

Adam POWRÓZEK  
Politechnika Rzeszowska

## MODEL SYMULACYJNY MASZYNY RELUKTANCYJNEJ PRZEŁĄCZALNEJ

W artykule przedstawiono statyczny model symulacyjny czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej SRM 8/6 (ang. *Switched Reluctance Machine*) w systemie Matlab/Simulink, z uwzględnieniem zjawiska nieliniowości obwodu magnetycznego. Na podstawie opracowanego modelu przeprowadzono badania symulacyjne dla różnych punktów pracy silnika przy sterowaniu jednopulsowym. Dokonano analizy wpływu zmiany punktu pracy silnika na przebieg momentu elektromagnetycznego.

### 1. Wprowadzenie

Maszyny SRM (ang. *Switched Reluctance Machine*) ze względu na prostą budowę (brak uzwojeń na wirniku) oraz prostą strukturę konwerterów zasilających w wielu dziedzinach życia zaczynają coraz częściej zastępować inne rodzaje silników. Wynika to także z gwałtownego rozwoju elementów energoelektronicznych oraz spadków cen podzespołów mocy. Sprawność silników SRM w porównaniu z innymi typami maszyn (indukcyjnych, prądu stałego) jest większa. Charakteryzują się one także małymi stratami wirnika, małą bezwładnością wirnika, pracą w wysokiej temperaturze otoczenia. Maszyny SRM mogą pracować w szerokim zakresie prędkości oraz z bardzo dużą prędkością.

Do budowy modelu symulacyjnego, jak i w układzie rzeczywistym do estymacji momentu konieczne są charakterystyki strumieniowe  $\psi(\theta, i)$  i momentowe  $T(\theta, i)$ . Do ich wyznaczenia stosuje się metody obliczeniowe (polowe) oraz pomiarowe (pośrednie, bezpośrednie).

Celem niniejszej pracy jest prezentacja metodyki budowy nieliniowego, statycznego modelu symulacyjnego maszyny reluktancyjnej przełączalnej 8/6. W niniejszym modelu metody obliczeniowe polowe połączono z metodami obwodowymi. Charakterystyki strumieniowo-kątowo-prądowe oraz momentowo-kątowo-prądowe uzyskane na podstawie obliczeń opartych na metodzie elementów skończonych (FEM) zostały stabilizowane i podstawione do modelu obwodowego. Model symulacyjny maszyny SRM zrealizowano za pomocą podstawowej biblioteki Simulink, natomiast układ mocy – biblioteki SimPowerSys-

tems. Na podstawie otrzymanego modelu przeprowadzono badania symulacyjne wpływu zmian punktu pracy maszyny na moment elektromagnetyczny.

## 2. Model matematyczny maszyny SRM

Pomijając prądy wirowe w rdzeniu stojana, wirnika i zakładając, że w przypadku nieliniowości obwodu magnetycznego wektor strumieni skojarzonych  $\psi$  zależy od kąta obrotu wirnika i  $N$  prądów w poszczególnych pasmach, według definicji [1, 2]:

$$\psi(\theta, i) \stackrel{\text{def}}{=} [\psi_1(\theta, i_1, \dots, i_N), \dots, \psi_N(\theta, i_1, \dots, i_N)]^T \quad (1)$$

równania napięciowe  $N$ -pasmowej maszyny SRM przyjmują postać:

$$u = Ri + \frac{d}{dt} \psi(\theta, i) \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_L = T_e \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

$$T_e = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\delta}{\delta \theta} \int_0^{i_i} \psi_1(\theta, i_1, \dots, \bar{i}_i, 0, \dots, 0) d\bar{i}_i \right) \quad (5)$$

przy czym:

$$\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_N]^T, \quad \mathbf{i} = [i_1, \dots, i_N]^T, \quad \mathbf{R} = \text{diag}(R_1, \dots, R_N).$$

W równaniach (1)-(5) zastosowano następujące oznaczenia:  $\theta$  – kąt położenia wirnika,  $J$  – moment bezwładności wirnika,  $D$  – współczynnik tarcia lepkiego,  $T_L$  – moment obciążenia,  $T_e$  – moment elektromagnetyczny silnika.

Po pominięciu sprzężeń między poszczególnymi pasmami i rezygnacji z zapisu macierzowego równanie (2) silnika dla  $k = 1, \dots, N$  można zapisać w postaci:

$$u_k = R_k i_k + \frac{d}{dt} \psi_{kk}(\theta, i_k) \quad (6)$$

a wyrażenie na moment elektromagnetyczny (7):

$$T_e = \sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_k} \psi_{kk}(\theta, \bar{i}_k) d\bar{i}_k \right) \quad (7)$$

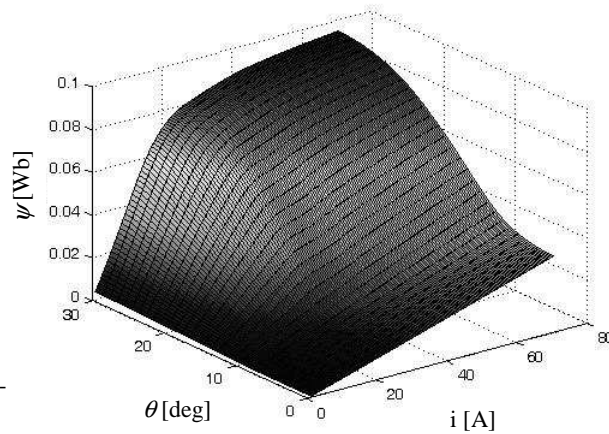
Zastosowanie pełnego modelu razem ze sprzężeniami między poszczególnymi pasmami z powodu dużego stopnia złożoności ma sens tylko w przypadkach, gdy mają one istotny wpływ na wytwarzany przez maszynę moment elektromagnetyczny [1]. Na podstawie uproszczonego modelu matematycznego w pkt 3. niniejszej pracy zostanie opracowany model symulacyjny maszyny SRM.

### 3. Model symulacyjny maszyny SRM 8/6

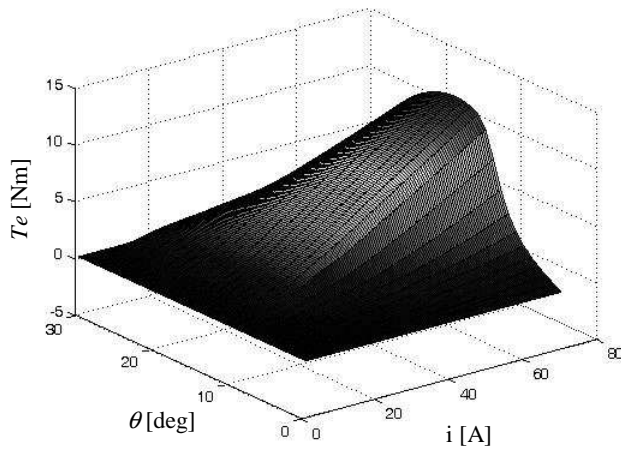
Podczas realizacji modelu symulacyjnego maszyny SRM przyjęto następujące założenia:

- sprzężenia międzypasmowe są pomijalnie małe,
- obwód magnetyczny może pracować przy nasyceniu,
- straty w rdzeniu silnika są pomijalne.

Podstawowe charakterystyki statyczne maszyny SRM 8/6, czyli charakterystyki strumieniowo-kątowo-prądowe oraz momentowo-kątowo-prądowe, można wyznaczyć, stosując obliczenia polowe lub metody pomiarowe [3]. Na potrzeby niniejszej pracy charakterystyki zostały wyznaczone za pomocą obliczeń polowych. Na rysunkach 1. i 2. pokazano uzyskane charakterystyki.

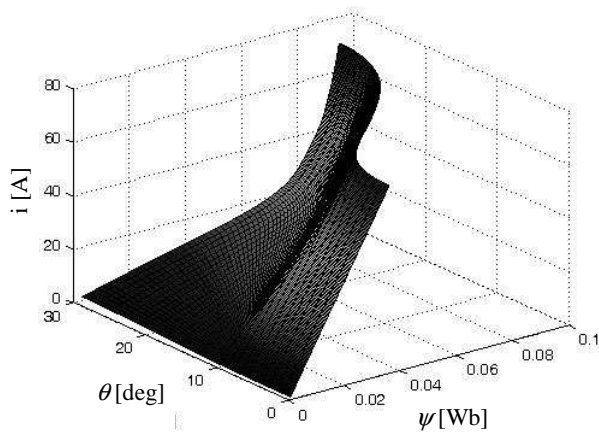


Rys. 1. Charakterystyki strumieniowo-kątowo-prądowe



Rys. 2. Charakterystyki momentowo-kątowo-prądowe

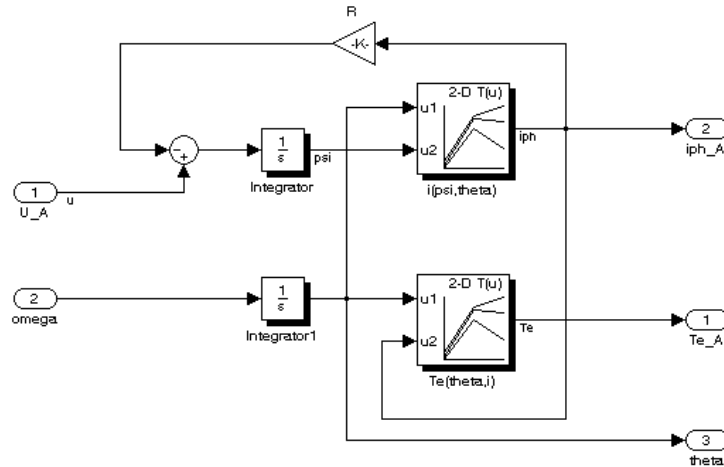
W celu rozwiązania równania (6) należy przekształcić charakterystyki  $\psi(\theta, i)$  do postaci  $i(\theta, \psi)$ . Na rysunku 3. przedstawiono przekształconą postać funkcji.



Rys. 3. Zależność  $i = f(\theta, \psi)$

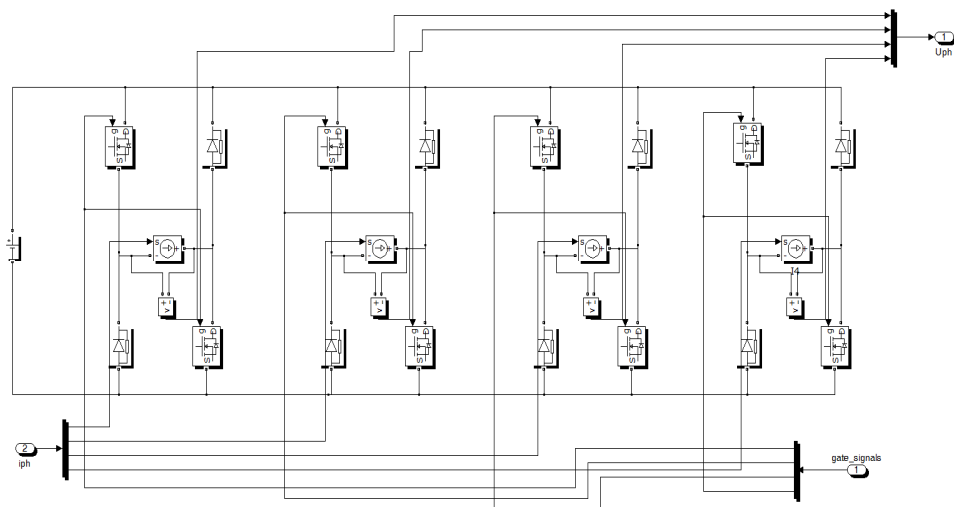
Strukturę blokową modelu pasma pierwszego zbudowanego w systemie Matlab/Simulink pokazano na rys. 4. Model pasma pierwszego składa się z:

- rezystancji pasma  $R$ ,
- tablicy  $i(\psi, \theta)$  do wyznaczania prądów pasmowych,
- tablicy  $T_e(\theta, i)$  zawierającej wyznaczoną drogą obliczeń polowych charakterystykę momentowo-kątowo-prądową.



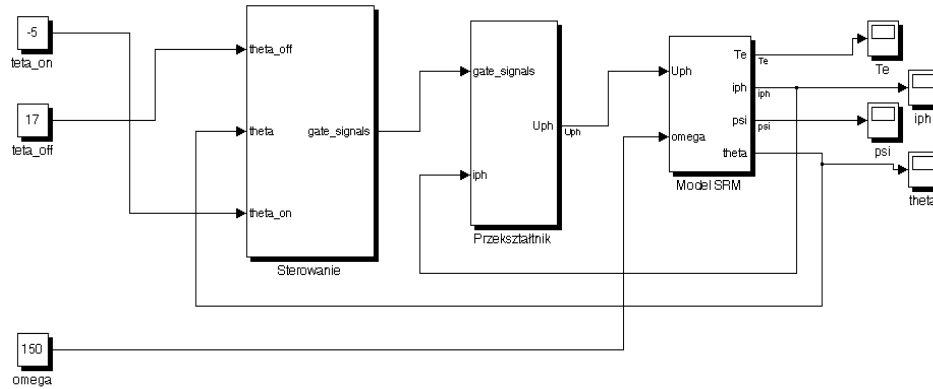
Rys. 4. Model pasma pierwszego maszyny SRM 8/6

Do zasilania silnika wykorzystano układ zbudowany na podstawie półmostka typu H. Na rysunku 5. zaprezentowano model układu zasilającego silnik utworzony w systemie Matlab/Simulink. Do budowy modelu układu zasilania wykorzystano bibliotekę SimPowerSystems, która zawiera m.in. gotowe modele elementów półprzewodnikowych oraz źródeł zasilania. Wykorzystano również źródła prądowe sterowane oraz bloki do pomiaru napięcia.



Rys. 5. Schemat układu przekształtnika SRM

Sygnałami wejściowymi falownika są sygnały bramkowe tranzystorów MOSFET (*gate\_signals*) oraz sygnały sterujące źródłami prądowymi (*iph*). Sygnały *U<sub>ph</sub>* są zmierzonymi napięciami pasmowymi i są dostarczane do modelu SRM. Układ zasilany jest stałym napięciem  $U_{dc} = 24$  V. Na rysunku 6. pokazano końcowy model silnika SRM do badania stanów statycznych.

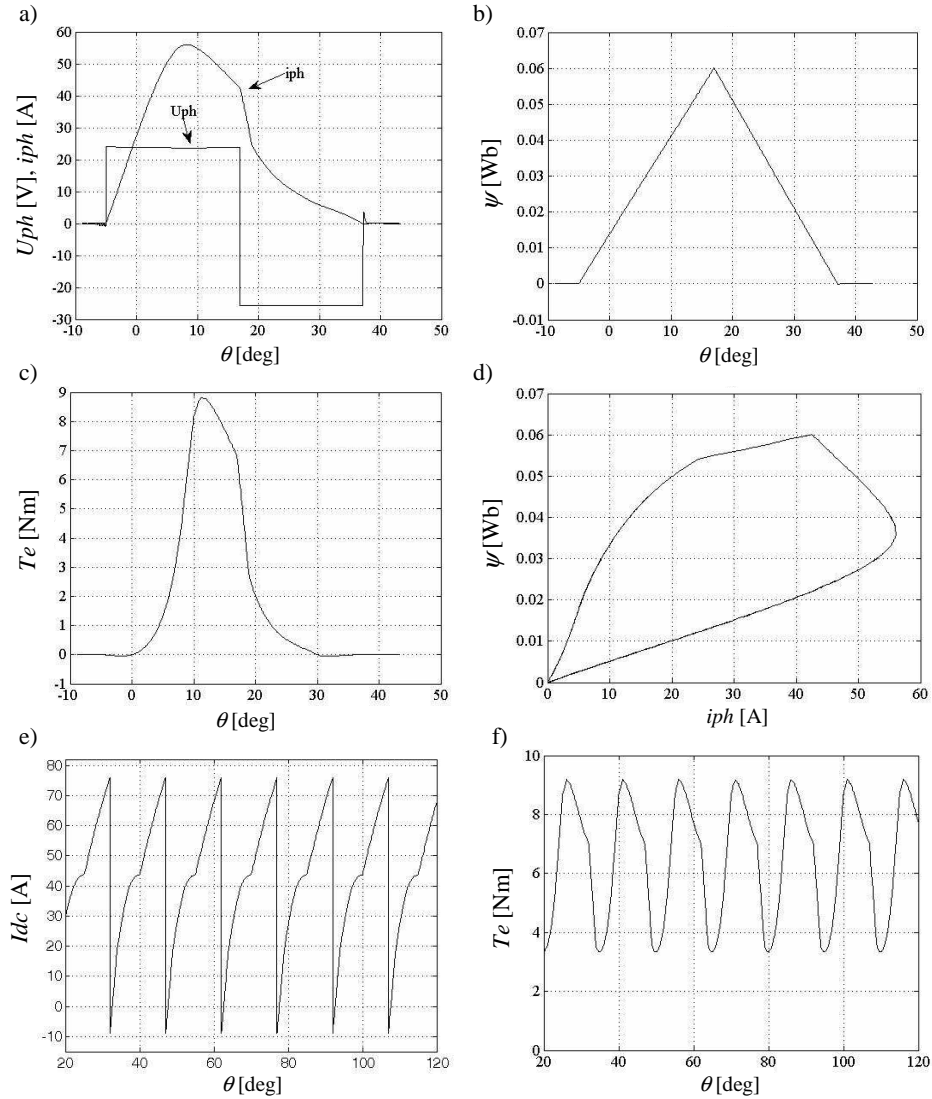


Rys. 6. Schemat systemu sterowania SRM dla stanu ustalonego pracy silnika

Parametrami zadawanymi w tym modelu są kąty sterujące  $\theta_{on}$  i  $\theta_{off}$  oraz prędkość kątowna wirnika  $\omega$ . Blok *Sterowanie* stanowi realizację sterowania jednopulsowego silnika SRM z możliwością wprowadzania stanu zerowego napięcia.

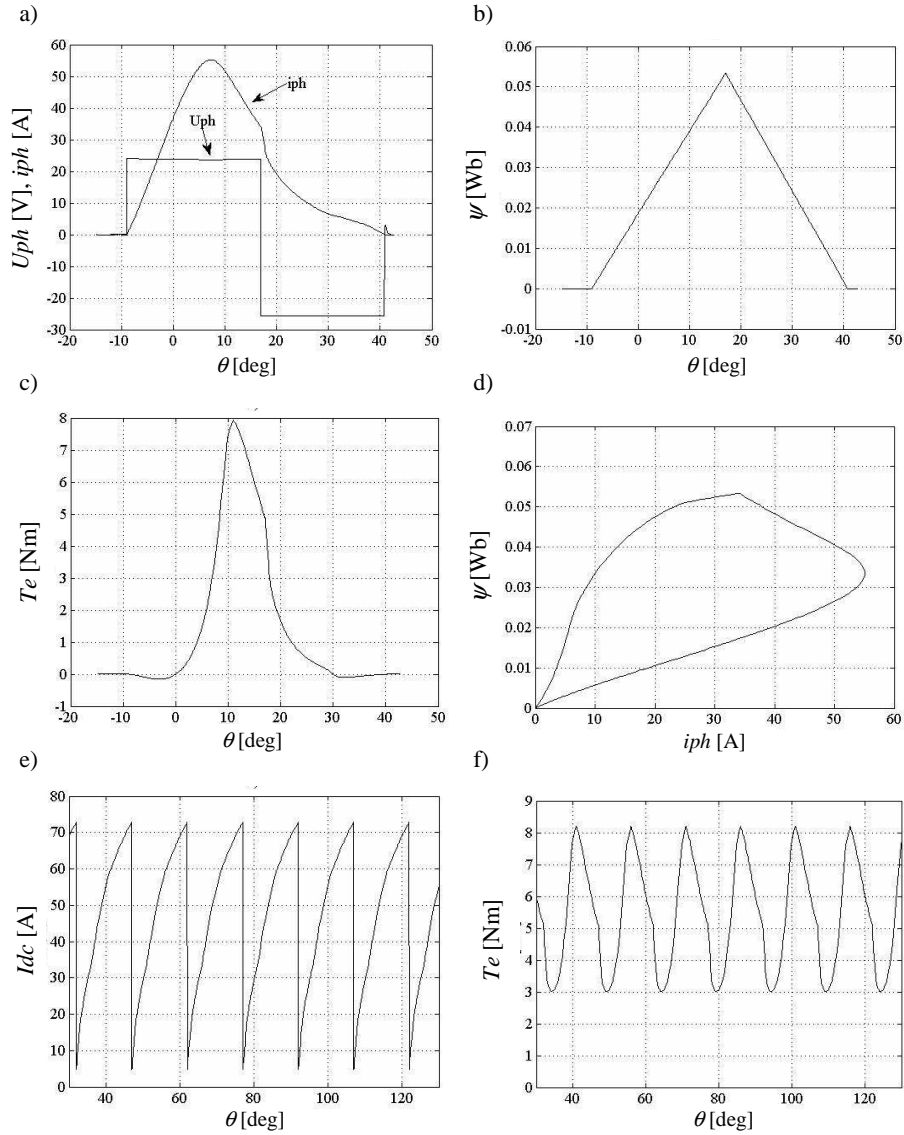
#### 4. Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono dla maszyny czteropasmowej SRM 8/6 dla pracy silnikowej w stanach statycznych przy sterowaniu jednopulsowym. Rysunki 7-9. przedstawiają wykresy prądu pasmowego  $i_{ph}$ , napięcia pasmowego  $U_{ph}$ , strumienia  $\psi$  w funkcji kąta obrotu wirnika  $\theta$ , momentu elektromagnetycznego  $T_e$  jednego pasma, strumienia sprzężonego  $\psi$  w funkcji prądu pasma  $i_{ph}$ , prądu pobieranego ze źródła zasilania  $I_{dc}$  oraz momentu elektromagnetycznego  $T_e$  silnika dla trzech różnych punktów pracy silnika z zachowaniem amplitudy prądu pasmowego na tym samym poziomie. Tę samą amplitudę prądu pasmowego uzyskano przez rozszerzanie przedziału przewodzenia z zachowaniem stałego kąta wyłączenia. Założono, że punkt  $0^\circ$  występuje w położeniu, gdzie indukcyjność uzwojenia pasma osiąga minimum.



Rys. 7. Wykresy dla pracy silnikowej przy sterowaniu jednopulsowym dla  $n = 1432$  obr/min przy  $\theta_{on} = -5^\circ$  i  $\theta_{off} = 17^\circ$

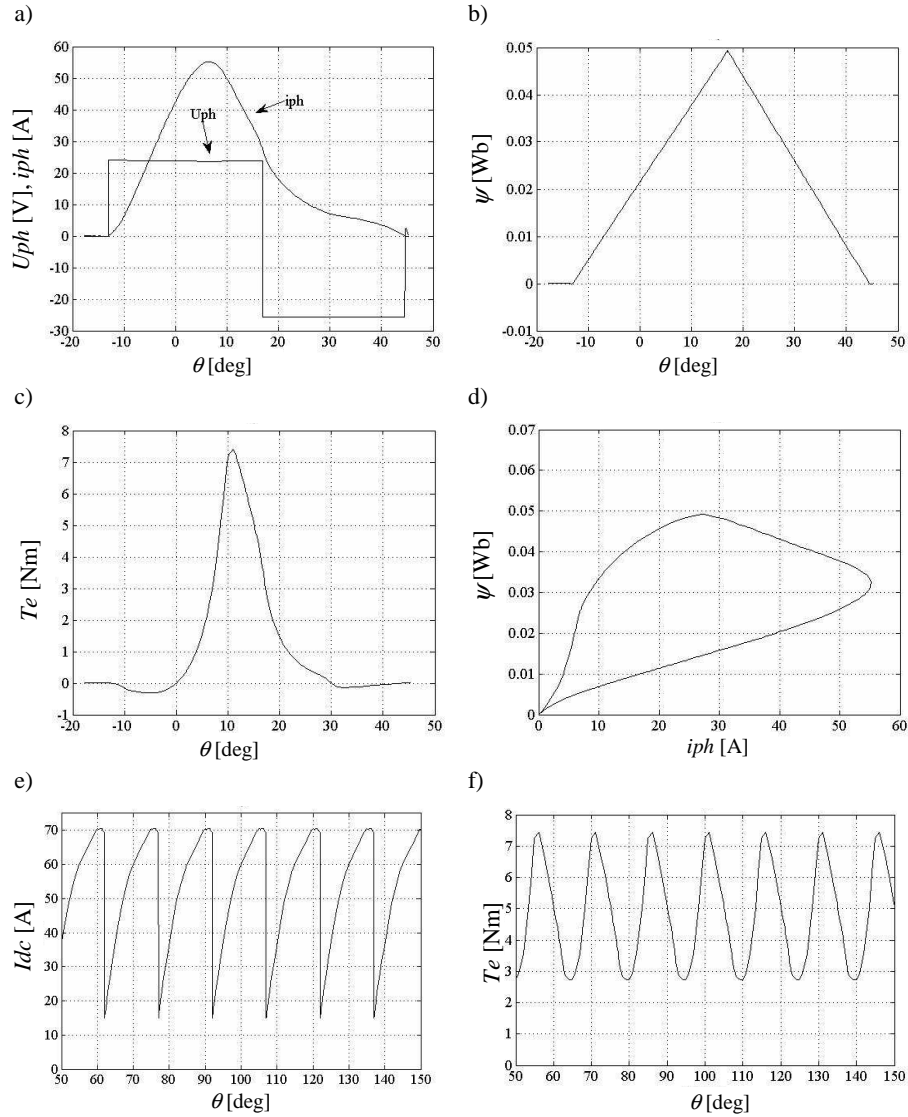
Wraz ze wzrostem prędkości zwiększa się również napięcie rotacji  $u_{rot}$ , które powyżej tzw. prędkości bazowej powoduje spadek wartości prądu pasmowego, ponieważ  $di/dt$  staje się ujemne (rys. 7a, 8a, 9a) [4]. Im większa prędkość, tym prąd pasma szybciej maleje, a co za tym idzie – moment elektromagnetyczny również szybciej maleje (rys. 7c, 8c, 9c).



Rys. 8. Wykresy dla pracy silnikowej przy sterowaniu jednopulsowym dla  $n = 1910$  obr/min przy  $\theta_{on} = -9^\circ$  i  $\theta_{off} = 17^\circ$

Na rysunkach 7e, 8e, 9e pokazano wykresy prądów pobieranych ze źródła zasilania, a na rys. 7f, 8f, 9f wykresy momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik. Widać wyraźnie, że wraz ze wzrostem prędkości maleje średnia wartość momentu elektromagnetycznego. W sterowaniu jednopul-



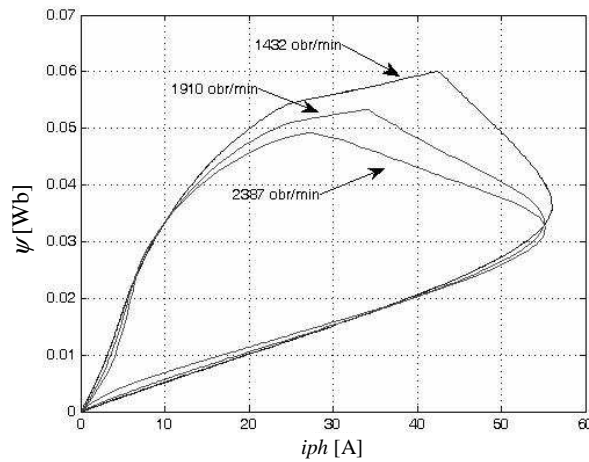


Rys. 9. Wykresy dla pracy silnikowej przy sterowaniu jednopulsowym dla  $n = 2387$  obr/min przy  $\theta_{on} = -13^\circ$  i  $\theta_{off} = 17^\circ$

sowym ma się do czynienia ze znacznymi pulsacjami momentu, które dla tego sposobu sterowania minimalizuje się przez odpowiedni dobór kątów załączenia  $\theta_{on}$  i wyłączenia  $\theta_{off}$ . Pulsacje momentu wpływają na zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu momentu elektromagnetycznego [5]. Jest to niekorzystne w takich układach napędowych, jak serwomechanizmy, pojazdy z napę-

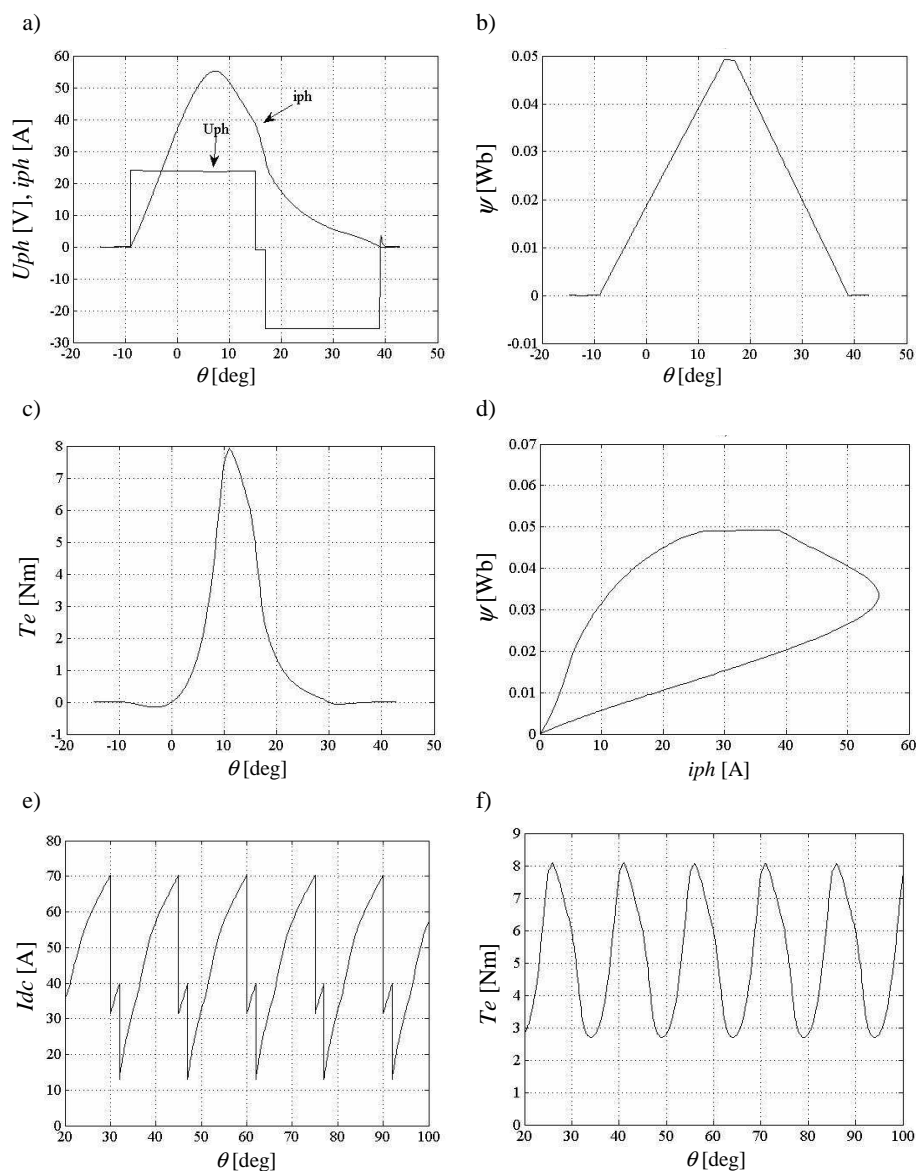
dem elektrycznym. Stosuje się wówczas bardziej skomplikowane metody sterowania pracą maszyny, których głównym celem jest minimalizacja pulsacji momentu elektromagnetycznego. Sterowanie jednopulsowe stosuje się w układach napędowych, które nie wymagają małych pulsacji momentu. Podczas pracy jednopulsowej silnik może pracować przy bardzo dużej prędkości obrotowej, kilkakrotnie przekraczającej prędkość bazową. Zakres zmian prędkości obrotowej jest bardzo duży, ale odbywa się kosztem wzrostu pulsacji momentu elektromagnetycznego.

Na rysunku 10. porównano wykresy strumienia sprzężonego  $\psi$  w funkcji prądu pasma  $i_{ph}$  dla trzech punktów pracy silnika. Pole obszaru wyznaczonego przez poszczególne krzywe jest proporcjonalne do średniego momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez jedno pasmo silnika [4]. Widać wyraźnie, że wraz ze wzrostem prędkości pola krzywych maleją, czyli moment również się zmniejsza. Takie same zmiany można także zaobserwować na rys. 7c, 8c, 9c.



Rys. 10. Wykresy strumienia sprzężonego  $\psi$  w funkcji prądu  $i_{ph}$  dla trzech prędkości wirnika

Modyfikacją sterowania jednopulsowego jest sterowanie jednopulsowe ze stanem zerowego napięcia. Stan zerowego napięcia jest zawarty na końcu przedziału zasilania, co umożliwia zmianę kształtu prądu, szczególnie przy większych prędkościach, kiedy nie ma możliwości sterowania prądowego [5]. Na rysunku 11. pokazano wykresy prądu pasmowego  $i_{ph}$ , napięcia pasmowego  $U_{ph}$ , strumienia  $\psi$  w funkcji kąta obrotu wirnika  $\theta$ , momentu elektromagnetycznego  $T_e$  jednego pasma, strumienia sprzężonego  $\psi$  w funkcji prądu pasma  $i_{ph}$ , prądu pobieranego ze źródła zasilania  $I_{dc}$  oraz momentu elektromagnetycznego  $T_e$  silnika dla prędkości  $n = 1910$  obr/min przy  $\theta_{on} = -9^\circ$  i  $\theta_{off} = 17^\circ$ .



Rys. 11. Wykresy dla pracy silnikowej przy sterowaniu jednopulsowym ze stanem zerowego napięcia dla  $n = 1910$  obr/min przy  $\theta_{on} = -9^\circ$  i  $\theta_{off} = 17^\circ$

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodykę budowy nieliniowego, statycznego modelu symulacyjnego maszyny reluktancyjnej przełączalnej 8/6. Przeprowadzono badania symulacyjne wpływu zmiany punktu pracy na przebieg momentu elek-

elektromagnetycznego przy sterowaniu jednopulsowym. Pokazano przebiegi prądu pasmowego, napięcia pasmowego, strumienia w funkcji kąta obrotu wirnika, momentu jednego pasma, prądu pobieranego ze źródła zasilania oraz momentu wypadkowego silnika z zachowaniem stałej amplitudy prądu pasmowego, którą uzyskiwano w wyniku rozszerzania przedziału przewodzenia tranzystorów, przy stałym kącie wyłączenia  $\theta_{off}$ . Wraz ze wzrostem prędkości napięcie rotacji  $u_{rot}$  zwiększało się, co prowadziło do coraz szybszego spadku wartości prądu pasmowego oraz zmniejszenia średniej wartości momentu elektromagnetycznego i zwiększenia jego pulsacji. Podczas sterowania jednopulsowego silnik może pracować z bardzo dużymi prędkościami, jednak ze względu na znaczne pulsacje wytwarzanego momentu może on pobudzać do drgań napędzane urządzenie, przyczyniając się do wytwarzania znaczącego hałasu. Modyfikacja sterowania jednopulsowego przez wprowadzenie stanu zerowego napięcia jest jednym ze sposobów na zmniejszenie szumu akustycznego generowanego przez silnik SRM [4]. Wprowadzenie stanu zerowego nie powoduje znaczących strat momentu elektromagnetycznego.

### Literatura

- [1] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: Praca prądnicowa maszyny reluktancyjnej przełączalnej w zakresie sterowania prądowego. XLI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Opole-Jarnołtówek, 14-17 czerwca 2005, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2005.
- [2] Prokop J.: Modele matematyczne wielopasmowych dwukanałowych maszyn reluktancyjnych przełączalnych. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), R. 88, nr 2/2012, s. 149-156.
- [3] Bogusz P.: Silnik reluktancyjny przełączalny sterowany z procesora sygnałowego, Warszawa 2003 (rozprawa doktorska).
- [4] Miller T.J.E.: Electronic control of switched reluctance machines. Newnes 2001.
- [5] Korkosz M.: Praca silnikowo-generatorowa przełączalnej maszyny reluktancyjnej (rozprawa doktorska). Gliwice 2003.

### SIMULATION MODEL OF SWITCHED RELUCTANCE MACHINE

#### Abstract

The paper presents a static nonlinear simulation model of the four-phase 8/6 switched reluctance machine in Matlab/Simulink. Simulation tests were performed for various working points of the machine with single-pulse control. An analysis of the influence of the working point change on electromagnetic torque was performed.

DOI: 10.7862/re.2012.4