

# Analiza wpływu klasycznych metod sterowania na zakres pracy ze stałą mocą czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 16/12

Mariusz Korkosz, Mariusz Pilecki


## 1. Wstęp

Intensywny rozwój napędów elektrycznych przeznaczonych na potrzeby motoryzacji jest szczególnie zauważalny w ostatnich latach. Zwiększające się wymagania stawiane klasycznym silnikom spalinowym oraz perspektywa kończących się zasobów naturalnych, takich jak ropa naftowa, są niewątpliwie istotnymi czynnikami, które wymuszają rozwój napędów hybrydowych i elektrycznych pojazdów samochodowych. W takich napędach możliwe są do zastosowania różne maszyny elektryczne. Najbardziej atrakcyjne są bez wątpienia bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi. Zapewniają one największą sprawność przetwarzania energii przy jednoczesnym wysokim stosunku wytwarzanego momentu z jednostki objętości. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu wysokoenergetycznych magnesów trwałych wytwarzanych z pierwiastków ziem rzadkich (np. neodymowych). To, co sprawia, że maszyny osiągają tak wysokie parametry, jest jednocześnie ich najsłabszą stroną [1, 2]. Oprócz typowych mankamentów związanych ze stosowaniem magnesów trwałych, które można w większości przewidzieć i się przed nimi zabezpieczyć, występuje jeszcze jeden bardzo istotny problem. Jest nim źródło ich pochodzenia. Praktycznie cała produkcja wysokoenergetycznych magnesów trwałych skoncentrowana jest w jednym regionie świata, który nie do końca jest przewidywalny. To wymusza poszukiwania rozwiązań alternatywnych, mogących zastąpić bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi. Do takich maszyn możemy zaliczyć silniki reluktancyjne przełączalne. Z uwagi na swoją budowę nie potrzebują one magnesów trwałych. Prosta budowa wirnika pozbawionego uzwojeń i magnesów trwałych umożliwia pracę w wysokich temperaturach otoczenia. Jednocześnie jest to konstrukcja bardzo odporna na uszkodzenia mechaniczne i elektryczne. Z tego też względu jest ona brana pod uwagę w napędach elektrycznych i hybrydowych pojazdów samochodowych [3, 4].

W przypadku zastosowania silnika do napędu elektrycznego czy też hybrydowego wskazane jest, aby silnik posiadał możliwie szeroki zakres pracy ze stałą mocą [5]. W artykule zostały przedstawione ograniczenia wynikające z zastosowania klasycznych metod sterowania w przypadku czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego, przewidzianego dla napędu elektrycznego małego pojazdu elektrycznego. Została

**Streszczenie:** Silniki reluktancyjne przełączalne są zaliczane do maszyn bezszczotkowych z komutacją elektroniczną. Jest to rozwiązanie o bardzo prostej konstrukcji. Brak magnesów trwałych jest z jednej strony słabszą stroną tego rozwiązania, bo wpływa na zmniejszenie sprawności ogólnej. Jednocześnie ich brak ma też pozytywne aspekty. Zaliczyć do nich możemy znacznie większą tolerancję na pracę w wysokich temperaturach otoczenia czy też możliwość wytwarzania tej konstrukcji bez konieczności stosowania bardzo wrażliwego materiału, jakim niewątpliwie jest magnes trwały. Jednym z potencjalnych zastosowań dla tej maszyny są napędy pojazdów elektrycznych. W takim przypadku, o ile jest to możliwe, należy stosować konstrukcje o możliwie szerokim zakresie pracy ze stałą mocą. W publikacji dokonano analizy wybranej konstrukcji czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 16/12, przeznaczonego do napędu małego pojazdu. Na bazie modelu symulacyjnego zostały wyznaczone warunki pracy silnika ze stałą mocą przy zastosowaniu klasycznych metod sterowania pracą tej maszyny.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, sterowanie prądowe, sterowanie jednopulsowe, praca ze stałą mocą

 **Abstract:** Switched reluctance motors SRM are categorized among brushless machines with an electronic commutation and a very simple structure. However, the absence of permanent magnets causes that the overall efficiency is decreased. On the other hand, such structure has also advantages like possible operation in high temperature environments or possibility of manufacturing without using susceptible materials like permanent magnets. Therefore, SRMs can be used in electric drive vehicles where structures with as wide constant power range as possible should be used. In the paper, the chosen structure of 4-phase 16/12 SRM motor for a small vehicle drive was analysed. The performance of motor in the constant power range was determined at classical control methods based on simulation model.

Keywords: switched reluctance motor, current control, single-pulse control, constant power region

wyznaczona sprawność ogólna w funkcji parametrów sterowania przy założeniu, że maszyna pracuje w zakresie stałej mocy. Zaprezentowano wnioski dotyczące analizowanej konstrukcji.

## 2. Analizowana konstrukcja czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego

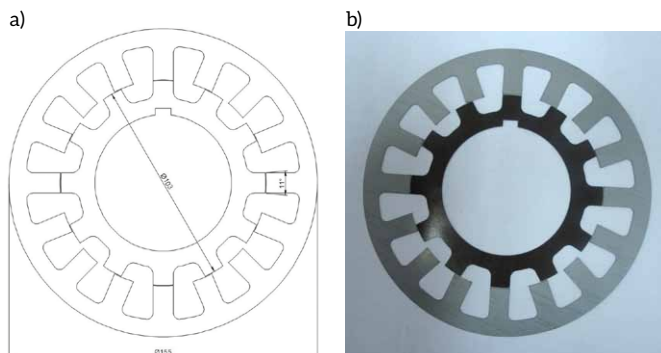
Konstrukcja czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 16/12 została przewidziana jako napęd testowy małego pojazdu elektrycznego. Bazą wyjściową przy projektowaniu geometrii silnika była obudowa standardowego silnika indukcyjnego. To narzuciło ograniczenia co do wymiarów zewnętrznych oraz długości pakietu wirnika. Na rysunku 1 pokazano geometrię analizowanej konstrukcji i zaznaczono wybrane parametry geometryczne. Długość pakietu obwodu magnetycznego stojana oraz wirnika wynosi 160 mm, natomiast szczelina powietrzna pomiędzy stojanem a wirnikiem wynosi 0,3 mm.

Silnik został przewidziany do napędu zasilanego ze źródła niskonapięciowego wynoszącego 48 V. Układ napędowy wymaga mocy na wale 3300 W przy prędkości 4500 obr./min. Pierwotne wymagania dla układu napędowego były nieco inne. Jednak w przewidywanym układzie napędowym małego pojazdu producent zmienił jego parametry już w dość zaawansowanym procesie wykonywania projektowanego silnika. Z uwagi na niską wartość napięcia zasilającego uzyskanie wymaganego punktu pracy wymaga zastosowania małej ilości zwojów przypadających na każde pasmo silnika. Dodatkowo, z uwagi na zjawisko naskórkowości, należało zastosować wiązki wielodrutowe. Na bazie przeprowadzonych obliczeń numerycznych określono liczbę zwojów przypadających na jedno pasmo wynoszącą 20.

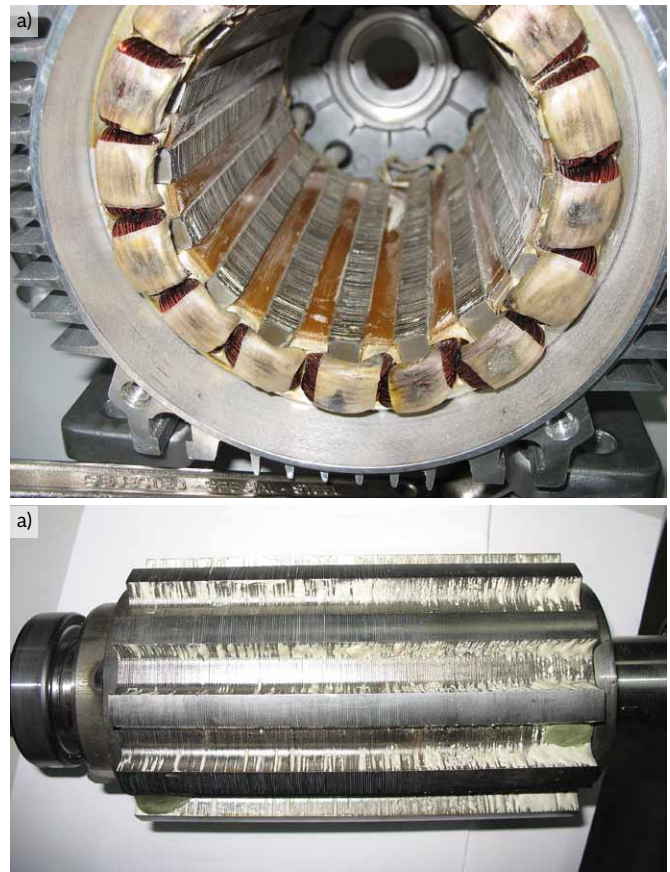
Na rysunku 2 pokazano uzwojony stojan silnika oraz jego wirnik.

## 3. Charakterystyki statyczne

W programie do obliczeń numerycznych zostały wyznaczone wybrane charakterystyki statyczne badanego silnika reluktancyjnego przełączalnego. W obliczeniach zastosowano model numeryczny 2D. Przykładowy rozkład gęstości strumienia magnetycznego oraz izol linii strumienia magnetycznego



Rys. 1. Widok geometrii CAD (a) oraz wyciętych blach obwodu magnetycznego (b) analizowanej konstrukcji czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 16/12



Rys. 2. Widok stojana (a) oraz wirnika (b) prototypowego czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 16/12

jednego z pasm dla trzech położenia charakterystycznych pokazano na rysunkach 3–5. Dla danej konstrukcji występują tylko trzy położenia charakterystyczne, ponieważ rozpiętość kątowa bieguna stojana jest równa rozpiętości kątowej bieguna wirnika.

Charakterystyki statyczne momentu elektromagnetycznego oraz indukcyjności własnej jednego z pasm wyznaczono dla połowy okresu elektrycznego ( $15^\circ$  mechanicznych) przy założeniu zmiany wartości płynącego prądu od 0 A do 200 A. Zależność indukcyjności własnej  $L_{ph}$  w funkcji położenia wirnika  $\theta$  oraz prądu  $I$  pokazano na rysunku 5. Charakterystykę statycznego momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji położenia wirnika  $\theta$  oraz prądu  $I$  pokazano na rysunku 6.

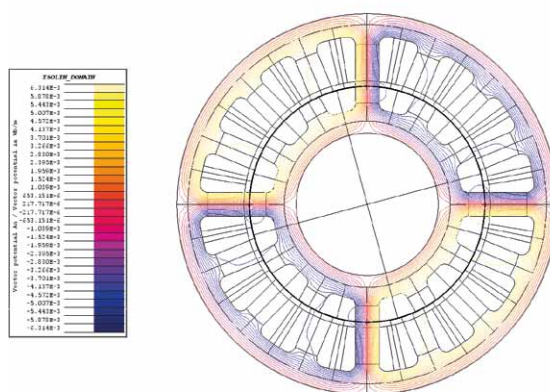
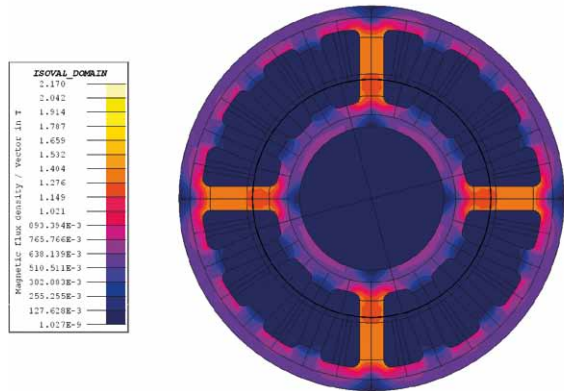
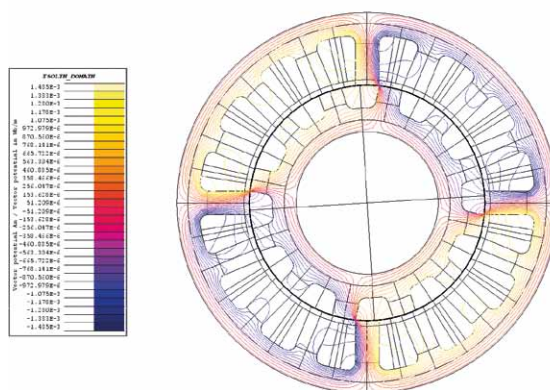
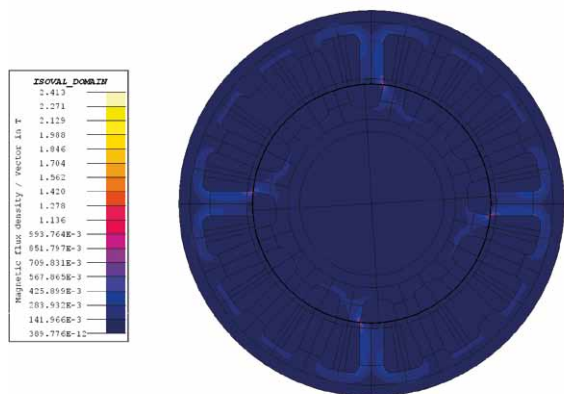
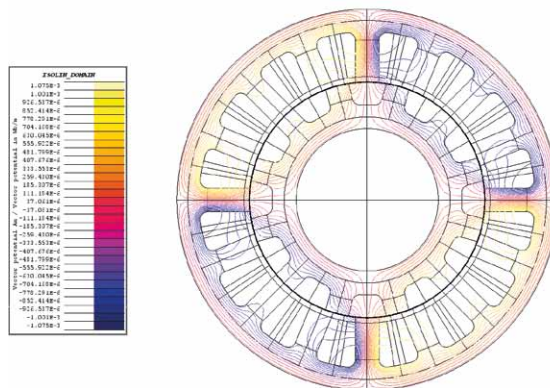
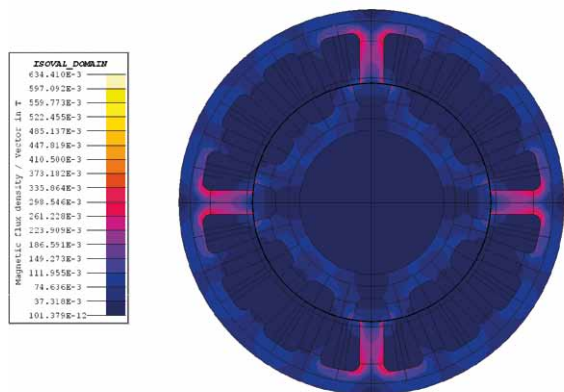
## 4. Klasyczne sterowanie pracą silnika reluktancyjnego przełączalnego

W przypadku silników reluktancyjnych przełączalnych stosowane są trzy metody sterowania:

- prądowe;
- napięciowe PWM;
- jednopulsowe.

Sterowanie prądowe stosowane jest zwyczajowo do pracy silnika ze stałym momentem. Istnieją oczywiście różne metody regulacji prądu w zależności od wymagań układu napędowego. W najprostszej postaci sterowanie to sprowadza się do

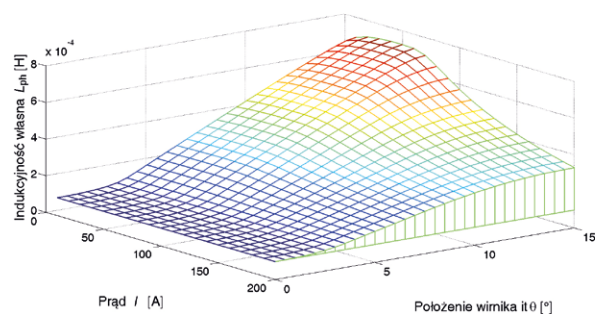




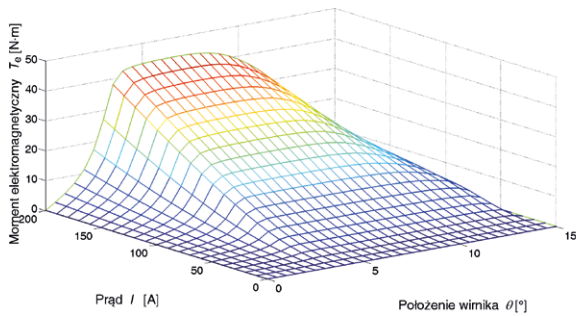
Rys. 3. Rozkład gęstości strumienia magnetycznego dla położenia niewspółosiowego (a), pierwszego położenia brzegowego (b) oraz położenia współosiowego (c)

Rys. 4. Rozkład izolinii strumienia magnetycznego dla położenia niewspółosiowego (a), pierwszego położenia brzegowego (b) oraz położenia współosiowego (c)

utrzymywania prądu płynącego w danym paśmie na określonym poziomie przy danych wartościach kątów załączenia  $\theta_{on}$  i wyłączenia  $\theta_{off}$  lub kątów załączenia  $\theta_{on}$  i przewodzenia  $\theta_{przew}$ . Daje to w konsekwencji w przybliżeniu stały moment na wale silnika. Sterowanie napięciowe PWM to bardzo popularna metoda regulacji prędkości obrotowej. Można ją stosować zarówno w zakresie pracy ze stałym momentem, jak i stałą mocą. Jej zaletą jest łatwość regulacji prędkości obrotowej, ale odbywa się to kosztem znacznego pogorszenia sprawności układu napędowego. Najistotniejszym parametrem sterowania jest współczynnik wypełnienia powiązany z kątem załączenia



Rys. 5. Zależność indukcyjności własnej  $L_{ph}$  w funkcji położenia  $\theta$  i prądu  $I$



Rys. 6. Zależność momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji położenia  $\theta$  i prądu  $I$

$\theta_{on}$  oraz wyłączenia  $\theta_{off}$  zasilania danego pasma. Zasilanie jednopulsove umożliwia pracę silnika na charakterystykach naturalnych. Sterowanie odbywa się poprzez zmianę tylko dwóch parametrów, tj. kąta załączenia zasilania  $\theta_{on}$  oraz kąta wyłączenia zasilania  $\theta_{off}$  danego pasma [6, 7].

Przy założeniu klasycznego sterowania pracą silnika kąt przewodzenia  $\theta_{przew}$  – definiowany jako różnica pomiędzy kątem wyłączenia  $\theta_{off}$  i załączenia  $\theta_{on}$  – nie powinien przekraczać połowy wartości kąta elektrycznego, tj.  $180^\circ$ . Przyjęcie takiego założenia przy opracowywaniu strategii sterowania pracą silnika wprowadza zatem pewne ograniczenia, które wpływają na kształt uzyskanych charakterystyk badanego silnika.

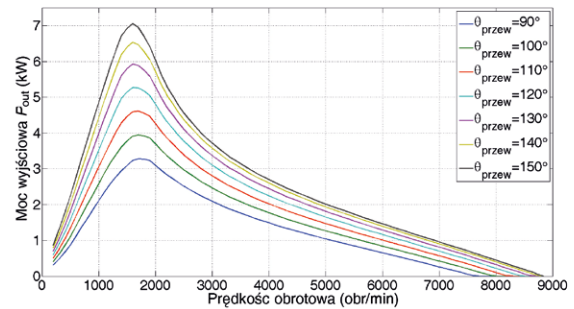
#### 4. Badania symulacyjne wpływu klasycznych metod sterowania na parametry badanego silnika

Badania symulacyjne przeprowadzono przy założeniu, że kąt załączenia  $\theta_{on}$  będzie zmieniany w zakresie od  $-25^\circ$  do  $48^\circ$  ze skokiem  $1^\circ$ . Kąt przewodzenia zmieniano w zakresie od  $90^\circ$  do wartości, przy której kąt przewodzenia przyjmował wartość połowy okresu elektrycznego, tj.  $180^\circ$ . Dla każdego przypadku wyznaczano punkt pracy, przy którym silnik uzyskiwał wymaganą moc na wale, czyli 3300 W. W obliczeniach zastosowano dwie metody sterowania, tj. sterowanie jednopulsove oraz sterowanie prądowe ograniczające prąd płynący w uzwojeniu do wartości 200 A.

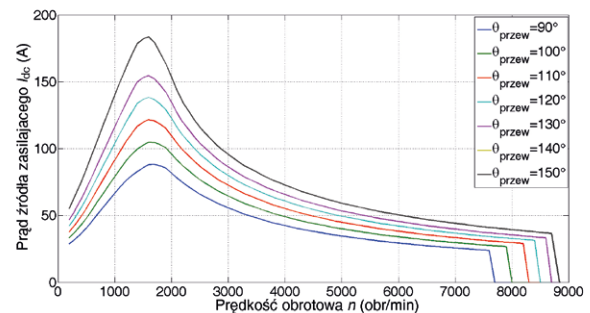
Na rysunkach 7–9 pokazano zależności mocy wyjściowej (rys. 7), wartości średniej prądu źródła zasilającego (rys. 8) oraz sprawności ogólnej (rys. 9) w funkcji prędkości obrotowej uzyskane przy kącie załączenia  $\theta_{on} = 26^\circ$  oraz wybranych kątach przewodzenia  $\theta_{przew} = \text{var}$  dla  $U_{dc} = 48$  V.

W zależności od kąta przewodzenia uzyskujemy całą gamę charakterystyk mechanicznych dla danego kąta załączenia. Wymóg pracy ze stałą mocą oznacza, że dla większości wartości kątów przewodzenia możemy uzyskać wymaganą moc wyjściową wynoszącą 3300 W. Na rysunkach 10–13 pokazano zależność wymaganej mocy (rys. 10), prędkości zapewniającej uzyskanie wymaganej mocy (rys. 11), mocy maksymalnej (rys. 12) i sprawności ogólnej (rys. 13) w funkcji kąta przewodzenia  $\theta_{przew}$  przy kącie załączenia wynoszącym  $\theta_{on} = 26^\circ$ .

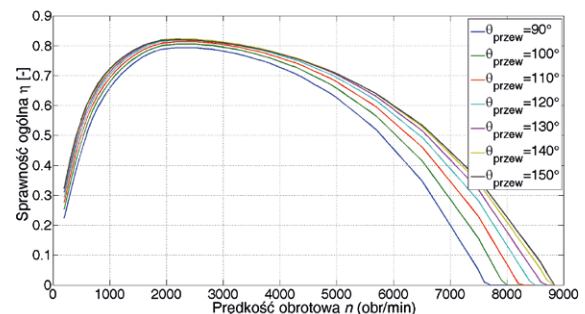
Na rysunkach 14–15 pokazano zależność prądu pasmowego w funkcji kąta położenia wirnika przy  $\theta_{przew} = \text{var}$  dla  $P_{out} = P_N$  (rys. 14) oraz  $P_{out} > P_N$  (rys. 15).



Rys. 7. Zależność mocy wyjściowej  $P_{out}$  w funkcji prędkości obrotowej dla  $\theta_{on} = 26^\circ$  i  $\theta_{przew} = \text{var}$



Rys. 8. Zależność wartości średniej prądu źródła  $I_{dc}$  w funkcji prędkości obrotowej dla  $\theta_{on} = 26^\circ$  i  $\theta_{przew} = \text{var}$

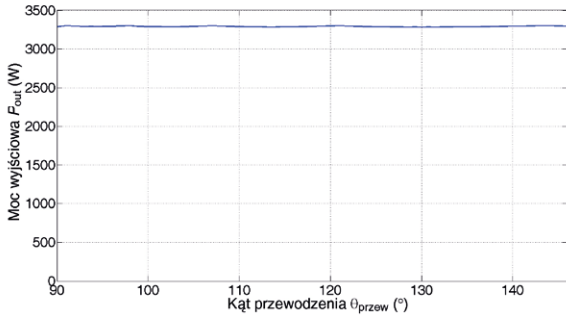


Rys. 9. Zależność sprawności ogólnej  $\eta$  układu napędowego w funkcji prędkości obrotowej dla  $\theta_{on} = 26^\circ$  i  $\theta_{przew} = \text{var}$

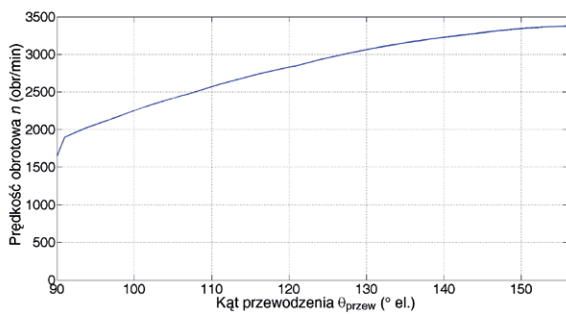
Dla danego kąta załączenia silnik osiąga maksimum mocy wyjściowej (dla każdego kąta przewodzenia) przy jednej prędkości obrotowej (1800 obr./min). Stopień przeciążenia silnika reguluje kąt przewodzenia.

Strumień sprzężony jednego z pasm silnika  $\psi_{ph}$  dla przypadku pracy ze stałą mocą wyjściową (3300 W) w funkcji prądu pasma  $i_{ph}$  pokazano na rysunku 16.

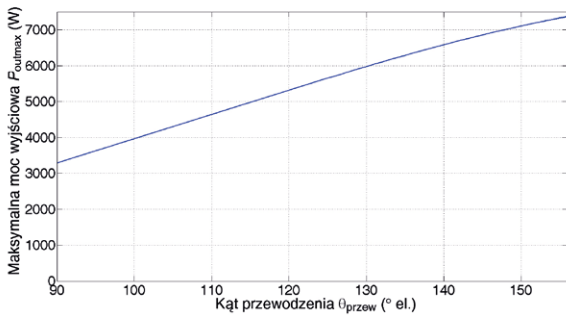
Analiza wyników tylko dla jednego kąta załączenia pokazuje, że przy zmianie kąta przewodzenia możliwe jest utrzymywanie wymaganej mocy, przy zachowaniu maksymalnej sprawności, w pewnym określonym zakresie zmian prędkości obrotowej (1600–3400) obr./min. W praktycznym układzie zakres zmian kąta przewodzenia jest uzależniony od sprawności ogólnej układu, która w pewnych zakresach zmian kąta



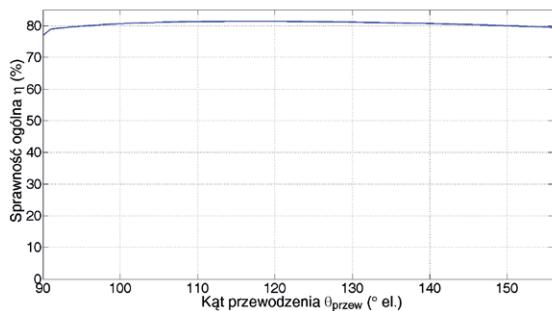
**Rys. 10.** Zależność wymaganej mocy  $P_{out}$  na wale silnika w funkcji  $\theta_{przew}$  dla  $\theta_{on} = 26^\circ$



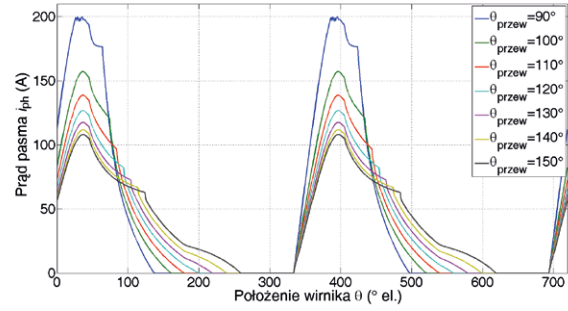
**Rys. 11.** Zależność prędkości obrotowej  $n$  zapewniającej uzyskanie wymaganej mocy na wale silnika w funkcji  $\theta_{przew}$  dla  $\theta_{on} = 26^\circ$



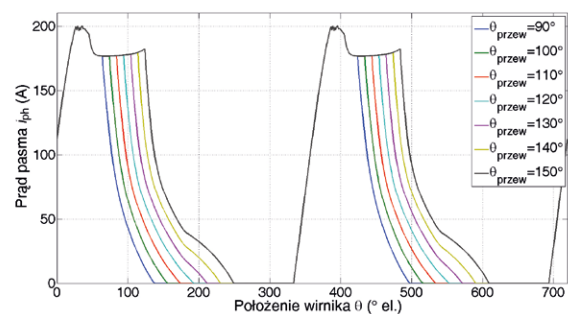
**Rys. 12.** Zależność maksymalnej mocy  $P_{outmax}$  na wale silnika w funkcji  $\theta_{przew}$  dla  $\theta_{on} = 26^\circ$



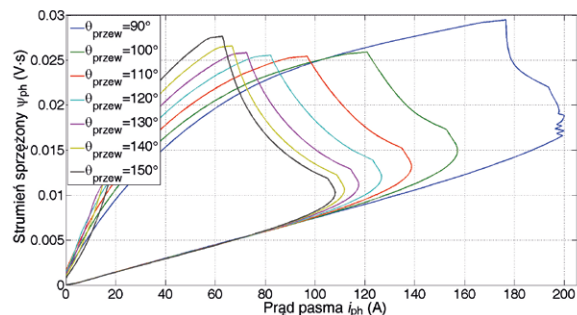
**Rys. 13.** Zależność sprawności ogólnej  $\eta$  przy pracy z wymaganą mocą w funkcji  $\theta_{przew}$  dla  $\theta_{on} = 26^\circ$



**Rys. 14.** Zależność prądu pasma  $i_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  oraz  $\theta_{przew} = \text{var}$  dla  $\theta_{on} = 26^\circ$  i  $P_{out} = \text{const}$



**Rys. 15.** Zależność prądu pasma  $i_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  oraz  $\theta_{przew} = \text{var}$  dla  $\theta_{on} = 26^\circ$  i  $P_{out} > P_N$



**Rys. 16.** Zależność strumienia sprzężonego  $\psi_{ph}$  w funkcji prądu pasma  $i_{ph}$  oraz  $\theta_{przew} = \text{var}$  dla  $\theta_{on} = 26^\circ$  i  $P_{out} = 3300 \text{ W}$

wyłączenia znacznie spada. Oznacza to, że z punktu widzenia pracy z wymaganą mocą, aby uzyskać możliwie jak największą wartość sprawności ogólnej, zakres zmian przewodzenia w praktyce zostaje ograniczony. Jednocześnie wprowadzenie silnika w stan chwilowego przeciążenia wymaga z reguły stosowania, przy założeniu klasycznego sterowania, kątów przewodzenia wynoszących połowę okresu elektrycznego.

### 5. Wyznaczanie parametrów sterowania pracą układu napędowego

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji zostały wyznaczone kąty załączenia i przewodzenia, które umożliwiają uzyskanie wymaganej mocy w możliwie jak najszerszym zakresie



prędkości obrotowej. Przy wyznaczaniu kątów sterowania wybierano tylko te wartości, które umożliwiały uzyskanie maksymalnej sprawności ogólnego układu napędowego. Na rysunkach 17–19 pokazano zależność zmian kąta załączenia (rys. 17), kąta przewodzenia (rys. 18) oraz sprawności ogólnej (rys. 19) w funkcji prędkości obrotowej oraz mocy na wale silnika.

Na rysunkach 17–18 zaznaczono wymagania co do mocy na wale wynoszącej 3300 W. Zakresy sterowania zostały ograniczone tylko do klasycznych metod sterowania.

Projektowany czteropasmowy silnik reluktancyjny przełączalny – przy założeniu klasycznych metod sterowania – może pracować ze stałą mocą na wale wynosząca 3300 W (w zakresie od 1250 obr./min do 4000 obr./min). Dla danej geometrii i danych nawojowych, przy uwzględnieniu klasycznych metod sterowania, po przekroczeniu 4000 obr./min silnik przechodzi do pracy na charakterystyce naturalnej. Możliwe jest poszerzenie zakresu pracy ze stałą mocą poprzez:

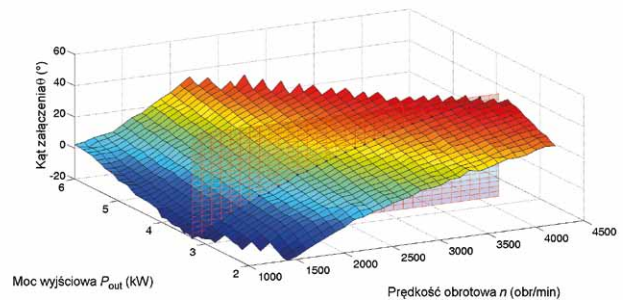
- zmniejszenie rozpiętości kątowej biegunów stojana i wirnika;
- zastosowanie alternatywnej metody sterowania pracą silnika, która pozwala na ciągłe przewodzenie prądów pasmowych silnika.

## 6. Podsumowanie

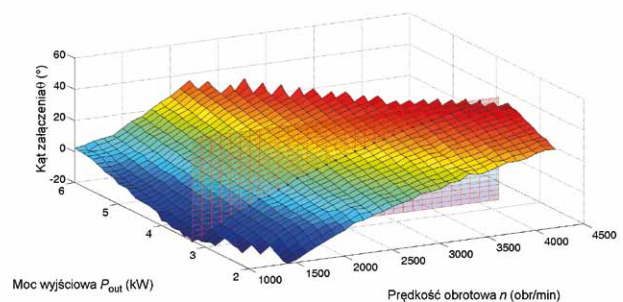
W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych silnika reluktancyjnego przełączalnego 16/12. Na podstawie badań symulacyjnych określono zakres pracy silnika ze stałą mocą. Wyznaczono parametry sterowania, zapewniające stałą wartość mocy wyjściowej przy założeniu uzyskania możliwie jak największej sprawności ogólnego układu napędowego. Uzyskany zakres pracy ze stałą mocą przy założeniu klasycznych metod sterowania nie jest zadawalający. Dalsze prace badawcze będą ukierunkowane na analizę stanu pracy silnika przy założeniu zastosowania alternatywnej metody sterowania, pozwalającej na ciągłe przewodzenie prądów pasmowych.

## 7. Literatura

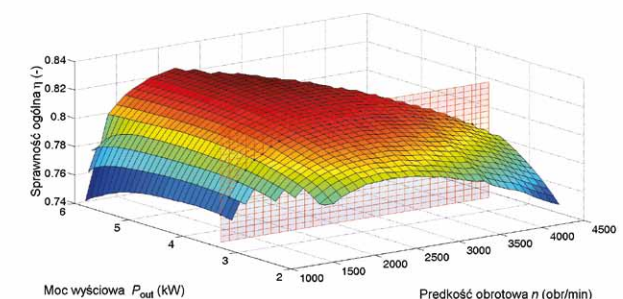
- [1] BODORA A., DOMORACKI A., BISKUP T., KOŁODZIEJ H., BUDZYŃSKI Z.: *Badania układu napędowego z silnikiem bezszczotkowym (PMSM) o mocy 20 kW*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 71/2005.
- [2] GAWRON S.: *Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1/2016.
- [3] WATANABE K., AIDA S., KOMATSUZAKI A., MIKI I.: *Driving Force Characteristics of 40 kW Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle*. Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea 2007.
- [4] NAKANO S., KIYOTA K., CHIBA A.: *Design Consideration of High Torque-Density Switched Reluctance Motor for Hybrid Electrical Vehicle*. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Japan 2016.
- [5] ČALASAN M.P., VUJIČIĆ V.P.: *Characteristics of Switched Reluctance Motor Operating in Continuous and Discontinuous Conduction Mode*. „Serbian Journal of Electrical Engineering” 1/2013.
- [6] MILLER T.J.E.: *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. Newnes 2001.



Rys. 17. Zależność kąta załączenia  $\theta_{on}$  w funkcji prędkości obrotowej  $n$  oraz mocy na wale silnika  $P_{out}$



Rys. 18. Zależność kąta przewodzenia  $\theta_{przew}$  w funkcji prędkości obrotowej  $n$  oraz mocy na wale silnika  $P_{out}$



Rys. 19. Zależność sprawności ogólnej w funkcji prędkości obrotowej  $n$  oraz mocy na wale silnika  $P_{out}$

- [7] AHN J.-W.: *Switched Reluctance Motor* [w:] LAMCHICH M.T. (RED.), „Torque Control”, InTech, 2011.
- [8] KORKOSZ M., PILECKI M.: *Określenie warunków pracy ze stałą mocą czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 16/12 przy zastosowaniu klasycznych metod sterowania*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1(113)/2017.

dr hab. inż. Mariusz Korkosz – e-mail: mkosz@prz.edu.pl,  
mgr. inż. Mariusz Pilecki – e-mail: mpilecki@prz.edu.pl,  
Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki