

Analiza wybranych bezszczotkowych konstrukcji maszyn elektrycznych przeznaczonych do napędów wysokoobrotowych – badania symulacyjne

Streszczenie. W pracy dokonano analizy wybranych konstrukcji bezszczotkowych maszyn elektrycznych przeznaczonych do napędów wysokoobrotowych w sprzęcie gospodarstwa domowego. Typową aplikacją wysokoobrotową jest napęd agregatu ssącego w którym prędkość obrotowa może przekraczać 40 000obr/min. W publikacji omówiono dwie różne konstrukcje bezszczotkowych maszyn elektrycznych tj. silnika reluktancyjnego przełączalnego oraz bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi. Zostały przedstawione wybrane wyniki badań symulacyjnych w zakresie wyznaczania charakterystyk statycznych jak też ruchowych obu analizowanych konstrukcji. Dokonano porównania obu konstrukcji i zamieszczono wnioski.

Abstract. The paper presents an analysis of chosen structures of brushless electric machines designed to high-speed drives in the household appliances. Suction unit drive is a typical high-speed application where speed can exceed 40000 rpm. In this paper two various structures of brushless electric machines i.e. switched reluctance motor and brushless DC motor with permanent magnets were discussed. Chosen results of static and dynamic simulation studies were presented for both structures. Both structures of motors were compared and conclusions were presented. *(The analysis of chosen structures of brushless electric machines designed to high-speed drives – simulation studies)*.

Słowa kluczowe: napęd wysokoobrotowy, sprzęt AGD, bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi, silnik reluktancyjny.

Keywords: high-speed drive, household appliances, brushless DC motor with permanent magnets, switched reluctance motor.

Wstęp

Napędy wysokoobrotowe są wymagające nie tylko pod względem parametrów elektrycznych, ale też mechanicznych. Typowym przykładem napędu wysokoobrotowego w sprzęcie AGD jest agregat ssący. W przypadku tej aplikacji prędkość obrotowa silnika może dochodzić do 50000 obr/min (w zależności od rozwiązania). Zazwyczaj w napędach wysokoobrotowych są stosowane silniki komutatorowe prądu przemiennego. W Polsce są produkowane silniki komutatorowe prądu przemiennego przeznaczone do napędów wysokoobrotowych [1]. W ostatnich latach kierunek rozwoju tego typu napędów polegał głównie na wzroście prędkości obrotowej silnika co pozwało jednocześnie obniżyć jego masę.

Silniki komutatorowe o wzbudzeniu szeregowym nadają się do zastosowań wysokoobrotowych takich jak agregaty ssące, roboty kuchenne, miksery, blendery itp. Względnie prosta konstrukcja silnika, tani sposób regulacji prędkości obrotowej są głównymi atutami tej konstrukcji. Jednak sprawność przetwarzania energii elektrycznej nie należy do wysokich. Istnienie zestyku ślizgowego szczotka-komutator generuje problem z zachowaniem kompatybilności elektromagnetycznej. Wprowadzane ograniczenia co do wartości pobieranej mocy z sieci zasilającej w UE przez silniki elektryczne w sprzęcie AGD mogą przyczynić się do ograniczenia zakresu ich stosowania. Dlatego należy poszukiwać konstrukcji alternatywnych możliwych do zastosowania w napędach wysokoobrotowych o podwyższonej sprawności przetwarzania energii elektrycznej oraz możliwie niskich kosztach wytwarzania. Do takich konstrukcji zaliczyć możemy bezszczotkowe silniki z komutacją elektroniczną oraz silniki indukcyjne klatkowe. Niewątpliwie najkorzystniejsze parametry elektryczne posiadają bezszczotkowe silniki elektryczne z magnesami trwałymi [2-4]. Należy jednak zwrócić uwagę, że magnesy trwałe wytwarzane z pierwiastków ziem rzadkich są produkowane w Chinach które są jednocześnie praktyczne ich jedynym dostawcą. To wymusza poszukiwania rozwiązań które nie posiadają magnesów trwałych. Do takich konstrukcji możemy zaliczyć silniki reluktancyjne przełączalne [5-6] oraz dobrze znane silniki indukcyjne klatkowe.

W publikacji dokonano analizy właściwości dwóch bezszczotkowych konstrukcji maszyn elektrycznych prądu stałego tj. bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi oraz silnika reluktancyjnego przełączalnego przeznaczonych do napędu wysokoobrotowego w sprzęcie AGD tj. agregatu ssącego.

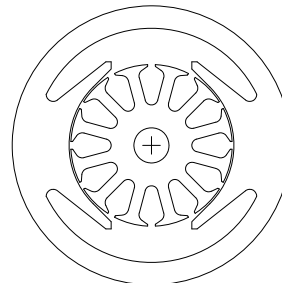
Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych maszyn elektrycznych przeznaczonych do napędów wysokoobrotowych

Do napędów wysokoobrotowych można zastosować następujące silniki elektryczne:

- silnik komutatorowy (KM),
- bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi (BLDCM),
- silnik reluktancyjny przełączalny (SRM),
- silnik indukcyjny klatkowy (IM).

Silnik komutatorowy

W napędach wysokoobrotowych sprzętu AGD najczęściej stosuje się silnik komutatorowy prądu przemiennego o wzbudzeniu szeregowym. Przykładową konstrukcją silnika komutatorowego pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Widok przykładowej geometrii silnika komutatorowego

Silniki komutatorowe prądu przemiennego o wzbudzeniu szeregowym posiadają:

- duży moment rozruchowy,
- miękką charakterystykę mechaniczną,
- możliwość regulacji prędkości obrotowej oraz jednocześnie zapewnienie tzw. miękkiego startu przy

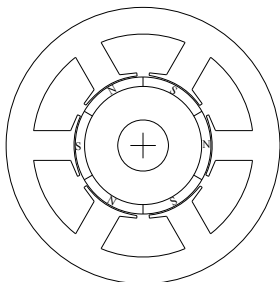
zastosowaniu dodatkowego prostego układu energoelektronicznego,

- niskie ogólne koszty układu napędowego (silnik wraz z układem energoelektronicznym),
- czas pracy limitowany głównie trwałością zestyku ślizgowego szczotka-komutator,
- duże tętnienia momentu elektromagnetycznego o częstotliwości dwukrotnie większej niż częstotliwość sieciowa,
- powiększone wymiary geometryczne związane z koniecznością montażu komutatora mechanicznego,
- sprawność maksymalna samego silnika zazwyczaj nie przekracza 60% przy czym w zakresie roboczym jest znacznie niższa,
- konieczność uwzględniania działania siły odśrodkowej na uzwojenia wirnika oraz komutator.

Silniki komutatorowe prądu przemiennego ze wzbudzeniem szeregowym są chętnie stosowane w sprzęcie AGD z uwagi na niskie ogólne koszty produkcji na co najistotniejszy wpływ ma cena bardzo prostego układu energoelektronicznego.

Bezczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi

Bezczotkowe silniki prądu stałego z magnesami trwałymi mogą być stosowane z powodzeniem w sprzęcie AGD. Z uwagi na konieczność stosowania dedykowanego układu energoelektronicznego w przypadku kiedy nie jest wymagany duży moment rozruchowy (np. napęd agregatu ssącego) ilość pasm silnika można ograniczyć do jednego. Na rysunku 2 pokazano przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne jednopasmowego silnika BLDC 6/6.



Rys.2. Widok przykładowej geometrii jednopasmowego bezzcotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi 6/6

Bezczotkowe jednopasmowe silniki prądu stałego z magnesami trwałymi posiadają:

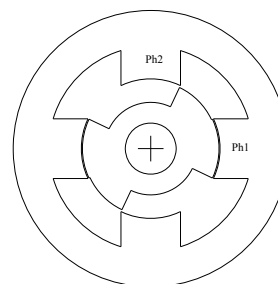
- małą wartość początkowego momentu rozruchowego który uzyskuje się poprzez odpowiednie profilowanie kształtu nadbiegunników stojana,
- sztywną charakterystykę mechaniczną,
- możliwość regulacji prędkości obrotowej oraz kształtowania charakterystyki mechanicznej,
- możliwość tzw. miękkiego rozruchu,
- bardzo wysoką sprawność silnika w szerokim zakresie zmiany prędkości obrotowej,
- niewielkie wymiary zewnętrzne (znacznie zmniejszone zapotrzebowanie na przestrzeń montażową w odniesieniu do silnika komutatorowego),
- trwałość limitowaną żywotnością łożysk,
- bardzo wysokie koszty ogólne układu napędowego związane z koniecznością stosowania dedykowanego układu energoelektronicznego oraz magnesów trwałych,
- duże tętnienia momentu elektromagnetycznego o częstotliwości wynikającej z punktu pracy oraz konstrukcji samego silnika,

- konieczność uwzględniania działania siły odśrodkowej w przypadku powierzchniowego montażu magnesów trwałych (dodatkowe zabezpieczenie).

Bardzo wysoki koszt ogólny układu napędowego wynikający z zastosowanego układu energoelektronicznego, stosowanie wysokoenergetycznych magnesów trwałych z pierwiastków ziem rzadkich, konieczność mechanicznego zabezpieczenia montowanych powierzchniowo magnesów trwałych są przyczynami które powodują, że silnik BLDC nie jest powszechnie stosowany w komercyjnych napędach wysokoobrotowych sprzętu AGD, pomimo jego bardzo dobrych parametrów elektrycznych. Wysoka sprawność układu napędowego sprawia, że będzie on tematem dalszych rozważań.

Silnik reluktancyjny przełączalny

Silniki reluktancyjne przełączalne posiadają wiele różnych rozwiązań konstrukcyjnych. Podobnie jak w przypadku silnika BLDC konieczność ograniczania kosztów ogólnych układu napędowego wymusza stosowanie konstrukcji o minimalnej liczbie pasm stojana maszyny. W przypadku silników reluktancyjnych przełączalnych konstrukcje dwupasmowe są tymi które mogą zapewnić rozruch z dowolnego położenia wirnika oraz ograniczenie kosztów układu energoelektronicznego. Na rysunku 3 pokazano przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2 z niesymetrycznym obwodem wirnika.



Rys.3. Widok przykładowej geometrii dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2

Dwupasmowe silniki reluktancyjne przełączalne posiadają:

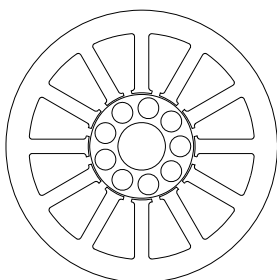
- wartość początkowego momentu rozruchowego zależną od rodzaju zastosowanej modyfikacji wirnika,
- miękką charakterystykę mechaniczną,
- możliwość regulacji prędkości obrotowej oraz kształtowania charakterystyki mechanicznej,
- możliwość tzw. miękkiego rozruchu,
- wysoką sprawność silnika w szerokim zakresie zmiany prędkości obrotowej,
- zmniejszone zapotrzebowanie na przestrzeń montażową w odniesieniu do silnika komutatorowego, ale większe niż w przypadku silnika BLDC,
- bardzo prostą mechaniczną konstrukcją szczególnie wirnika, która zapewnia możliwość pracy z bardzo dużą prędkością obrotową,
- trwałość limitowaną żywotnością łożysk,
- podwyższony poziom drgań i hałasu,
- bardzo duże tętnienia momentu elektromagnetycznego o częstotliwości wynikającej z punktu pracy oraz konstrukcji samego silnika,
- wysokie koszty ogólne spowodowane koniecznością stosowania dedykowanego układu energoelektronicznego przy najniższym koszcie wytworzenia samego silnika.

Koszt zastosowania silnika reluktancyjnego przełączalnego jest nieco niższy niż w przypadku silnika

BLDC. W praktyce możliwe jest uzyskanie zbliżonej sprawności ogólnej do silnika BLDC z uwagi na większe możliwości kształtowania charakterystyki mechanicznej. Silnik reluktancyjny przełączalny jest zatem rozwiązaniem alternatywnym dla silnika BLDC i będzie przedmiotem dalszej analizy.

Silnik indukcyjny klatkowy

Klasyczny silnik indukcyjny klatkowy jest bardzo dobrze znaną konstrukcją. Poprzez zmianę częstotliwości zasilania możliwe jest uzyskanie stosunkowo wysokiej prędkości obrotowej silnika. Najkorzystniejsze właściwości posiadają trójfazowe silniki indukcyjne (rys.4) chociaż możliwe jest również zastosowanie silników dwufazowych. Z uwagi na ograniczenie wartości częstotliwości napięcia zasilającego preferuje się stosowanie konstrukcji o jednej parze biegunów. Przykładową konstrukcję pokazano na rysunku 4. Konstrukcja pokazana na rysunku 4 została zaprojektowana do napędu wysokoobrotowego [7].



Rys.4. Widok przykładowej geometrii trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego o 12 żłóbkach stojana i jednej parze biegunów wirnika $2p=2$

Trójfazowe wysokoobrotowe silniki indukcyjne klatkowe posiadają:

- moment rozruchowy wynikający z zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego,
- stosunkowo sztywną charakterystykę mechaniczną,
- możliwość regulacji prędkości obrotowej oraz kształtowania charakterystyki mechanicznej,
- możliwość tzw. miękkiego rozruchu,
- względnie wysoką sprawność silnika w szerokim zakresie zmiany prędkości obrotowej,
- zapotrzebowanie na przestrzeń montażową w nieznacznie mniejsze w odniesieniu do silnika komutatorowego, ale większe niż w przypadku silnika BLDC czy też SRM,
- trwałość limitowaną żywotnością łożysk,
- małe tętnienia momentu elektromagnetycznego,
- wysokie koszty ogólne spowodowane koniecznością stosowania dedykowanego układu energoelektronicznego,
- problemy z odprowadzaniem ciepła wydzielanego w wirniku,
- konieczność uwzględniania działania siły odśrodkowej na klatki i pierścien zwierający wirnika.

Trójfazowy silnik indukcyjny klatkowy zasilany z dedykowanego układu energoelektronicznego umożliwia jego zastosowanie w napędzie wysokoobrotowym. W pracy [7] przedstawiono przykładowe wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych wysokoobrotowego trójfazowego silnika indukcyjnego z wirnikiem klatkowym.

Wymagania przykładowego napędu wysokoobrotowego

Przykładem napędu wysokoobrotowego jest agregat ssący. W takim przypadku dla silnika przeznaczonego do tego typu napędu stawiane są następujące wymagania:

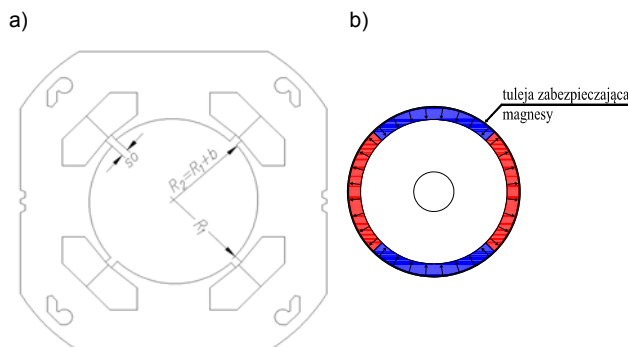
- moc znamionowa 700 W
- prędkość znamionowa 45000 obr/min,

- początkowy moment rozruchowy nie mniejszy niż 0,09 Nm,
- sprawność ogólna układu napędowego nie mniejsza niż 70%,
- średnica zewnętrzna stojana równa 88 mm,
- długość pakietu żelaza nie większa niż 25 mm,
- średnica wałka 10mm,
- dopasowywanie punktu pracy silnika do wymaganej wartości mocy na wale w celu poprawy np. sprawności maszyny czy też ograniczania wartości mocy pobieranej z sieci zasilającej.

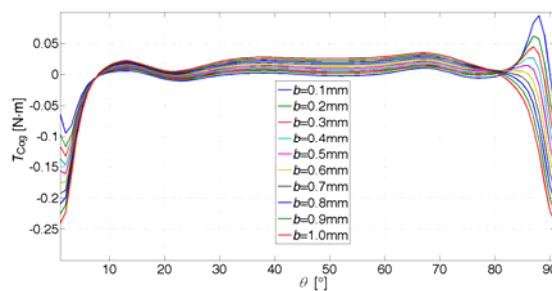
Przy założeniu, że projektowany silnik będzie posiadał moc na wale na poziomie 700 W oraz sprawność ogólną powyżej 77,8% spełniona będzie docelowa dyrektywa UE która ogranicza wartość mocy pobieranej z sieci zasilającej do wartości 900W.

Projekt jednopasmowego bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi

Zastosowanie magnesów trwałych w obwodzie magnetycznym wirnika powoduje powstawanie negatywnego zjawiska w postaci momentu zaczepowego. Oznacza to, że wirnik maszyny ma tendencję do każdorazowego zajmowania określonych położeń w stanie bezprądowym. Zazwyczaj też na etapie projektowania silnika w miarę możliwości ogranicza się wartość maksymalną powstałego momentu zaczepowego. W przypadku rozpatrywanej aplikacji wymagania co do minimalnej wartości momentu rozruchowego nie są duże (0,09 Nm). Nie występuje też konieczność zmiany kierunku wirowania. Pozwala to zastosować konstrukcję jednopasmową w której moment zaczepowy wykorzystuje się do uzyskania określonego położenia wirnika w którym po zasileniu uzwojenia stojana zostanie wytworzony określony moment rozruchowy [8-9]. W pracy [10] zaprezentowano projekt konstrukcji bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi 4/4. Na rysunku 5 pokazano zaprojektowaną konstrukcję silnika.



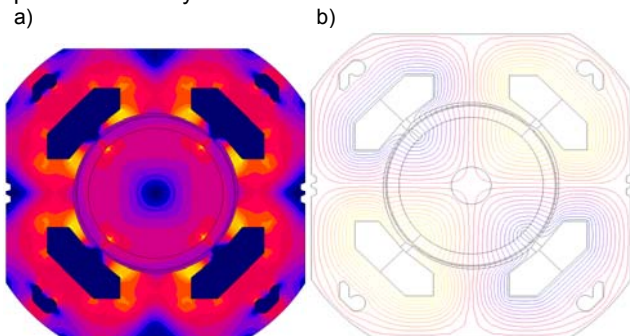
Rys.5. Widok zaprojektowanej geometrii jednopasmowego bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi 4/4 a) stojan, b) wirnik



Rys.6. Wpływ dodatkowej szczeliny powietrznej b na moment zaczepowy T_{cog}

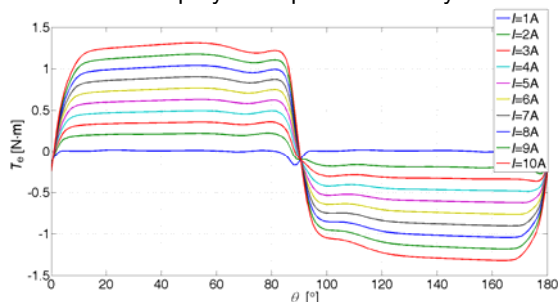
W konstrukcji stojana uwzględniono ograniczenia co do wymiarów zewnętrznych oraz samego sposobu montażu tarcz łożyskowych. Wymaganą wartość momentu zaczepowego o wartości nie mniejszej niż 0,09 Nm uzyskano poprzez odpowiednie ukształtowanie nadbiegunników stojana. Wpływ profilowania wirnika na kształt momentu zaczepowego pokazano na rysunku 6. Obliczenia wpływu dodatkowej szczeliny powietrznej (parametru b) na moment zaczepowy T_{Cog} przeprowadzono w programie Flux firmy Cedrat przy następujących założeniach: braku zasilania uzwojenia stojana ($I=0$ A), wysokości magnesu $h_{mag}=3$ mm, szczeliny powietrznej $\delta=0,7$ mm, długości pakietu żelaza $L_{Fe}=15$ mm oraz 34 zwojach przypadających na każdy biegun stojana (przy połączeniu szeregowym uzwojeń biegunów) i średnicy drutu nawojowego $d_b=0,65$ mm (rys.6). W obwodzie magnetycznym stojana przewidziano zastosowanie blachy magnetycznej o grubości 0,23 mm. Na wirniku przewidziano montaż neodymowych magnesów trwałych klasy N38.

Przyjęcie dodatkowej szczeliny powietrznej o wartości większej niż $b>0,45$ mm pozwoli wirnikowi zatrzymać się w jednym z czterech położen startowych tj. $\theta_{start}=1^\circ; 91^\circ; 181^\circ$ oraz 271° . W dalszych rozważaniach przyjęto wartość dodatkowej szczeliny powietrznej równą $b=0,5$ mm. Przy parametrze $b=0,5$ mm wartość maksymalna momentu zaczepowego osiąga wartość $T_{cogMax}=0,16$ Nm. Przykładowy rozkład strumienia magnetycznego analizowanej konstrukcji pokazano na rysunku 7 w jednym z położen startowych.



Rys.7. Przykładowy rozkład a) gęstości strumienia magnetycznego b) izolini strumienia magnetycznego ψ dla jednego z położen startowych wirnika θ

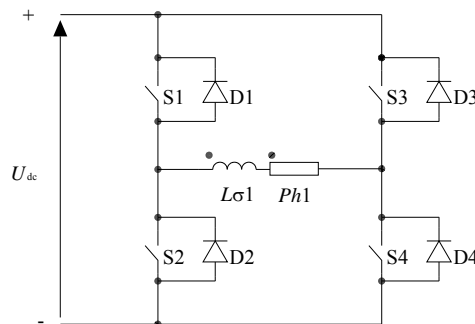
Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ przy $I=var$ pokazano na rysunku 8.



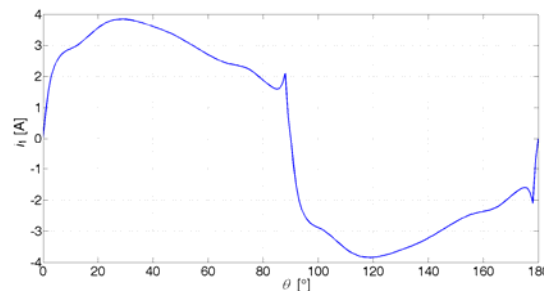
Rys.8. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ przy $I=var$

Projektowana konstrukcja silnika jest maszyną elektryczną o cyklicznie przełączanych uzwojeniach. Model matematyczny maszyn elektrycznych o cyklicznie przełączanych uzwojeniach zaprezentowano w [11]. Przy wyznaczaniu przebiegów czasowych projektowanego silnika zastosowano model polowo-obwodowy. Na rysunku 9 pokazano schemat połączeń elektrycznych zastosowanego modelu polowo-obwodowego.

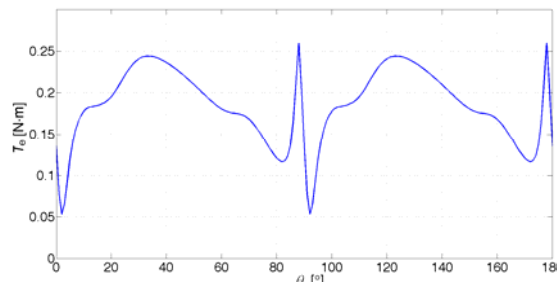
Przykładowe przebiegi czasowe silnika zostały wyznaczone w projektowanym punkcie pracy tj. przy prędkości obrotowej $n=45000$ obr/min oraz napięciu zasilającym $U_{dc}=320$ V. Kąt przewodzenia θ_{przew} par łączników S1, S4 oraz S2, S3 został ograniczony do 88° mechanicznych. Jest to konieczne z uwagi wymaganą szybką zmianę kierunku prądu w uzwojeniu Ph1 silnika. Na rysunkach 10-11 pokazano zależność prądu pasma silnika i_1 (rys.10) oraz wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_e (rys.11) w funkcji położenia wirnika θ .



Rys.9. Schemat połączeń elektrycznych zastosowanego modelu polowo-obwodowego



Rys.10. Zależność prądu pasma i_1 w funkcji położenia wirnika θ przy $n=45000$ obr/min silnika BLDC



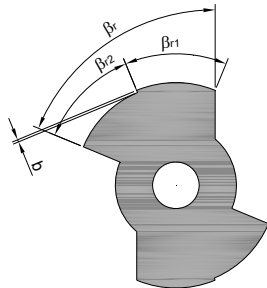
Rys.11. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ przy $n=45000$ obr/min silnika BLDC

Projektowany silnik osiąga zakładane parametry przy prędkości 45000 obr/min przy ograniczeniu kąta przewodzenia θ_{przew} łączników do wartości 88° . W projektowanej konstrukcji, pomimo zastosowania tylko jednego pasma tętnienia wytwarzanego momentu elektromagnetycznego są duże, ale ich poziom jest akceptowalny.

Projekt dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego

W przypadku silnika reluktancyjnego przełączalnego zastosowano konstrukcję dwupasmową 4/2 pokazaną na rysunku 3. Takie rozwiązanie pozwala ograniczyć koszt wykonania układu energoelektronicznego. W układzie energoelektronicznym przewidziano zastosowanie dwóch półmostków typu H (cztery tranzystory oraz cztery diody

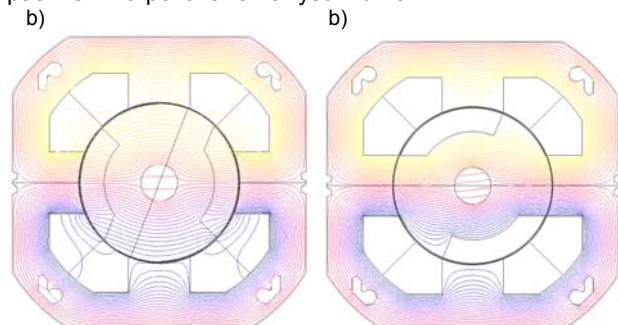
zwrotne). Z uwagi na konieczność ograniczania częstotliwości komutacji prądów przyjęto rozwiązanie o jednej parze biegunów (dwa zęby wirnika). Problemem konstrukcji dwupasmowych o symetrycznej budowie obwodu magnetycznego wirnika jest brak możliwości rozruchu z dowolnego położenia. Zastosowanie wirnika profilowanego np. ze skokową wartością szczeliny powietrznej pozwala uzyskać wymaganą wartość minimalnego momentu rozruchowego (rys.12). Różne sposoby profilowania wirnika zaprezentowano w pracach [12-15].



Rys.12. Przyjęty profil wirnika silnika reluktancyjnego przełączalnego

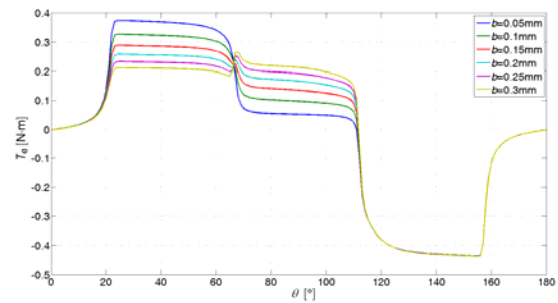
Przy projektowaniu silnika reluktancyjnego przełączalnego przyjęto, że powinien on być przystosowany do zamontowania komercyjnych tarcz łożyskowych. Z tego też względu średnicę zewnętrzną obwodu stojana zastosowano identyczną jak w silniku komutatorowym tj. 88 mm. W trakcie procesu projektowania pozostałe wymiary geometryczne stojana, dane nawojowe silnika były tak dobierane, aby uzyskać moc wyjściową 700 W przy prędkości 45000 obr/min oraz możliwie jak najwyższej sprawności ogólnej układu napędowego. W przypadku wirnika przyjęto założenie, że wartość kąta zęba β_r wirnika jest równa dwukrotnej wartości kąta bieguna stojana $\beta_s=45^\circ$. Przy kącie $\beta_s=45^\circ$, kącie $\beta_r=90^\circ$ oraz założeniu, że $\beta_{r1}=\beta_{r2}$ uzyskuje się możliwość rozruchu silnika z dowolnego położenia wirnika [16].

Przykładowy rozkład izolinii strumienia magnetycznego zaprojektowanej konstrukcji silnika dla położen charakterystycznych przy założeniu zasilenia jednego z pasm silnika pokazano na rysunku 13.



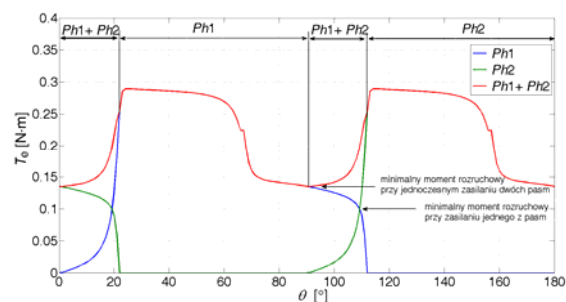
Rys.13. Przykładowy rozkład strumienia magnetycznego ψ dla dwóch różnych położen wirnika θ a) niewspółosiowe, b) współosiowe

Minimalną wartość początkowego momentu rozruchowego w przypadku silnika ze skokową szczeliną powietrzną określa wartość dodatkowej szczeliny powietrznej oznaczonej jako b . Na rysunku 14 pokazano zależność statycznego momentu elektromagnetycznego w funkcji położenia wirnika θ przy założeniu, że uzwojenie zasilone jest stałą wartością prądu $I=4$ A.



Rys.14. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e od kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości dodatkowej szczeliny b w umownym paśmie pierwszym $Ph1$

Dla uzyskania wymaganej wartości minimalnego momentu rozruchowego (0,09 Nm) należy przyjąć wartość dodatkowej szczeliny powietrznej $b=0,15$ mm. Na rysunku 15 pokazano zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ przy $I=4$ A oraz $b=0,15$ mm obu pasm $Ph1$ i $Ph2$ silnika.



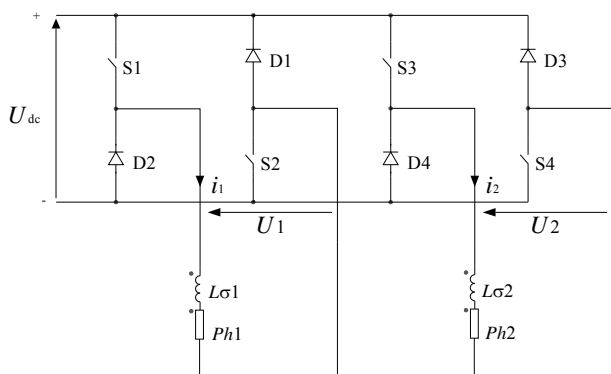
Rys.15. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e od kąta położenia wirnika θ dla $b=0,15$ mm oraz $I=4$ A pasm $Ph1$ oraz $Ph2$

Przebiegi się charakterystyk momentowych pochodzących od obu pasm określa minimalną wartość początkowego momentu rozruchowego (dla $\theta=112^\circ$). W przypadku projektowanego silnika wynosi on 0,1 Nm przy założeniu, że $I=4$ A. Zatem zastosowanie dodatkowej szczeliny powietrznej o wartości $b=0,15$ mm pozwala na rozruch silnika z dowolnego położenia wirnika θ . Wartość początkowego momentu rozruchowego można zwiększyć poprzez jednoczesne zasilanie obu pasm silnika w zakresie kąta położenia wirnika θ tj. $0^\circ \div 22^\circ$, $90^\circ \div 112^\circ$ itd.. W takim przypadku początkowy moment rozruchowy określa wartość momentu elektromagnetycznego umownego pasma $Ph1$ przy kącie położenia wirnika $\theta=90^\circ$.

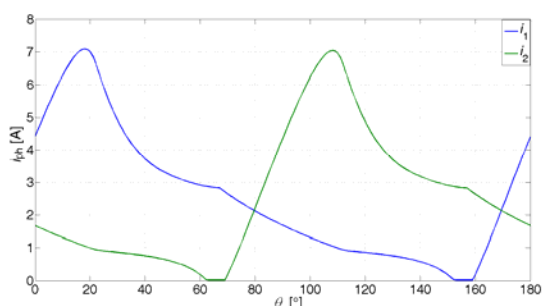
Przebiegi czasowe projektowanego dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego wyznaczono na bazie modelu polowo-obwodowego którego schemat połączeń elektrycznych pokazano na rysunku 16.

Zależności prądów oraz momentu elektromagnetycznego w funkcji położenia wirnika podobnie jak w przypadku silnika BLDC wyznaczono przy prędkości obrotowej $n=45000$ obr/min przy napięciu zasilającym $U_{dc}=320$ V. Parametry sterowania pracą silnika tj. kąt załączenia $\theta_{on}=-21^\circ$ oraz przewodzenia $\theta_c=88^\circ$ dobrano dla uzyskania wymaganej mocy na wale przy możliwie największej sprawności ogólnej.

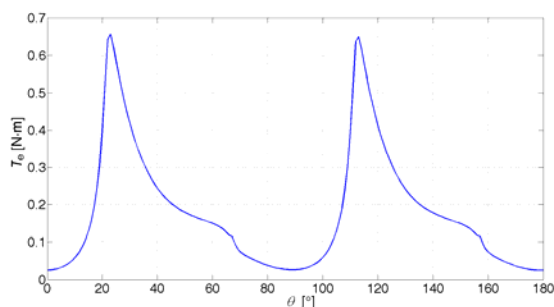
Na rysunkach 17-18 pokazano zależność prądów pasmowych I_{ph} (rys.17) oraz momentu elektromagnetycznego T_e (rys.18) w funkcji położenia wirnika θ w projektowanym punkcie pracy.



Rys.16. Schemat połączeń elektrycznych zastosowanego modelu połowo-obwodowego



Rys.17. Zależność prądów pasm i w funkcji położenia wirnika θ przy $n=45000$ obr/min silnika SRM



Rys.18. Zależność prądu pasma T_e w funkcji położenia wirnika θ przy $n=45000$ obr/min silnika SRM

Dwupasmowy silnik reluktancyjny przełączalny z niesymetrycznym obwodem wirnika podobnie jak silnik BLDC osiąga zakładaną moc na wale przy prędkości 45000 obr/min. Jednak w porównaniu do silnika z magnesami trwałymi wytwarzane tętnienia momentu elektromagnetycznego są znacznie większe. Jest to jednak typowa przypadłość silników reluktancyjnych przełączalnych sterowanych jednopulsowo i pracujących z dużą prędkością obrotową. Częściowo ten problem można ograniczyć stosując profilowanie wirnika ukierunkowane na ograniczanie tętnień wytwarzanego momentu elektromagnetycznego zastosowane w [14-15] czy też zastosowanie odpowiedniego układu zasilającego z odpowiednim algorytmem sterowania [17].

Analiza porównawcza obu konstrukcji

Uzyskane parametry przy pracy z prędkością obrotową 45000 obr/min oraz wybrane wymiary geometryczne obu zaprojektowanych silników zostały zestawione w Tabeli 1.

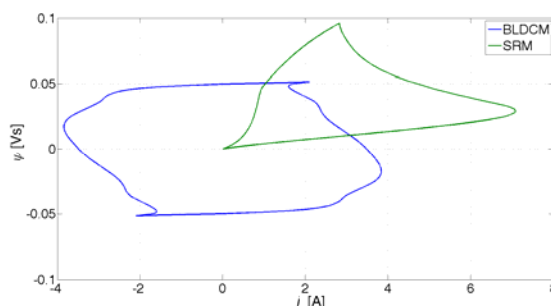
Zależność strumienia sprzężonego ψ w funkcji prądu pasma i dla obu silników pokazano na rysunku 19.

Obie zaprojektowane konstrukcje bezszczotkowych silników prądu stałego z komutacją elektroniczną posiadają wymaganą moc nie mniejszą niż 700W. Jednocześnie sprawność ogólna obu silników przekracza 77,7% przy czym nieznacznie wyższą sprawność posiada silnik z

magnesami trwałymi. Silnik z magnesami trwałymi posiada krótszy o 5mm pakiet żelaza w odniesieniu do silnika reluktancyjnego przełączalnego. W silniku z magnesami trwałymi ze względu na planowany sposób zabezpieczenia magnesów trwałych zastosowano względnie dużą wartość szczeliny powietrznej. Niewątpliwie zmniejszenie wartości minimalnej szczeliny powietrznej pozwoli uzyskać dalszy wzrost sprawności ogólnej układu napędowego.

Tabela 1 Zestawienie wybranych wymiarów geometrycznych oraz uzyskanych parametrów projektowanych silników uzyskanych przy prędkości $n=45000$ obr/min

Parametr	BLDCM	SRM
Liczba pasm	1	2
Liczba biegunów stojana	4	4
Liczba biegunów wirnika	4	2
Długość pakietu żelaza [mm]	15	20
Ilość zwojów na pasmo	136	260
Rodzaj uzwojenia	skupione	skupione
Grubość blachy magnetycznej [mm]	0,23	0,23
Rodzaj zastosowanych magnesów	N38	brak
Minimalna szczelina powietrzna [mm]	0,7	0,3
Srednica zewnętrzna wirnika [mm]	42,5	43,4
Srednica zewnętrzna stojana [mm]	88	88
Napięcie zasilające DC [V]	320	320
Wartość średnia prądu źródła [A]	2,8	2,8
Wartość skuteczna prądu pasma [A]	2,9	3,2
Wartość średnia momentu elektromagnetycznego [Nm]	0,185	0,18
Tętnienia momentu elektromagnetycznego [%]	112	352
Moc na wale [W]	706	700
Sprawność ogólna [%]	78,8	78,1



Rys.19. Zależność strumienia sprzężonego ψ w funkcji prądu pasma i przy $n=45000$ obr/min dla projektowanych silników

Wnioski

W pracy dokonano przeglądu typowych rozwiązań możliwych do zastosowania w napędzie wysokoobrotowym jakim jest agregat ssący. Zaprezentowano projekty dwóch bezszczotkowych silników prądu stałego tj. jednopasmowego bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi 4/4 oraz dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2. W obu konstrukcjach dla uzyskania możliwości rozruchu silnika zastosowano profilowanie obwodu magnetycznego. W przypadku silnika z magnesami trwałymi zastosowano profilowanie nadbiegunika stojana dla zwiększenia wartości momentu zaczepowego. W silniku reluktancyjnym przełączalnym zastosowano profilowanie obwodu magnetycznego wirnika. Obie zaprojektowane konstrukcje spełniają postawione im wymagania projektowe. Jednocześnie spełniają one warunek, aby w warunkach znamionowych nie pobierały z sieci zasilającej mocy większej niż 900W. Konstrukcja silnika z magnesami trwałymi będzie droższa w wykonaniu z uwagi na konieczność zastosowania magnesów neodymowych oraz ich odpowiedniego zabezpieczenia przed działaniem siły odśrodkowej. W obu silnikach do

prawidłowej pracy wystarczy jeden czujnik położenia wału wirnika. W układzie zasilania silnika reluktancyjnego przełączalnego należy zastosować dwa półmostki typu H, natomiast w silniku z magnesami trwałymi wystarczy jeden pełny mostek typu H. Układ zasilania silnika z magnesami trwałymi będzie tańszy i prostszy w wykonaniu praktycznym. Tym samym uzyskano dwa układy napędowe o porównywalnych parametrach (z nieznaczną przewagą silnika BLDC) i zbliżonych kosztach ich wykonania (przy nieco droższym silniku BLDC). Należy jednak zaznaczyć, że na podniesienie kosztów wykonania silnika BLDC wpływają głównie magnesy neodymowe. Ich cena może ulegać istotnym zmianom (np. istotnemu wzrostowi) co należy zaliczyć do czynników przemawiających za poszukiwaniem i stosowaniem konstrukcji pozbawionych magnesów trwałych. Do takich konstrukcji należy zaliczyć silniki reluktancyjne przełączalne. Są one alternatywą dla silników z magnesami trwałymi. Efekty badań eksperymentalnych analizowanych konstrukcji będą tematem następných publikacji.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511312440.

Autor

dr hab. inż. Mariusz Korkosz, prof. PRZ, e-mail: mkosz@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

LITERATURA

- [1] www.zelmotor.pl.
- [2] GIERAS J., WING M.: Permanent Magnet Motor Technology – Design and Applications, Second edition, ISBN 0-8247-0739-7, 2002.
- [3] KRISHNAN R.: Permanent Magnet Synchronous and brushless DC motor drives, CRC Press, Taylor&Fracis Group, NY, 2009.
- [4] GLINKA T.: Silniki elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.84, Nr 07/2008, str. 1-7.
- [5] MILLER T.J.E.: Switched Reluctance Motor and Their Control, Oxford: Oxford University Press, ISBN 0-19-859387-2, 1993.
- [6] KRISHNAN R.: Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press LLC, 2001.
- [7] SOBCZYŃSKI D.: Wysokoobrotowy układ napędowy z silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 07/2006, str. 24-31.
- [8] HOMG A., Non-brush D.C. motor with new improved stator, *United States Patent*, 5093599, Mar.3, 1992.
- [9] BENTOUATI S., ZHU Z.Q., HOWE D.: Influence of design parameters on the starting torque of a single-phase PM brushless DC motor, *IEEE on Magnetics*, Vol.36, Issue 5, Part 1, pp.3533-3536, 2000.
- [10] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: Jednopasmowy bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi przeznaczony do napędu wysokoobrotowego sprzętu AGD, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 04/2015, str. 49-54, 2015.
- [11] PROKOP J.: Metoda modelowania maszyn elektrycznych z nieliniowym obwodem magnetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 08/2010, str. 205-209, 2010.
- [12] EI-KHAZENDAR M.A. and STEPHENSON J.M.: Analysis and optimization of the 2-phase self-starting switched reluctance motor, *Int. Conf. Electr. Machines*, Munich, September 8-10, pp. 1031-1034, 1986.
- [13] KHATER M.M., AFIFI W.A., EI-KHAZENDAR M.A.: Operating performances of a two-phase switched reluctance motor, *Eleventh International Middle East Power Systems Conference*, MEPCON 2006, pp.:636-642, 2006.
- [14] DONG-HEE LEE, HUYNH KHAC, MINH KHOI JIN-WOO AHN: The Performance of 2-Phase High Speed SRM with Variable Air-gap Rotor Poles for Blower System, *2010 International Conference on Electrical Machines and Systems*, ICEMS, pp.1595 – 1598, 2010.
- [15] TOMCZEWSKI K., ŁUKANISZYN M., WITKOWSKI A., WRÓBEL K., JAGIEŁA M.: Rotor Shape Optimization of a Switched Reluctance Motor, *Monograph Intelligent Computer Techniques in Applied Electromagnetics*, vol. 119, Chapter C, *Applications of Computer Methods*, Springer, pp. 217 – 221, 2008.
- [16] KORKOSZ M.: Analiza właściwości dwupasmowych silników reluktancyjnych przełączalnych o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych wirników, *Zeszyty problemowe - Maszyny Elektryczne*, Nr 100/2013 cz.I, str. 55-60, 2013.
- [17] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: Zmodyfikowana metoda zasilania i sterowania silnika reluktancyjnego przełączalnego, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 03/2015, str. 51-56, 2015.