

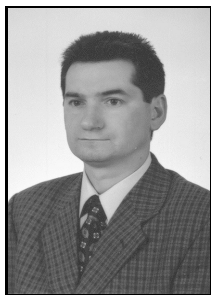
Mariusz KORKOSZ

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI,
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

Wpływ materiału magnetycznego na parametry wysokoobrotowych maszyn elektrycznych z komutacją elektroniczną

Dr inż. Mariusz KORKOSZ

Autor jest pracownikiem naukowym Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z maszynami elektrycznymi z komutacją elektroniczną (BLDCM, SRM, maszyny o strumieniu osiowym) takimi jak obliczenia numeryczne 2D/3D czy też badaniami laboratoryjnymi.



e-mail: mkosz@prz.edu.pl

Streszczenie

W pracy zawarto wyniki badań wpływu parametrów blachy magnetycznej na właściwości wysokoobrotowego silnika elektrycznego z komutacją elektroniczną. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono charakterystyki mechaniczne badanego silnika oraz jego sprawności przy różnych wartościach napięć zasilających wynikających z założeń projektowych oraz rodzaju zastosowanej blachy magnetycznej. Dokonano porównania wpływu zastosowanego materiału magnetycznego oraz sposobu jego ułożenia na kluczowe parametry silnika takie jak amplituda momentu zaczepowego oraz sprawność wypadkowa silnika. Zamieszczono wnioski dotyczące możliwości ograniczania strat w żelazie silnika.

Słowa kluczowe: silniki wysokoobrotowe, BLDCM, materiał magnetyczny, straty w żelazie.

Influence of magnetic material on parameters of high-speed electric machines with electronic commutation

Abstract

In the paper there are presented the results of studies on the influence of magnetic sheet parameters on properties of a high-speed electric machine with electronic commutation. The magnetization curves of typical isotropic sheets and an anisotropic sheet are shown in Fig. 1. The total losses of the sheets from Fig. 1 are presented in Fig. 2. To build a prototype I of the BLDCM motor there was used isotropic sheet of thickness 0,35 mm and to build prototypes II and III there was used anisotropic sheet of thickness 0,23 mm. The constructed prototypes are shown in Fig. 3. A cogging torque was determined for the made prototypes in laboratory conditions (Fig. 4). Mechanical and efficiency characteristics of the examined motor were determined in laboratory conditions at different values of the supply voltage resulting from the design assumption and type of magnetic sheet. Minimum supply voltages were assumed to obtain projected working point (Fig. 9). Comparison of the influence of the magnetic material and the way of its orientation on the key parameters of the motor such as the cogging torque amplitude and the resultant efficiency of the motor was performed. Conclusions concerning possibility of limiting the losses in motor iron are given.

Keywords: high speed motor, BLDCM, magnetic material, core losses.

1. Wstęp

Maszyny elektryczne z komutacją elektroniczną są coraz częściej i chętniej stosowane w układach napędowych o regulowanej prędkości obrotowej. W wielu potencjalnych zastosowaniach od silnika elektrycznego wymagana jest bardzo wysoka sprawność przetwarzania energii elektrycznej. Zaliczyć do nich możemy napędy elektryczne, hybrydowe. Docelowo silniki o podwyższonej sprawności znajdują zastosowanie w sprzęcie AGD wypierając dotychczas stosowane silniki komutatorowe. Obecnie najintensywniej rozwijają się napędy hybrydowe obiektów mobilnych (poruszających się po ziemi czy też w powietrzu). Nowoczesny

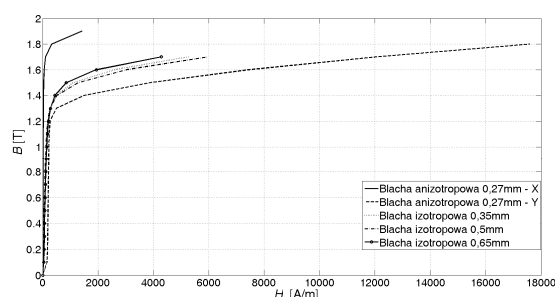
napęd hybrydowy jest próbą połączenia zalet napędu z silnikiem spalinowym (duża wartość energetyczna paliwa) oraz napędu z silnikiem elektrycznym (wysoka sprawność przetwarzania energii). Z uwagi na specyfikę aplikacji od silnika elektrycznego wymaga się możliwie jak najwyższej sprawności przetwarzania energii elektrycznej [1-3]. Zastosowanie maszyn elektrycznej o wysokiej sprawności przetwarzania energii elektrycznej pozwala ograniczyć masę wypadkową napędu hybrydowego [2, 4]. W przypadku napędów bezzałogowych aparatów latających ((BAL) gdzie masa wypadkowa jest parametrem krytycznym, przy jednocześnie prostym algorytmie sterowania możliwe jest zastosowanie maszyn prądu stałego z komutacją elektroniczną (BLDCM). W przeciwieństwie do maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM) możliwa jest względnie prosta implementacja algorytmu sterowania z uwzględnieniem bezczujnikowej detekcji położenia wirnika.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań laboratoryjnych zaprojektowanego przez autora wysokoobrotowego bezszczotkowego silnika prądu stałego (BLDCM) przeznaczonego do lotniczego napędu hybrydowego. Przeprowadzone badania laboratoryjne ukierunkowane były na pokazanie wpływu rodzaju zastosowanej blachy magnetycznej na parametry eksploatacyjne prototypowego silnika BLDC. Próbę zastosowania blachy anizotropowej w silniku reluktancyjnym przełączalnym przedstawiono w [5, 6].

2. Parametry materiału magnetycznego

W silnikach elektrycznych do budowy obwodu magnetycznego stosowana najczęściej stosuje się blachę magnetyczną prądnicową. Jest to blacha magnetyczna izotropowa która wykazuje identyczne właściwości magnetyczne w każdym kierunku czyli osi X i osi Y. Na rynku dostępne są blachy magnetyczne prądnicowe o grubości 0,35 mm, 0,5 mm oraz 0,65 mm. Dla każdej grubości blachy magnetycznej prądnicowej określony jest znormalizowany typoszerzeg różniący się właściwościami magnetycznymi, np. stratnością. Podobna sytuacja występuje w przypadku blach magnetycznych transformatorowych. Jednak blachy magnetyczne transformatorowe są znacznie cieńsze od blach magnetycznych prądnicowych. Dodatkowo są to blachy magnetyczne anizotropowe. Oznacza to, że występują dwa kierunki magnetyczne. Jeden jest kierunkiem preferowanym (umownie nazwanym X), natomiast drugi (umownie nazwanym Y) charakteryzuje się zdecydowanie gorszymi właściwościami magnetycznymi.

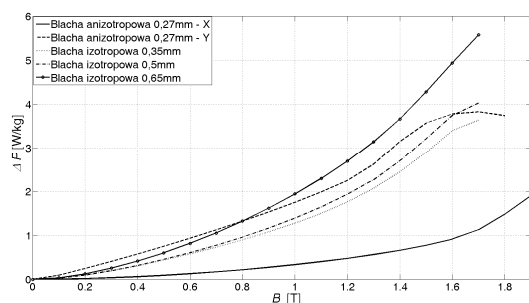
Na rysunku 1 pokazano zależność indukcji magnetycznej B w funkcji natężenia pola H przykładowych blach magnetycznych prądnicowej o grubości 0,35 mm; 0,5 mm; 0,65 mm oraz transformatorowej o grubości 0,27 mm.



Rys. 1. Przykładowe zależności indukcji magnetycznej B w funkcji natężenia pola H dla blachy prądnicowej oraz transformatorowej

Fig. 1. Exemplary dependencies of magnetic induction B on the field strength H for isotropic and anisotropic sheet

Przykładowe stratności ΔP w funkcji indukcji magnetycznej B pokazano na rysunku 2. Zarówno charakterystyki magnesowania (rys. 1) jak i stratność (rys. 2) zostały wyznaczone przy częstotliwości 50 Hz.



Rys. 2. Przykładowe stratności P blachy prądnicowej oraz transformatorowej
Fig. 2. Exemplary total loss P of isotropic and anisotropic sheet

Blachy prądnicowe posiadają znacznie gorszą charakterystykę magnesowania w odniesieniu do dominującego kierunku (X) blachy transformatorowej. Charakterystyka magnesowania blachy transformatorowej w umownej osi Y (najgorsze właściwości magnetyczne) jest mniej korzystna od charakterystyk magnesowania blach prądnicowych. W przypadku stratności różnice są jeszcze bardziej zauważalne. Blachy prądnicowe o grubości 0,35 mm oraz 0,5 mm posiadają jedynie nieznacznie mniejszą stratność w odniesieniu do blachy transformatorowej w umownym kierunku Y. Natomiast stratność blachy prądnicowej o grubości 0,65 mm jest znacznie większa szczególnie przy wzroście indukcji B .

W przypadku wysokoobrotowych maszyn z komutacją elektroniczną częstotliwości przełączeń uzwojeń mogą dochodzić do kilkuset herców. Z tego też powodu należy w miarę możliwości stosować materiał magnetyczny o możliwie niskiej stratności. W przypadku blach prądnicowych w przypadku napędów wysokoobrotowych należy rozważać stosowanie blachy o grubości 0,35 mm. Z uwagi na mniejszą stratność blach transformatorowych można się zastanowić, czy ich zastosowanie nie ograniczy strat w rdzeniu. Ograniczenie strat w żelazie powinno zwiększyć sprawność wypadkową maszyny. Jest to dość istotne w napędach gdzie zarówno sprawność jak i masa wypadkowa układu napędowego są parametrami krytycznymi. Przykładem takowego zastosowania jest hybrydowy napęd bezałogowego aparatu latającego.

3. Wysokoobrotowy silnik prądu stałego z komutacją elektroniczną

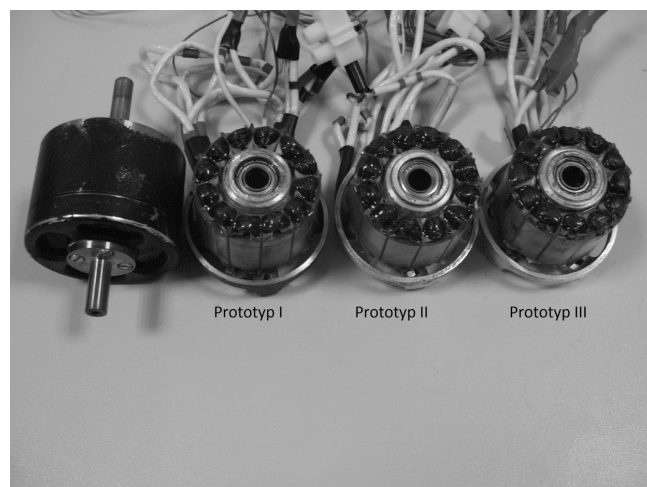
Jedną z aplikacji która stawia bardzo wysokie wymagania co do sprawności wypadkowej oraz masy silnika są napędy hybrydowe powietrznych obiektów mobilnych. Wysoka sprawność pozwala minimalizować masę projektowanego silnika. Postawione wymagania elektryczne silnikowi przewidzianemu do zastosowania w napędzie hybrydowym bezałogowego aparatu latającego były wysokie. Silnik miał wytwarzać moc na wale równą 800W przy prędkości 8000 obr/min oraz sprawności wypadkowej nie mniejszej niż 85%. Całość napędu elektrycznego nie mogła przekraczać masy 1,8 kg (silnik, sterownik, akumulatory, przewody, przekładnia). Akumulatory dobierano tak, aby po osiągnięciu przez bezałogowy aparat latający pułapu przelotowego stopień rozładowania akumulatorów nie był większy niż 60%. Wybrane parametry możliwych do zastosowania akumulatorów zamieszczono w [7]. Przewidziano zastosowanie akumulatorów litowo-polimerowych. Wstępne kalkulacje narzuciły masę projektowanego silnika. Nie mogła ona przekraczać 0,6 kg. Biorąc pod uwagę w/w wymagania oraz możliwe proste sterowanie z bezczujnikową detekcją położenia wirnika zdecydowano się zastosować w układzie napędowym bezszerokowy silnik prądu stałego z komutacją elektroniczną (BLDCM).

Na etapie projektowania, dla ograniczenia strat mocy w obwodzie stojana, przewidziano zastosowanie dwóch rodzajów blachy magnetycznej tj.:

- Blachę izotropową (prądnicową) o grubości 0,35 mm – prototyp I.
- Blachę anizotropową (transformatorową) o grubości 0,23 mm – prototyp II, prototyp III.

Ze względów wykonawczych (tarcze łożyskowe) we wszystkich przypadkach zastosowano identyczną długość pakietu żelaza. Nie uległy również zmianie dane nawojowe wszystkich stojanów. Na rysunku 3 pokazano widok wykonanych stojanów z blachy prądnicowej i transformatorowej.

Bazową konstrukcją jest silnik w którym zastosowano stojan z blachy magnetycznej prądnicowej 0,35 mm oznaczony jako Prototyp I. Silnik w którym zastosowano stojan wykonany z blachy magnetycznej transformatorowej 0,23 mm bez przekładania oznaczono jako Prototyp II. W przypadku Prototypu III zastosowano blachy magnetyczne transformatorowe z przekładaniem.

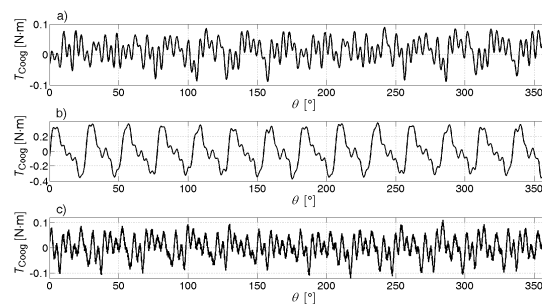


Rys. 3. Widok badanych prototypów
Fig. 3. View of tested prototypes

Dla uniknięcia wpływu zmiany parametrów zastosowanych magnesów trwałych w warunkach laboratoryjnych badania przeprowadzono z tym samym wirnikiem.

4. Wyznaczanie momentu zaczepowego

Moment zaczepowy jest w przypadku analizowanego napędu zjawiskiem pasożytniczym które powinno być ograniczane na etapie projektowym. Rozpiętość kątową zastosowanych magnesów neodymowych została tak dobrana, aby ograniczyć wartość maksymalną momentu zaczepowego. Wyniki badań symulacyjnych prezentowano w [8]. Na rysunku 4 pokazano zależność momentu zaczepowego T_{coog} badanych prototypów od położenia wirnika θ .

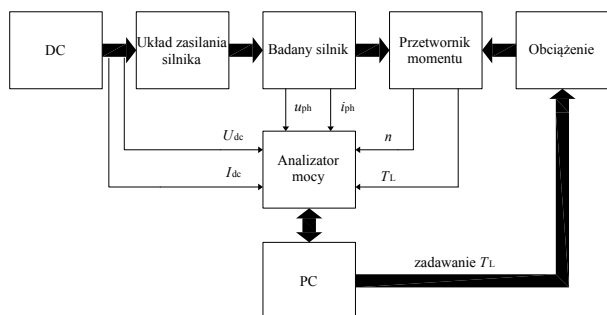


Rys. 4. Zależność momentu zaczepowego od położenia wirnika dla a) prototypu I, b) prototypu II, c) prototypu III
Fig. 4. Cogging torque as a function of the rotor position for a) prototype I, b) prototype II, c) prototype III

Jaki widać największa wartość momentu zaczepowego posiada prototyp II wykonany z blachy transformatorowej bez przełożenia. Prototyp wykonany z blachy transformatorowej z przełożeniem (prototyp III) posiada znacznie zredukowaną wartość momentu zaczepowego (o około 70%) w odniesieniu do Prototypu II. Prototyp I wykonany z blachy izotropowej o grubości 0,35 mm bez przełożenia wykazuje pewne cechy anizotropii. Według PN dotyczącej blach prądnicowych dopuszczalny jest wzrost stratności w umownej osi Y o około 17% w przypadku blachy o grubości 0,35 mm [9]. Jednocześnie dla prototypu I uzyskano najmniejszą wartość amplitudy momentu zaczepowego (rys. 4a).

5. Charakterystyki ruchowe

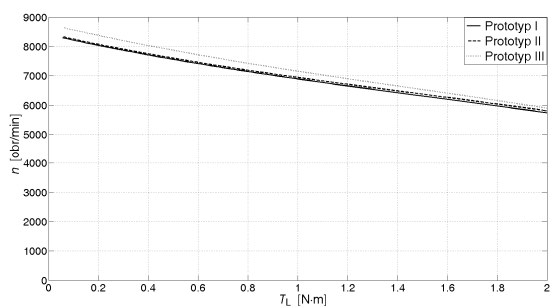
Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk ruchowych oraz regulacyjnych pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat blokowy układu pomiarowego
Fig. 5. Block diagram of the measuring system

Dla każdego prototypu wyznaczono rodzinę charakterystyk ruchowych przy różnych wartościach napięcia zasilającego U_{dc} . Napięcie zasilające zmieniano w zakresie od 24 V do 29,6 V ze skokiem co 0,5 V. Zakres zmiany napięcia zasilającego wynikał z dopuszczalnej zmiany napięcia na baterii litowo-polimerowej. Moment obciążenia zadawano z poziomu komputera PC (rys. 5) w zakresie od 0 do 2 Nm ze skokiem co 0,001 Nm (minimalna rozdzielczość zadajnika momentu sterownika DSP6001A firmy Magtrol).

Na rysunku 6 pokazano charakterystyki mechaniczne $n=f(T_L)$ wyznaczone dla dolnej granicznej wartości napięcia zasilającego tj. dla $U_{dc}=24$ V.

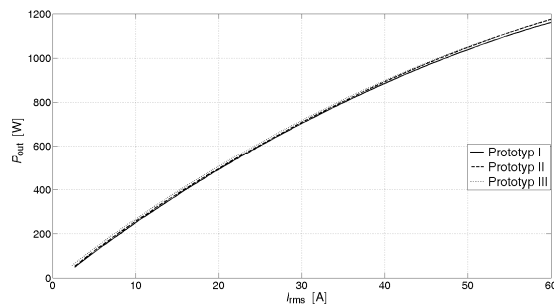


Rys. 6. Zależność prędkości obrotowej n od momentu obciążenia T_L
Fig. 6. Motor speed n as a function of load torque T_L

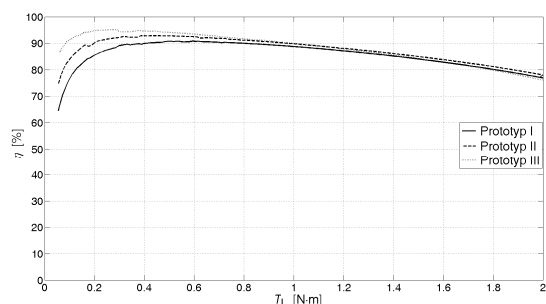
Charakterystyki mechaniczne prototypów I i II praktycznie się pokrywają. W przypadku prototypu III z uwagi na nieznacznie mniejszą wartość stałej napięciowej k_V zauważalne jest przesunięcie charakterystyki mechanicznej do góry w całym zakresie zmiany momentu obciążenia. Zależność mocy wyjściowej P_{out} od wartości skutecznej prądu pasma I_{rms} pokazano na rysunku 7.

Dla prototypu III uzyskano największą wartość mocy wyjściowej w odniesieniu do wartości skutecznej prądu pasmowego praktycznie w całym zakresie zmiany momentu obciążenia.

Sprawność układu napędowego η od momentu obciążenia T_L pokazano na rysunku 8.



Rys. 7. Zależność mocy wyjściowej P_{out} od wartości skutecznej prądu pasma I_{rms}
Fig. 7. Output power P_{out} as a function of rms phase current

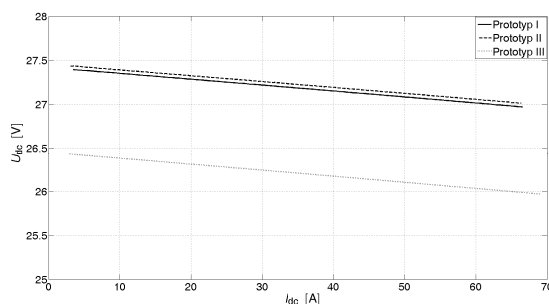


Rys. 8. Zależność sprawności η od momentu obciążenia T_L
Fig. 8. Resultant efficiency η as a function of load torque T_L

Prototyp III w którym stojan został wykonany z blachy transformatorowej z przełożeniem uzyskuje bardzo wysoką sprawność szczególnie w zakresie obciążenia momentem poniżej 0,6 Nm. W odniesieniu do prototypu I wykonanego z blachy prądnicowej uzyskuje sprawność większą o około 10%. Różnica ta ulega zmniejszeniu przy wzroście momentu obciążenia. Prototyp II wykonany z blachy transformatorowej bez przełożenia charakteryzuje się większą sprawnością niż prototyp I, ale niższą niż prototyp III w zakresie niewielkiego obciążenia. Jak można zauważyć przy napięciu zasilającym $U_{dc}=24$ V żaden z prototypów nie osiągnął wymaganej mocy wyjściowej 800W przy prędkości $n=8000$ obr/min.

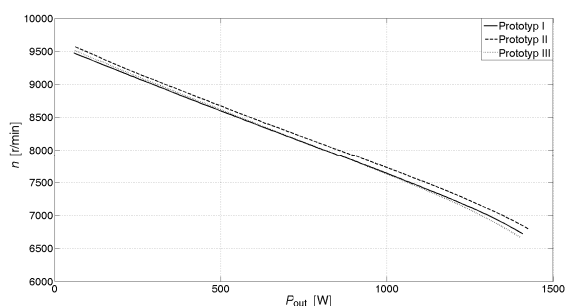
6. Wyznaczenie minimalnego napięcia zasilającego

Jak można zauważyć przy napięciu zasilającym $U_{dc}=24$ V żaden z prototypów nie osiągnął wymaganej mocy wyjściowej 800 W przy prędkości $n=8000$ obr/min. W rzeczywistości przy zastosowaniu pakietu baterii litowo-polimerowych nie jest możliwa praca układu napędowego przy napięciu $U_{dc}=24$ V. W pracy wykazano [7], że minimalne napięcie rozładowania baterii U_{demin} nie powinno przekraczać 27,3 V. Dla każdego prototypu wyznaczono minimalne napięcie pracy przy którym osiągnany jest wymagany punkt pracy bez konieczności stosowania regulacji PWM czy też forsowania wzbudzenia [8]. Zależność napięcia U_{dc} na zaciskach układu zasilającego od prądu źródła I_{dc} pokazano na rysunku 9.

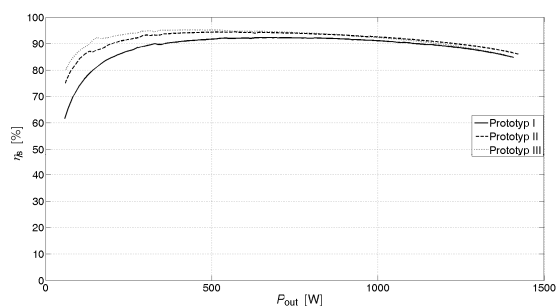


Rys. 9. Zależność napięcia zasilającego U_{dc} od prądu źródła I_{dc}
Fig. 9. Source voltage U_{dc} as a function of source current I_{dc}

W przypadku prototypu III minimalne napięcie zasilający przy którym uzyskuje się wymagany punkt pracy jest ono około 1 V niższe w przypadku dwóch pozostałych prototypów. Obserwowany spadek napięcia zasilającego wynika z długości przewodów zasilających zastosowanych w układzie pomiarowym. Na rysunku 10 pokazano zależność prędkości obrotowej n od mocy wyjściowej P_{out} dla poszczególnych prototypów przy minimalnych napięciach zasilających U_{demin} zapewniających osiągnięcie wymaganego punktu pracy. Dla każdego prototypu uzyskano porównywalną sztywność charakterystyk mechanicznych. Sprawność wypadkową badanych prototypów η od mocy wyjściowej P_{out} pokazano na rysunku 11.



Rys. 10. Zależność prędkości obrotowej n od momentu obciążenia T_1 .
Fig. 10. Motor speed n as a function of load torque T_1 .



Rys. 11. Zależność sprawności η od mocy wyjściowej P_{out} .
Fig. 11. Resultant efficiency η as a function of output power P_{out} .

Przy porównywalnych warunkach pracy w przypadku prototypu II uzyskano w całym zakresie zmiany mocy wyjściowej większą sprawność silnika w odniesieniu do prototypu I. Prototyp III podobnie jak przy identycznych napięciach zasilających wykazuje największą sprawność (max 95,2%) w zakresie mniejszych obciążeń. W projektowanym punkcie pracy sprawności prototypów II i III są porównywalne wynosząc 93,7% oraz 93,9% w odniesieniu do 92,1% (prototyp I).

7. Podsumowanie

W napędach wysokoobrotowych straty w żelazie zaczynają ogrywać dość istotną rolę z uwagi na duże wartości częstotliwości przełączeń uzwojeń silników z komutacją elektroniczną. Jak pokazano w pracy jedną z możliwości poprawy sprawności maszyn wysokoobrotowych jest stosowanie materiałów magnetycznych o zmniejszonej stratności. Blachy transformatorowe posiadają zmniejszoną stratność, ale charakteryzują się dominującym kierunkiem magnetycznym. W analizowanym przypadku po zastosowaniu w obwodzie magnetycznym stojana blach transformatorowych o grubości 0,23mm nastąpiło zwiększenie sprawności układu napędowego. Sposób ułożenia blach transformatorowych ma istotny wpływ na wartość maksymalną momentu zaczepowego. W prototypie II w którym został zachowany dominujący kierunek magnetyczny (umowa oś X) nastąpiło znaczące zwiększenie

wartości maksymalnej momentu zaczepowego co jest niewątpliwie znaczącym zjawiskiem pasożytniczym. Jednocześnie w całym zakresie zmiany momentu obciążenia nastąpiła poprawa sprawności układu napędowego. W przypadku prototypu III w którym blachy transformatorowe zostały przełożone (brak wyraźnego dominującego kierunku magnetycznego) uzyskano wartość maksymalną momentu zaczepowego porównywalną z prototypem I wykonanym z blachy prądnicowej 0,35 mm. W zakresie mniejszych wartości obciążeń w prototypie III uzyskano największe wartości sprawności układu napędowego. W odniesieniu do prototypu I różnica ta dochodzi do 10%. Jednocześnie w prototypie III nastąpiło niewielkie zmniejszenie stałej napięciowej co skutkowało przesunięciem punktu pracy silnika w odniesieniu do prototypów I i II. W prototypie I wykonanym z blachy prądnicowej również jest zauważalny pewien wpływ anizotropii blachy.

Zastosowanie typowej blachy transformatorowej pozwala ograniczyć straty w żelazie. Korzyści wynikające z zastosowania tego materiału magnetycznego będą szczególnie widoczne w przypadku napędów wysokoobrotowych w których częstotliwości przełączeń dochodzą do kilkuset herców przy jednocześnie wysokich wymaganiach co do sprawności wypadkowej.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 312 440.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 "Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej" współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

Aparatura wykorzystana do przeprowadzenia badań została zakupiona w wyniku realizacji Projektu „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 Regionalny system innowacji.

8. Literatura

- [1] Hodkinson R., Fenton J.: *Lightweight Electric/ Hybrid Vehicle Design*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd 2001.
- [2] Husain I.: *Electric and hybrid vehicles, design fundamentals*, CRC PRESS LLC 2003.
- [3] Glascock R., Hung J. Y., Gonzalez L. F., Walker R. A.: *Multi-modal hybrid powerplant for unmanned aerial systems (UAS) Robotics*, In: *Twenty-Fourth Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference*, March 30th to April 1st 2009, Bristol United Kingdom.
- [4] Zhu Z. Q., Howe D.: *Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles*, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, No. 4, pp. 746-765, 2007.
- [5] Choi J., Park J., Lee K., Kim S., Lee J., Kim Y.: *The effectiveness of anisotropic iron-core material on a switched reluctance motor*, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No. 5, Part: 2, pp. 3352-3354, 2003.
- [6] Korkosz M.: *Analiza wpływu wybranych parametrów na właściwości wysokoobrotowych silników reluktancyjnych przełączalnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [7] Ehsani M., Gao Y., Miller J. M.: *Hybrid electric vehicles: architecture and motor drives*, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, No. 4, pp.719-728, 2007.
- [8] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J., Wygonik P.: *A study of design process of BLDC motor for aircraft hybrid drive*, *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, pp.508 – 513, Gdańsk 2011.
- [9] PN-EN 10106:2009: *Blachy i taśmy stalowe elektrotechniczne o ziarnie nieorientowanym walcowane na zimno, dostarczane w stanie w pełni przetworzonym*.

otrzymano / received: 16.07.2013

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2013

artykuł recenzowany / revised paper