukcyjność wzajemna [mH]
0,155	0,144	0,176	0,13

Wibracje silnika towarzyszące zasilaniu uzwojenia napięciem przemiennym utrudniają sprawdzenie czy i w jakim stopniu indukcyjności zależą od położenia wirnika. Dlatego dokonano rejestracji przebiegów prądu i napięć przy zasilaniu wybranego uzwojenia twornika napięciem przemiennym 50Hz i napędzaniu wirnika z niewielką prędkością. Fragment rejestracji przedstawiono na Rysunku 13.



Rysunek 13. Przebiegi napięcia i prądu zasilanego uzwojenia wybranej fazy oraz sygnału z hallotronu przy wolnym obracaniu wirnika

Jak wynika z przedstawionych przebiegów, SEM indukowana w uzwojeniu twornika przy ruchu wirnika utrudnia obserwację i pomiar, przez „falowanie” przebiegu napięcia. Mimo to dwukrotne zmniejszanie napięcia w jednym okresie SEM jest zauważalne. Świadczy to o zmianach przewodności magnetycznej zębów twornika pod wpływem pola magnetycznego wzbudzonego magnesami trwałymi. Największa SEM rotacji występuje, gdy strumień pochodzący od magnesów, sprzężony z uzwojeniem jest najmniejszy. W tych warunkach przewodność magnetyczna zęba jest największa i indukcyjność największa, bez względu na kierunek tego strumienia. Okres zmian indukcyjności jest więc dwukrotnie większy niż okres zmian pola. Amplituda pierwszej harmonicznej przebiegu napięcia waha się w przedziale od 0,22 do 0,26V, amplituda pierwszej harmonicznej przebiegu prądu praktycznie się nie zmienia i wynosi 1,42A. Zakładając rezystancję zastępczą 0,14Ω indukcyjność własna uzwojenia zmienia się od 0,21 do 0,37mH, czyli ponad 27% w stosunku do wartości średniej, to jest 0,29mH. Uzyskany wynik jest prawie dwukrotnie większy od wartości pomiarzonej przy nieruchomym wirniku, ale silnik był wtedy zasilany

6-krotnie większym prądem, który mógł już powodować nasycenie dróg strumienia rozproszenia.

Zarejestrowane przebiegi SEM faz niezasilanych są jakościowo podobne do przebiegu napięcia. Wynika z nich, że indukcyjność wzajemna również zależy od położenia wirnika i zmienia się w przedziale od 0,055 do 0,16 mH. Wartość średnia 0,11 mH jest więc podobna do uzyskanej z pomiarów statycznych. Natomiast wpływ położenia na indukcyjność wzajemną jest bez porównania większy niż na indukcyjność własną.

Reasumując, pomiarowe określenie indukcyjności twornika jest trudnym problemem, ponieważ są one zależne od położenia wirnika oraz wartości prądu płynącego w uzwojeniach. Do uproszczonego modelu matematycznego, w którym zakłada się stałość indukcyjności, można przyjąć indukcyjność własną z przedziału 0,17 do 0,29 mH, w zależności od rozważanego poziomu prądów, natomiast indukcyjność wzajemną od 0,11 do 0,13 mH.

Podsumowanie

Zasadniczym rezultatem pomiarów i wykonanych obliczeń jest:

- wyznaczenie charakterystyk mechanicznych i prądowych silnika,
- wyznaczenie momentu maksymalnego rozwijanego przez silnik,
- ocena wytwarzanego momentu zmiennego,
- wyznaczenie sprawności,
- wykorzystanie specjalnej cewki pomiarowej do ustalenia liczby zwojów uzwojeń, której nie ujawnia producent,
- wyznaczenie parametrów modelu matematycznego (SEM, indukcyjności, rezystancje).

Przedstawione wyniki w znacznym stopniu tłumaczą ograniczony zakres stosowalności tego typu maszyn, z uwagi na ich sprawność oraz składową zmienną momentu, a także moc z jednostki objętości. Przygotowane stanowisko pomiarowe może być wykorzystane do ćwiczeń w laboratorium mikromaszyn PWSZ w Tarnowie, natomiast parametry – do symulacji stanów dynamicznych silnika.

Literatura

1. Kołacz T, Skwarczyński J, Bezszytkowe maszyny prądu stałego z magnesami trwałymi (PMBLDC) ogólnego zastosowania – część I, specyfika konstrukcji, metody analizy, Science, Technology and Innovation, 2018; 2(1):42–46.
2. Hanselman D, Brushless Permanent Magnet Motor Design. Magna Physics Publishing 2006.
3. Madura K, Zabawa D, Mikrosilniki elektryczne PMBLDC ogólnego zastosowania, praca dyplomowa, opiekun J. Skwarczyński, PWSZ w Tarnowie, 2018.
4. Libert F, Soulard J, Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings,
5. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.508.1648&rep=rep1&type=pdf>
6. Heller B, Hamata V, Harmonic field effects in induction machines, Elsevier Science Ltd; First Edition 1977.
7. Skwarczyński J, Tertel Z, Elektromechaniczne przetwarzanie energii, Uczelniane Wyd. Nauk.-Dyd. AGH, Kraków 2000.
8. FEMM: <http://www.femm.info>

Abstract

The paper presents research on properties of the low power PMBLDC motor, designed to drive a bicycle. In the first part of the study the conditions of the torque generation were analyzed. The purpose of the article is to provide new information about PMBLDC motors and their properties. In the first part of the article the motor construction and torque generation in it were studied. Also the methodology of analysis were presented.

The second part of the article will treat on the measurements and calculations of EMF, currents, voltages, and electromagnetic torque.

Keywords: PMBLDC general purpose motors, the specificity of construction, conditions of torque generation, electromagnetic torque measurement
