

*maszyny elektryczne, magnesy trwałe,
silniki bezszczotkowe prądu stałego*

Marek CIURYS*, Ignacy DUDZIKOWSKI*

SILNIK BEZSZCZOTKOWY O WIRNIKU KUBKOWYM

Opracowano silnik bezszczotkowy prądu stałego (BLDC) o wirniku kubkowym wzbudzany magnesami neodymowymi, do wnętrza którego może być wbudowana maszyna robocza. Przeprowadzono analizę wpływu wymiarów obwodu magnetycznego wirnika na wartość strumienia oraz na wartość momentu zaczepowego. Opracowano połowo-obwodowy model obliczeniowy silnika wraz z przekształtnikiem zasilającym. Wyznaczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: źródło zasilania–przekształtnik–silnik, w stanach dynamicznych i ustalonych.

1. WPROWADZENIE

Rozwój energoelektroniki, materiałów magnetycznie twardych (w szczególności magnesów neodymowych [1]) oraz tendencja do stosowania energooszczędnych układów napędowych powoduje coraz szersze zastosowanie silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi (BLDC). Maszyny te nazywane również silnikami z komutacją elektroniczną wykazują wiele zalet w porównaniu z innymi silnikami elektrycznymi. Charakteryzuje je przede wszystkim [2, 3] duża sprawność oraz duża wartość momentu i mocy przypadająca na jednostkę masy oraz duża przeciążalność momentem, co wpływa na dobre właściwości dynamiczne tych silników. Przeciążalność tych maszyn zależy głównie od dopuszczalnego prądu tranzystorów przekształtnika zasilającego silnik oraz od odporności magnesów na odmagnesowanie. Zaletą silników o wirniku wewnętrznym jest również mały moment bezwładności.

Strumień magnetyczny w wirniku silnika BLDC zamyka się głównie w przestrzeni przy jego powierzchni, w wyniku tego przestrzeń wewnętrzna nie jest wykorzystana magnetycznie. Wykonanie wirnika w formie kubkowej umożliwi wykorzystanie tej przestrzeni poprzez wbudowanie do jego wnętrza maszyny roboczej. Dotychczas wirniki kubkowe stosowane są przede wszystkim w silnikach przeznaczonych do zastosowań

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: marek.ciurys@pwr.wroc.pl, ignacy.dudzikowski@pwr.wroc.pl

w automatyce, gdzie istotna jest mała wartość momentu bezwładności. W przypadku maszyn o magnesach trwałych takie rozwiązanie konstrukcyjne wirnika jest rzadko stosowane i występuje w maszynach z podwójnym stojanem przeznaczonych do pracy jako starter-generator [4] lub w elektrowniach wiatrowych [5].

Celem pracy było opracowanie silnika bezszczotkowego (BLDC) prądu stałego o wirniku kubkowym przeznaczonego do napędu urządzenia, które jest zamontowane w jego wnętrzu oraz wyznaczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w stanach dynamicznych i ustalonych. Zakres pracy obejmuje:

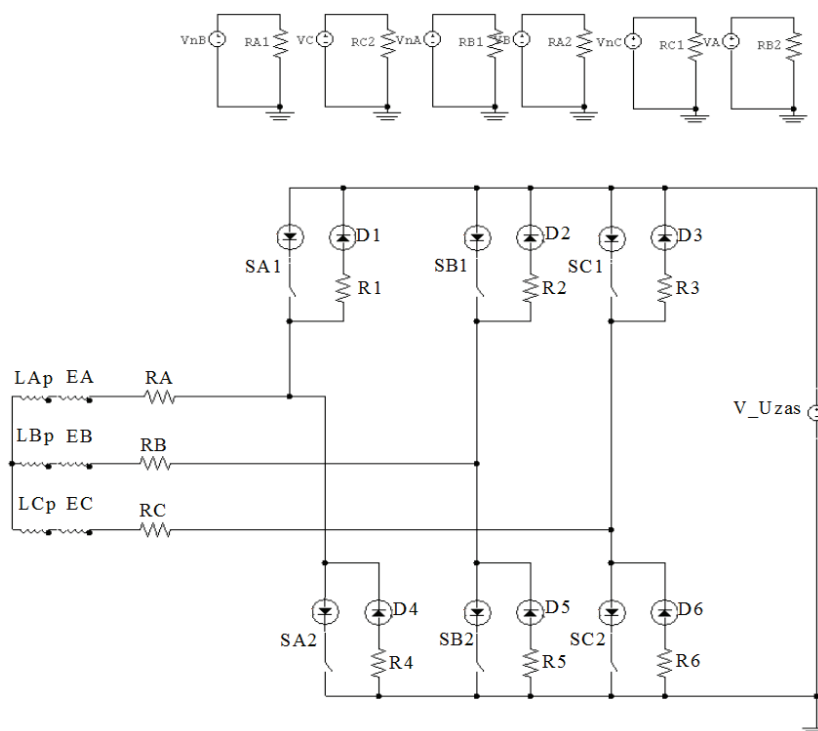
- opracowanie modelu połowo-obwodowego silnika wraz z przekształtnikiem zasilającym,
- analizę wpływu kąta i wysokości magnesów oraz grubości jarzma wirnika na wartość strumienia magnetycznego oraz na wartość momentu zaczepowego,
- wyznaczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych silnika.

2. MODEL POŁOWO-OBWODOWY UKŁADU PRZEKSZTAŁTNIK ZASILAJĄCY-SILNIK

Analizę przeprowadzono na przykładzie zaprojektowanego silnika o danych: napięcie znamionowe $U_N = 220$ V, moc znamionowa $P_N = 2$ kW, prąd znamionowy $I_N = 10$ A, prędkość znamionowa $n_N = 2650$ obr./min., liczba par biegunów $p = 2$, moment bezwładności $J = 0,0016$ kg·m². Średnica zewnętrzna wirnika wynosiła 74 mm, a średnica zewnętrzna stojana 125 mm. Parametry te dotyczą finalnie dobranych wymiarów obwodu magnetycznego silnika przedstawionych w rozdziale 4.

Zastosowano magnesy neodymowe o koercji $B_{H_c} = 844$ kA/m i remanencji $B_r = 1,17$ T. Stojan silnika wykonano z blachy o wykroju od typowego silnika indukcyjnego. W programie Maxwell opracowano model połowy oraz połowo-obwodowy silnika wraz z przekształtnikiem zasilającym. Przekrój poprzeczny silnika wraz z rozplywem strumienia magnetycznego przedstawiono na rysunku 2. W części obwodowej (rys. 1) modelu połowo-obwodowego uwzględniono źródło zasilania, przekształtnik oraz silnik BLDC. Schemat elektryczny części obwodowej silnika wraz z przekształtnikiem zasilającym przedstawiono na rysunku 1, na którym poszczególne symbole oznaczają: RA, RB, RC – rezystancję pasm uzwojenia silnika, EA, EB, EC – wartości chwilowe sumarycznych sił elektromotorycznych indukowanych w pasmach uzwojenia silnika będące wynikiem rotacji, samoindukcji i indukcyjności wzajemnych, LAp, LBp, LCp – indukcyjność połączeń czołowych pasm uzwojenia silnika; $SA1, SB1, SC1, SA2, SB2, SC2$ – klucze tranzystorowe przekształtnika, $D1...D6$ – diody zwrotne (model idealnego złącza p-n) przekształtnika, $R1...R6$ – rezystancje wewnętrzne diod zwrotnych przekształtnika, V_Uzas – napięcie zasilania. Obwody z elementami VA, VB, VC ,

$VnA, VnB, VnC, RA1, RA2, RB1, RB2, RC1, RC2$ służą do sterowania pracą kluczy tranzystorowych przekształtnika w funkcji kąta obrotu wirnika.



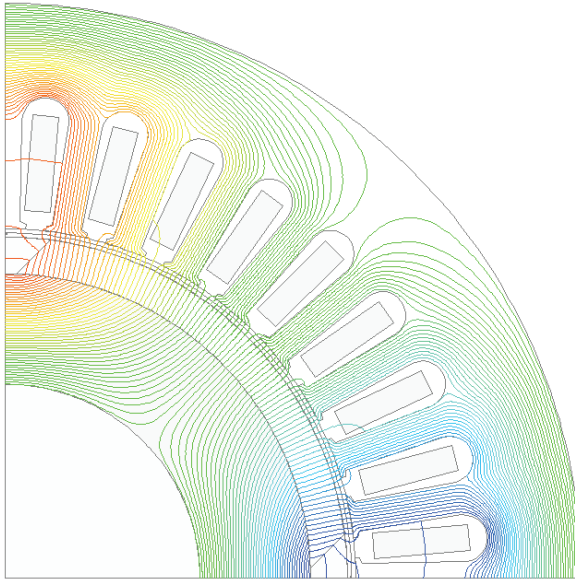
Rys. 1. Część obwodowa modelu polowo-obwodowego silnika wraz z przekształtnikiem

3. ANALIZA WPLYWU WYMIARÓW OBWODU MAGNETYCZNEGO NA STRUMIEŃ MAGNETYCZNY ORAZ NA MOMENT ZACZEPOWY

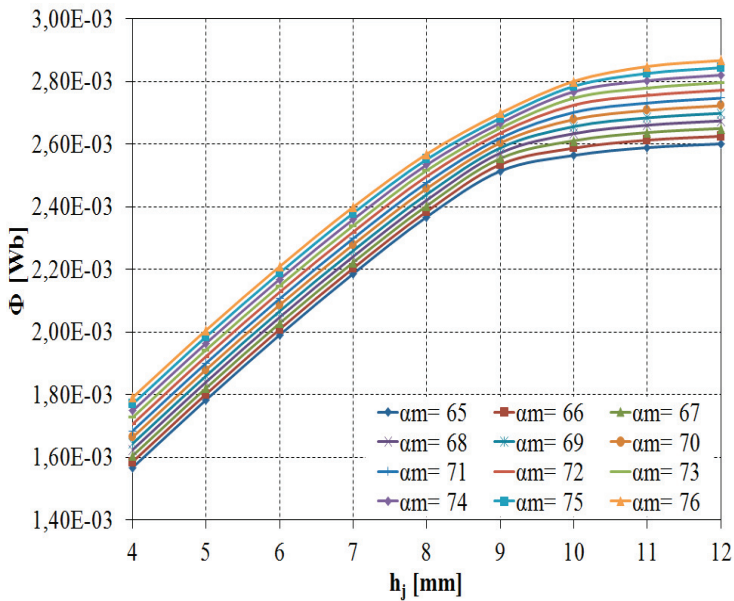
W celu doboru wymiarów obwodu magnetycznego zapewniających jak największą wartość strumienia magnetycznego i możliwie małe pulsacje momentu zaczepowego wykonano polowe obliczenia wariantowe w zakresie:

- kąta magnesów $\alpha_m = 65\text{--}76^\circ$,
- wysokości magnesów $h_m = 3\text{--}4,5$ mm,
- grubości jarzma wirnika $h_j = 4\text{--}12$ mm.

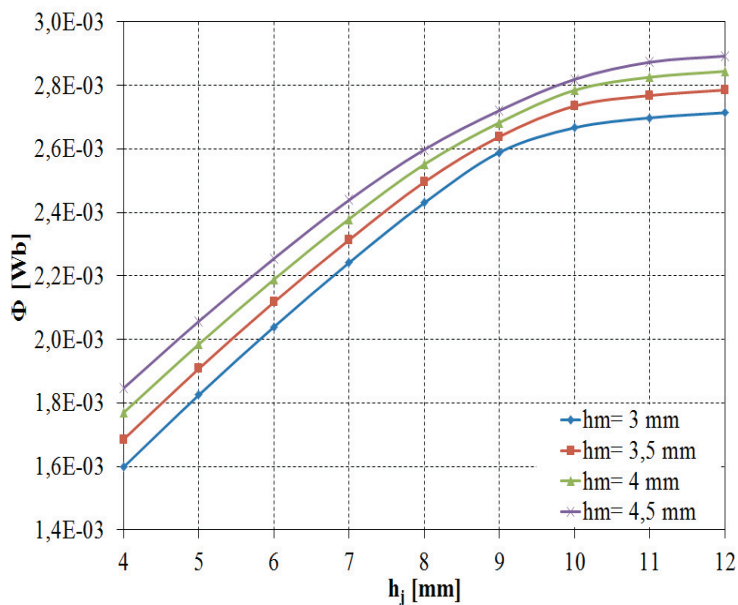
Ważniejsze wyniki analizy obliczeniowej dla temperatury $t = 20$ °C przedstawiono na rysunkach 2–5. Wartość strumienia magnetycznego (rys. 3, 4) wyznaczono za pomocą wirtualnej cewki pomiarowej o rozpiętości jednej podziałki biegunowej umieszczonej w szczelinie powietrznej maszyny.



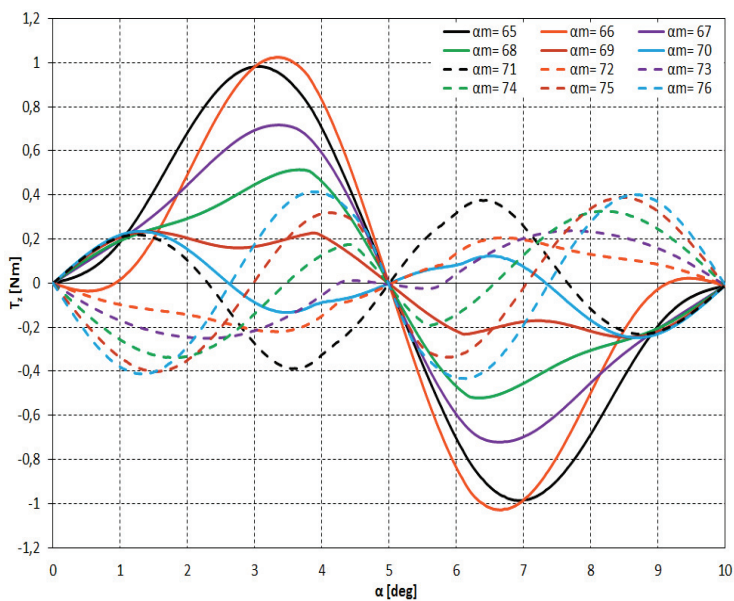
Rys. 2. Rozpływ strumienia magnetycznego w silniku;
 $\alpha_m = 75^\circ$, $h_m = 4$ mm, $h_j = 12$ mm



Rys. 3. Zależność wartości strumienia magnetycznego od grubości jarzma wirnika przy różnej wartości kąta magnesów; $h_m = 4$ mm



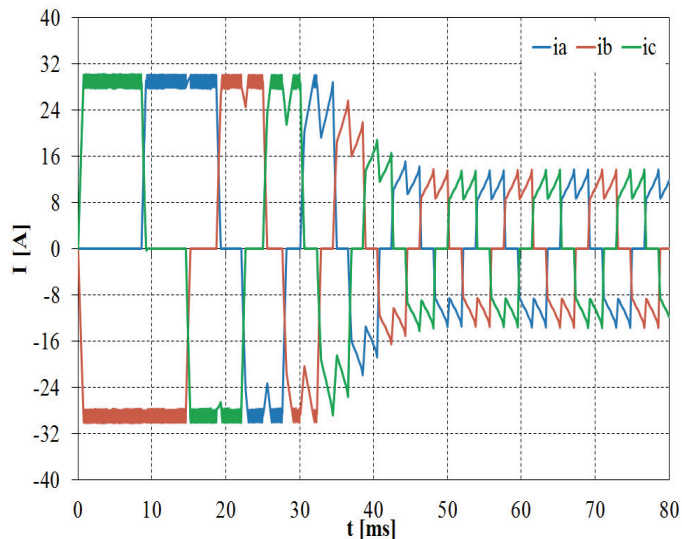
Rys. 4. Zależność wartości strumienia magnetycznego od grubości jarzma wirnika przy różnej wysokości magnesów; $\alpha_m = 75^\circ$



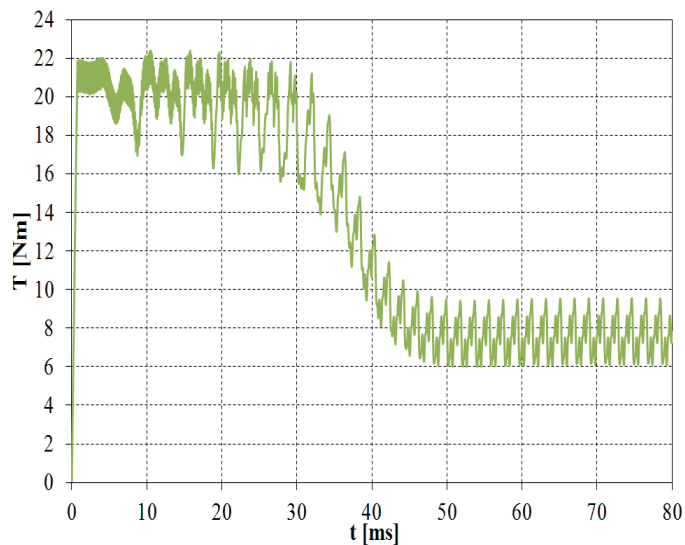
Rys. 5. Zależność momentu zaczepowego od kąta obrotu wirnika przy różnej wartości kąta magnesów; $h_m = 4$ mm; $h_j = 12$ mm

4. PRZEBIEGI CZASOWE WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH I MECHANICZNYCH SILNIKA

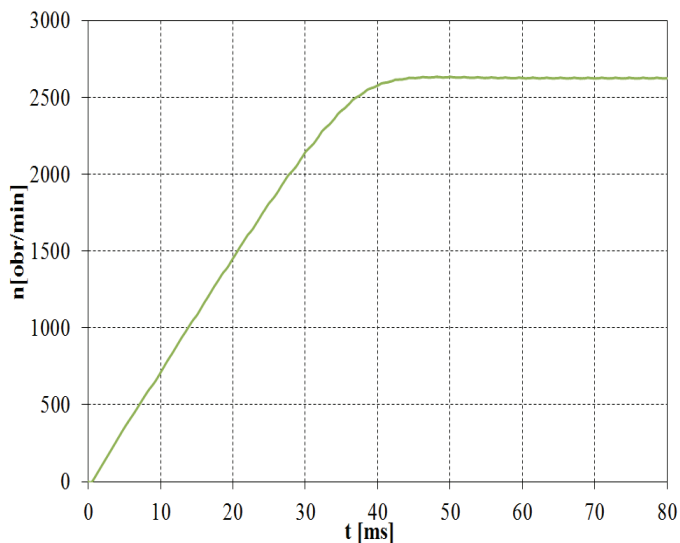
Korzystając z wyników wariantowych obliczeń polowych dobrano takie wymiary obwodu magnetycznego wirnika ($h_j = 12$ mm, $\alpha_m = 75^\circ$, $h_m = 4$ mm) aby zapewnić



Rys. 6. Przebiegi czasowe prądów pasmowych w silniku podczas rozruchu



Rys. 7. Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego silnika podczas rozruchu



Rys. 8. Prędkość obrotowa silnika podczas rozruchu

możliwie dużą wartość strumienia magnetycznego i odporność magnesów na odmagnesowanie. Dla tak wybranego finalnego rozwiązania konstrukcyjnego obliczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych silnika obciążonego różną wartością momentu. Obliczenia wykonano w układzie z ograniczeniem ustawionym na 3-krotną wartość prądu znamionowego. Przykładowe wyniki obliczeń przy obciążeniu silnika momentem znamionowym przedstawiono na rysunkach 6–8.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzono analizę obliczeniową wpływu wymiarów obwodu magnetycznego na wartość strumienia magnetycznego oraz momentu zaczepowego silnika bezszczotkowego o wirniku kubkowym. Przeprowadzona analiza wykazała, że przy doborze grubości jarzma wirnika należy kierować się przede wszystkim wartością strumienia magnetycznego (rys. 3, 4). Wartość strumienia magnetycznego jest praktycznie proporcjonalna do kąta magnesów niezależnie od grubości jarzma. Wysokość magnesów musi zapewnić odporność na odmagnesowanie w stanach przeciążeń prądowych. Ma również wpływ na wartość strumienia magnetycznego (rys. 4). Wpływ ten zależy od grubości jarzma wirnika, czyli stopnia jego nasycenia. Wysokość magnesów $h_m = 4$ mm dobrano ze względu na zapewnienie możliwie dużej odporności magnesów na odmagnesowanie. Wartość maksymalna momentu zaczepowego przy zastosowanej grubości jarzma wirnika ($h_j = 12$ mm) oraz wysokości magnesów ($h_m = 4$ mm) ma najmniejszą wartość przy kącie magnesów $\alpha_m = 72^\circ$ (rys. 5). Wykonane

obliczenia połowo-obwodowe wykazały, że pulsacje momentu elektromagnetycznego przy kącie $\alpha_m = 72^\circ$ i $\alpha_m = 75^\circ$ są praktycznie takie same (wynoszą $0,45T_N$ przy obciążeniu momentem znamionowym). W celu uzyskania możliwie dużej wartości strumienia magnetycznego, zastosowano kąt magnesów $\alpha_m = 75^\circ$.

Wykonana analiza połowo-obwodowa finalnej konstrukcji silnika wykazała, że wartość maksymalna prądu pobieranego przez silnik w trakcie rozruchu jest prawie 15 razy większa od wartości maksymalnej w stanie ustalonym a moment maksymalny jest 11,5 razy większy od momentu znamionowego. Tak duże wartości prądu rozruchowego nie są wskazane ze względu na pracę elementów półprzewodnikowych przekształtnika. Dlatego w układach napędowych z silnikami BLDC stosowane jest ograniczenie prądowe. Przy obliczaniu czasu rozruchu uwzględniono moment obciążenia silnika, moment tarcia oraz moment bezwładności. W przypadku zastosowania ograniczenia prądowego ustawionego na 3-krotną wartość prądu znamionowego proces rozruchu silnika obciążonego momentem znamionowym jest czterokrotnie dłuższy, a moment maksymalny zostaje ograniczony do wartości $2,8T_N$. Czas rozruchu wynoszący 40 ms oraz przeciążalność momentem $K_m = 2,8$ spełniają wymagania praktyki przemysłowej.

LITERATURA

- [1] LEONOWICZ M., WYSŁOCKI J., *Współczesne magnesy – technologie, mechanizmy koercji, zastosowania*, WNT, Warszawa 2005.
- [2] DUDZIKOWSKI I., CIURYS M., *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- [3] GIERAS J.F., *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, CRC Press, 2010.
- [4] SHUANGXIA NIU, K.T. CHAU, J.Z. JIANG, *Analysis of eddy-current loss in a double-stator cup-rotor PM machine*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, November 2008, 4401–4404.
- [5] SHUANGXIA NIU, K.T. CHAU, J.Z. JIANG, CHUNHUA LIU, *Design and Control of a New Double-Stator Cup-Rotor Permanent-Magnet Machine for Wind Power Generation*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 6, June 2007, 2501–2503.

BRUSHLESS DC MOTOR WITH A CUP-ROTOR

A brushless DC motor with a cup-rotor, in which a driven machine can be built, was designed. An analysis of the impact of the rotor magnetic circuit dimensions on the magnetic flux and cogging torque values was carried out. A field-circuit model of the motor was developed. Transients of the electrical and mechanical quantities of the motor were computed.