

Jan Prokop
Politechnika Rzeszowska

MODELOWANIE DWUKANAŁOWEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZELĄCZALNEGO

MODELING OF DUAL-CHANNEL SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Streszczenie: W pracy przedstawiono nieliniowy model matematyczny trójfazowego dwukanałowego silnika reluktancyjnego przełączalnego (DCSRM) o konstrukcji 12/8. Zamieszczono wyniki obliczeń rozkładu pola magnetycznego oraz charakterystyk statycznych. Przedstawiono wyniki symulacji przebiegów prądów, strumieni i momentu dla pracy w trybie dwu i jedno kanałowym. Zamieszczono wnioski.

Abstract: The paper presents nonlinear mathematical model of the 3-phase 12/8 dual-channel switched reluctance motor (DCSRM). Results of field calculations and static characteristics are presented. Dynamic performance characteristics, such as phase currents, flux linkages, electromagnetic torque under operation in dual-channel and single-channel modes are presented. The conclusions are included.

Słowa kluczowe: Dwukanałowe Silniki Reluktancyjne Przełączalne, DCSRМ, modelowanie

Keywords: Dual Channel Switched Reluctance Motors, DCSRМ, modeling

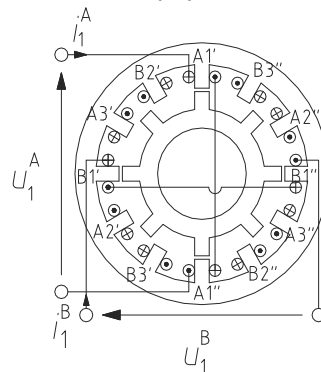
1. Wstęp

Napędy pomp paliwa w samolotach czy napędy samochodów elektrycznych jako, tzw. napędy krytyczne, muszą być odporne na uszkodzenia samego silnika, jak i układu zasilającego. Nowoczesnym rozwiązaniem wydaje się być próba zastosowania dwukanałowego silnika reluktancyjnego przełączalnego (ang. *Dual-Channel Switched Reluctance Motor* – DCSRМ) [1, 2, 3, 4, 5]. Silnik DCSRМ może pracować w, tzw. trybie zasilania dwukanałowego (ang. *dual-channel operation mode*), w czasie którego jednocześnie są zasilane odpowiednie pasma obu kanałów lub w trybie zasilania jednokanałowego (ang. *single-channel operation mode*) [1, 2, 3]. W stanie awaryjnym uszkodzenie uzwojenia pasma danego kanału lub układu zasilającego ten kanał powoduje, że silnik może pracować w trybie jednokanałowym, zapewniając ciągłość pracy napędu.

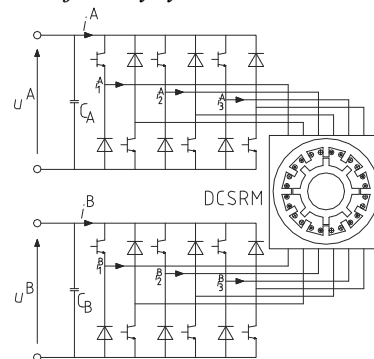
Celem pracy jest przedstawienie autorskiego modelu matematycznego oraz wyników badań symulacyjnych trójfazowego dwukanałowego silnika DCSRМ o konstrukcji 12/8 pracującego w trybie dwu lub jedno kanałowym [3].

Na rysunku 1 przedstawiono schemat przekroju poprzecznego omawianej maszyny DCSRМ, z zaznaczonym przykładowo jednym pasmem kanału A i kanału B, natomiast na rysunku 2 schemat układu zasilania tej maszyny. Przedstawiony w niniejszej pracy model

matematyczny uwzględnia nieliniowość obwodu magnetycznego oraz wzajemne sprzężenia pomiędzy uzwojeniami poszczególnych pasm danego kanału, jak i pomiędzy pasmami należącymi do dwóch różnych kanałów maszyny.



Rys. 1. Schemat przekroju dwukanałowej trójfazowej maszyny DCSRМ o budowie 12/8



Rys. 2. Schemat układu zasilania dwukanałowej trójfazowej maszyny DCSRМ o budowie 12/8

2. Model matematyczny maszyny DCSRМ

Rozważany jest nieliniowy model matematyczny maszyny DCSRМ, którego równania prądowo-napięciowe oraz wyrażenie na moment elektromagnetyczny T_e mają postać:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}^A \\ \mathbf{u}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}^A \\ \mathbf{i}^B \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \Psi^A(\theta, \mathbf{i}^A, \mathbf{i}^B) \\ \Psi^B(\theta, \mathbf{i}^A, \mathbf{i}^B) \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{\partial W_c^*(\theta, \mathbf{i}^A, \mathbf{i}^B)}{\partial \theta} \quad (2)$$

gdzie $W_c^*(\theta, \mathbf{i}^A, \mathbf{i}^B)$ jest całkowitą koenergią pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Zakłada się, że strumienie poszczególnych pasm dla obu kanałów A i B w równaniu (1) są sumą strumieni zależnych od kąta położenia wirnika i tylko jednego prądu pasma danego kanału, według definicji [3]:

$$\Psi^A(\theta, \mathbf{i}^A, \mathbf{i}^B) = \Psi^{AA}(\theta, \mathbf{i}^A) + \Psi^{AB}(\theta, \mathbf{i}^B) \quad (3)$$

$$\Psi^B(\theta, \mathbf{i}^A, \mathbf{i}^B) = \Psi^{BA}(\theta, \mathbf{i}^A) + \Psi^{BB}(\theta, \mathbf{i}^B) \quad (4)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \Psi^{AA}(\theta, \mathbf{i}^A) &= \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^3 \Psi_{1j}^{AA}(\theta, i_j^A) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{2j}^{AA}(\theta, i_j^A) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{3j}^{AA}(\theta, i_j^A) \end{bmatrix} & \Psi^{AB}(\theta, \mathbf{i}^B) &= \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^3 \Psi_{1j}^{AB}(\theta, i_j^B) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{2j}^{AB}(\theta, i_j^B) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{3j}^{AB}(\theta, i_j^B) \end{bmatrix} \\ \Psi^{BA}(\theta, \mathbf{i}^A) &= \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^3 \Psi_{1j}^{BA}(\theta, i_j^A) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{2j}^{BA}(\theta, i_j^A) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{3j}^{BA}(\theta, i_j^A) \end{bmatrix} & \Psi^{BB}(\theta, \mathbf{i}^B) &= \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^3 \Psi_{1j}^{BB}(\theta, i_j^B) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{2j}^{BB}(\theta, i_j^B) \\ \sum_{j=1}^3 \Psi_{3j}^{BB}(\theta, i_j^B) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Pozostałe w równaniu (1) wektory napięć \mathbf{u} , prądów \mathbf{i} oraz macierze rezystancji \mathbf{R} dla obu kanałów A i B są zdefiniowane:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^A &= [u_1^A, u_2^A, u_3^A]^T, & \mathbf{u}^B &= [u_1^B, u_2^B, u_3^B]^T \\ \mathbf{i}^A &= [i_1^A, i_2^A, i_3^A]^T, & \mathbf{i}^B &= [i_1^B, i_2^B, i_3^B]^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{R}^A = \text{diag}(R_1^A, R_2^A, R_3^A)$$

$$\mathbf{R}^B = \text{diag}(R_1^B, R_2^B, R_3^B)$$

Wyrażenie (2) na moment T_e trójfazowej maszyny DCSRМ przy założeniach (3) i (4) można zapisać w postaci [3]:

$$\begin{aligned} T_e(\theta, i_1^A, i_2^A, i_3^A, i_1^B, i_2^B, i_3^B) &= \\ &= \sum_{k=1}^3 \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_k^A} \Psi_{kk}^{AA}(\theta, \bar{i}_k^A) d\bar{i}_k^A + \\ &+ \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_j^A} \Psi_{ij}^{AA}(\theta, \bar{i}_j^A) d\bar{i}_j^A + \\ &+ \sum_{k=1}^3 \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_k^B} \Psi_{kk}^{BB}(\theta, \bar{i}_k^B) d\bar{i}_k^B + \\ &+ \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_j^B} \Psi_{kk}^{BB}(\theta, \bar{i}_j^B) d\bar{i}_j^B + \\ &+ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_j^B} \Psi_{ij}^{BA}(\theta, \bar{i}_j^B) d\bar{i}_j^B \end{aligned} \quad (5)$$

lub krócej:

$$\begin{aligned} T_e(\theta, i_1^A, i_2^A, i_3^A, i_1^B, i_2^B, i_3^B) &= \\ &= T_{\text{phase}}^A(\theta, i_1^A, i_2^A, i_3^A) + T_{\text{mutual}}^A(\theta, i_1^A, i_2^A, i_3^A) + \\ &+ T_{\text{phase}}^B(\theta, i_1^B, i_2^B, i_3^B) + T_{\text{mutual}}^B(\theta, i_1^B, i_2^B, i_3^B) + \\ &+ T_{\text{mutual}}^{BA}(\theta, i_1^A, i_2^A, i_3^A, i_1^B, i_2^B, i_3^B) \end{aligned} \quad (6)$$

Poszczególne składniki prawej strony wyrażenia (6) na wypadkowy moment T_e reprezentują odpowiednio składowe momenty od prądów pasmowych $T_{\text{phase}}^A, T_{\text{phase}}^B$ i sprzężeń $T_{\text{mutual}}^A, T_{\text{mutual}}^B$ w obrębie kanału A i B oraz moment pochodzący od strumieni sprzężeń pomiędzy kanałami T_{mutual}^{BA} . W przypadku pracy jednokanałowej wyrażenie na moment upraszcza się do dwóch pierwszych składników prawej strony równania (5).

Na potrzeby budowy modelu symulacyjnego wektory strumieni Ψ^{AA} i Ψ^{BB} z zależności (3) i (4) można rozdzielić według definicji:

$$\Psi^{AA}(\theta, \mathbf{i}^A) = \Psi_{\text{phase}}^{AA}(\theta, \mathbf{i}^A) + \Psi_{\text{mutual}}^{AA}(\theta, \mathbf{i}^A) \quad (7)$$

$$\Psi^{BB}(\theta, \mathbf{i}^B) = \Psi_{\text{phase}}^{BB}(\theta, \mathbf{i}^B) + \Psi_{\text{mutual}}^{BB}(\theta, \mathbf{i}^B) \quad (8)$$

gdzie poszczególne składniki reprezentują odpowiednio, w obrębie danego kanału A i B, strumienie własne (indeks *phase*) oraz

strumienie sprzężenia wzajemnego pomiędzy pasmami (indeks *mutual*) według zależności:

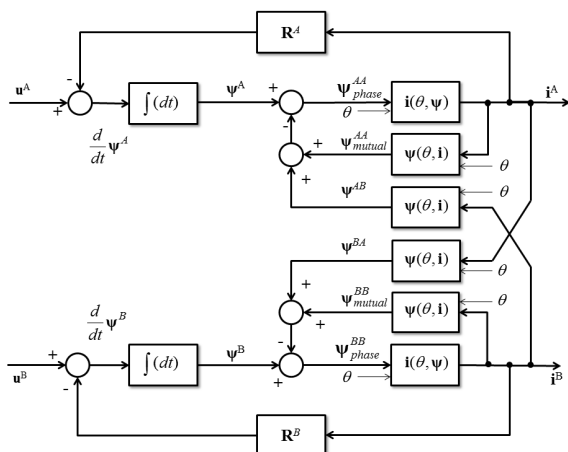
$$\Psi_{phase}^{AA}(\theta, \mathbf{i}^A) = \begin{bmatrix} \psi_{11}^{AA}(\theta, i_1^A) \\ \psi_{22}^{AA}(\theta, i_2^A) \\ \psi_{33}^{AA}(\theta, i_3^A) \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{mutual}^{AA}(\theta, \mathbf{i}^A) = \begin{bmatrix} \psi_{12}^{AA}(\theta, i_2^A) + \psi_{13}^{AA}(\theta, i_3^A) \\ \psi_{21}^{AA}(\theta, i_1^A) + \psi_{23}^{AA}(\theta, i_3^A) \\ \psi_{31}^{AA}(\theta, i_1^A) + \psi_{32}^{AA}(\theta, i_2^A) \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{phase}^{BB}(\theta, \mathbf{i}^B) = \begin{bmatrix} \psi_{11}^{BB}(\theta, i_1^B) \\ \psi_{22}^{BB}(\theta, i_2^B) \\ \psi_{33}^{BB}(\theta, i_3^B) \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{mutual}^{BB}(\theta, \mathbf{i}^B) = \begin{bmatrix} \psi_{12}^{BB}(\theta, i_2^B) + \psi_{13}^{BB}(\theta, i_3^B) \\ \psi_{21}^{BB}(\theta, i_1^B) + \psi_{23}^{BB}(\theta, i_3^B) \\ \psi_{31}^{BB}(\theta, i_1^B) + \psi_{32}^{BB}(\theta, i_2^B) \end{bmatrix}$$

Na rysunku 3 przedstawiono schemat struktury modelu symulacyjnego równań napięciowo-prądowych (3) dwukanałowego silnika DCSRМ uwzględniającego wzajemne sprzężenia pomiędzy pasmami danego kanału (A lub B), jak i pomiędzy pasmami różnych kanałów.



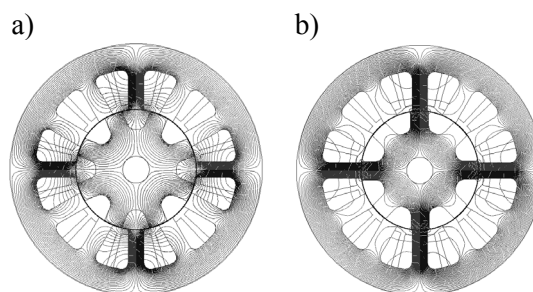
Rys.3. Schemat modelu symulacyjnego równań napięciowo-prądowych maszyny

Zależności strumieni od kąta obrotu wirnika i prądu danego pasma występujące w (1) oraz w wyrażeniu na moment (5) obliczane są najczęściej na drodze obliczeń polowych i opisywane za pomocą różnych technik, np. analitycznie szeregami zmiennej θ , o współczynnikach zależnych od prądu, tabelarycznie (ang. *Look-Up Table*) lub opisywane sieciami neuronowymi (ang. *Artificial Neural Network – ANN*).

3. Analiza charakterystyk statycznych

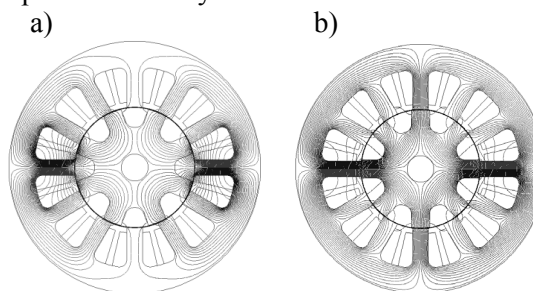
3.1. Rozkład pola magnetycznego

Badania symulacyjne rozkładu pola magnetycznego metodą elementów skończonych prowadzono w przestrzeni 2D dla trójpasowego dwukanałowego silnika DCSRМ o konfiguracji 12/8 [4]. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe rozkłady linii strumienia magnetycznego dla pracy dwukanałowej przy założeniu, że zasilane są tylko pierwsze pasma obu kanałów A i B, w których płynie stały prąd $i_1^A = i_1^B = 10A$ dla dwóch kątów położenia wirnika, tj. $\theta = 0$ (rys.4a), $\theta = \pi/4$ (rys.4b).



Rys.4. Rozkłady strumieni dla $i_1^A = 10A$, $i_1^B = 10A$ oraz $\theta = 0$ (a), $\theta = \pi/4$ (b)

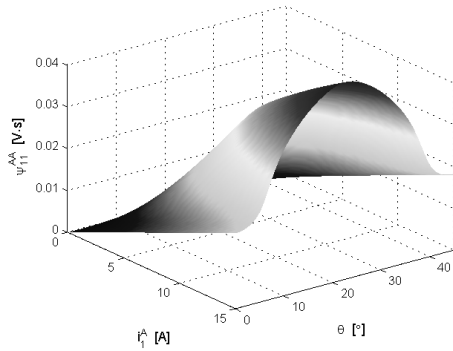
Przykładowe rozkłady linii strumienia dla pracy jednokanałowej, tj. przy założeniu, że tylko pierwsze pasmo kanału A jest zasilane stałym prądem $i_1^A = 10A$, $i_1^B = 0A$, odpowiednio dla kątów $\theta = 0$, oraz $\theta = \pi/4$, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5a i 5b.



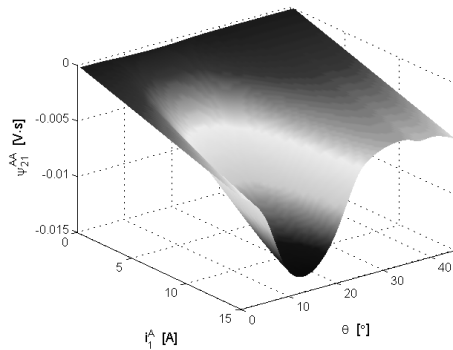
Rys.5. Rozkłady strumieni dla $i_1^A = 10A$, $i_1^B = 0A$ oraz: $\theta = 0$ (a), $\theta = \pi/4$ (b)

3.2. Charakterystyki statyczne strumieniowe

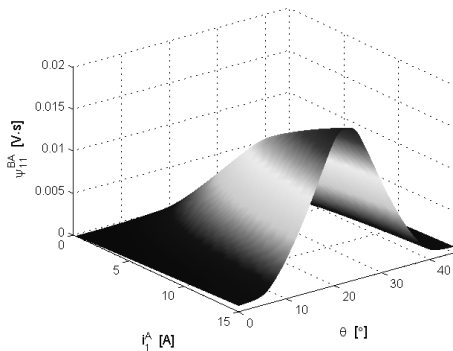
Na podstawie obliczeń polowych wyznaczano, dla poszczególnych pasm obu kanałów A i B, zależności strumieni własnych i wzajemnych w funkcji prądu i kąta obrotu wirnika. Na rysunkach 6 – 9 przedstawiono wyniki obliczeń omawianych charakterystyk strumieniowych [4].



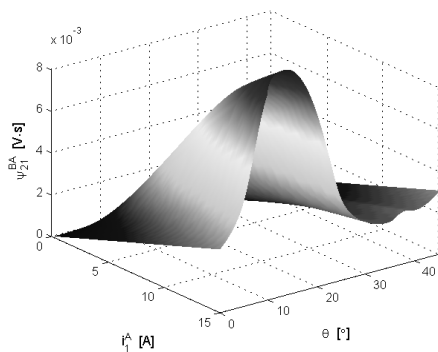
Rys.6. Charakterystyka prądowo-kątowa strumienia ψ_{11}^{AA}



Rys.7. Charakterystyka prądowo-kątowa strumienia ψ_{21}^{AA}



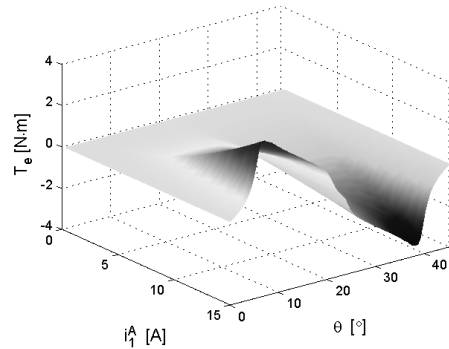
Rys.8. Charakterystyka prądowo-kątowa strumienia ψ_{11}^{BA}



Rys.9. Charakterystyka prądowo-kątowa strumienia ψ_{21}^{BA}

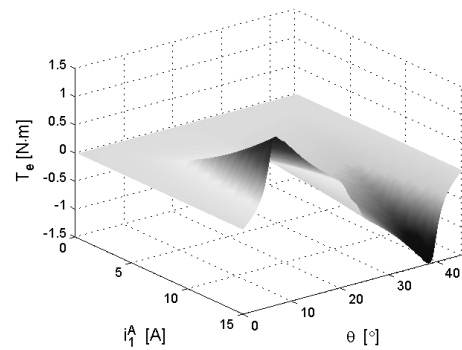
3.3. Charakterystyki statyczne momentowe

Na rysunku 10 przedstawiono zależność wypadkowego momentu elektromagnetycznego silnika T_e w funkcji prądu i_1^A pierwszego pasma kanału A oraz kąta obrotu wirnika θ , dla pracy dwukanałowej, przy założeniu, że w obu pasmach kanałów A i B płyną takie same prądy ($i_1^A = i_1^B$). Moment maksymalny $T_{\text{emax}}=3.5$ N·m.



Rys.10. Zależność momentu T_e od prądu i_1^A oraz kąta θ dla pracy dwukanałowej

Rysunek 11 przedstawia zależność obliczonego momentu elektromagnetycznego T_e silnika DCSRМ w funkcji prądu i_1^A pierwszego pasma kanału A oraz kąta obrotu wirnika θ dla pracy jednokanałowej. Moment maksymalny dla tego przypadku $T_{\text{emax}}=1.5$ N·m.



Rys.11. Zależność momentu T_e od prądu i_1^A oraz kąta θ dla pracy jednokanałowej

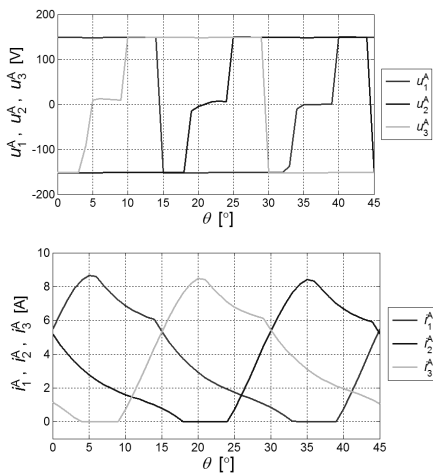
Z porównania wartości momentów z rysunków 10 i 11 można stwierdzić, że wypadkowy statyczny moment elektromagnetyczny silnika, w trybie pracy dwukanałowej dla takich samych wartości prądów pasm obu kanałów, jest przeszło dwukrotnie większy niż w trybie pracy jednokanałowej i nie może być obliczany przez proste sumowanie tylko dwóch momentów pochodzących od prądów pasm poszczególnych kanałów.

4. Analiza przebiegów prądów i momentu silnika DCSRМ

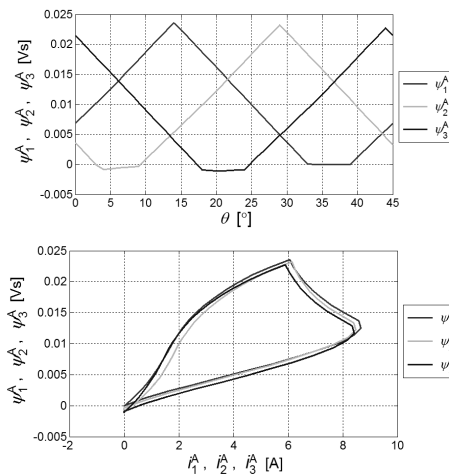
Badania symulacyjne przebiegów przeprowadzono dla maszyny zasilanej w trybie pracy dwukanałowej oraz jednokanałowej.

4.1. Praca dwukanałowa

Na rysunku 12 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji zależności napięć i prądów poszczególnych pasm kanału A, w funkcji kąta obrotu wirnika dla pracy dwukanałowej. Zależności strumieni pasm kanału A, w funkcji kąta obrotu wirnika oraz w funkcji prądu danego pasma przedstawiono na rysunku 13.

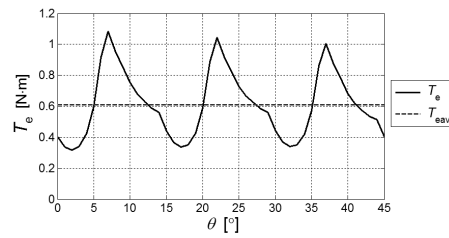


Rys.12. Zależności napięć oraz prądów pasm kanału A w funkcji kąta obrotu wirnika - praca dwukanałowa



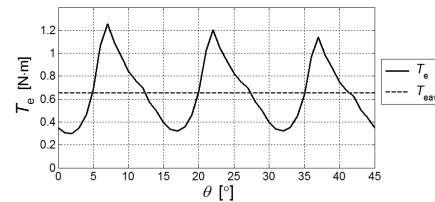
Rys.13. Zależności strumieni pasm kanału A w funkcji kąta obrotu wirnika oraz w funkcji prądu danego pasma - praca dwukanałowa

Na rysunku 14 pokazano zależność wypadkowego momentu elektromagnetycznego silnika od kąta obrotu wirnika θ dla pracy dwukanałowej (linia ciągła). Linia przerywaną zaznaczono wartość średnią momentu.



Rys.14. Zależność momentu w funkcji kąta obrotu wirnika - praca dwukanałowa

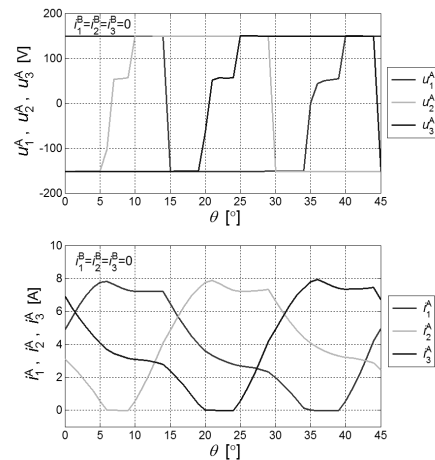
Zależność wypadkowego momentu w funkcji kąta obrotu wirnika dla pracy dwukanałowej, przy sterowaniu niesymetrycznym silnika, dla różnych kątów załączenia obu kanałów $\theta_{on}^A = -5^\circ$, $\theta_{on}^B = -7^\circ$, przedstawiono na rysunku 15.



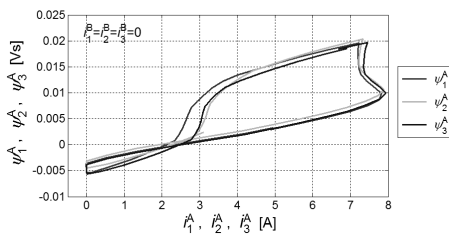
Rys.15. Zależność momentu w funkcji kąta obrotu wirnika dla kątów załączenia $\theta_{on}^A = -5^\circ$, $\theta_{on}^B = -7^\circ$ - praca dwukanałowa

4.2. Praca jednokanałowa

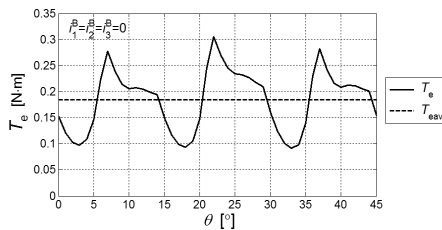
Zależności napięć i prądów w funkcji kąta obrotu wirnika θ oraz strumieni w funkcji prądu danego pasma dla pracy jednokanałowej przedstawiono odpowiednio na rysunkach 16 i 17. Na rysunku 18 zamieszczono przebieg wypadkowego momentu silnika w funkcji kąta obrotu θ , przy czym linią przerywaną zaznaczono wartość średnią momentu.



Rys.16. Zależności napięć oraz prądów pasm kanału A w funkcji kąta obrotu wirnika - praca jednokanałowa



Rys. 17. Zależności strumieni pasm kanału A w funkcji prądów pasma - praca jednokanałowa



Rys. 18. Zależność momentu kanału A w funkcji kąta obrotu wirnika - praca jednokanałowa

Na rysunku 16 należy szczególną uwagę zwrócić na kształty napięć poszczególnych pasm, które to napięcia w określonych przedziałach, ze względu na sprzęganie się uzwojeń nie zanikają do zera. Wartość średnia momentu T_{eav} z rysunku 18 jest około trzy razy mniejsza, niż w przypadku pracy dwukanałowej (rys. 14).

5. Wnioski

W pracy przedstawiono model matematyczny trójpasmowej dwukanałowej maszyny DCSRМ o konstrukcji 12/8. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- W silniku DCSRМ o konstrukcji 12/8, pomimo pełnej symetrii budowy elektrycznej i magnetycznej silnika, dla symetrycznego zasilania i sterowania obu kanałów, na skutek różnych dróg rozprzysięcia strumienia magnetycznego, wypadkowy kształt momentu elektromagnetycznego wykazuje pewne cechy niesymetryczności, co jest przyczyną dodatkowych pulsacji momentu w porównaniu ze zwykłym silnikiem SRМ.
- W trybie pracy dwukanałowej wypadkowy moment silnika nie może być obliczany przez proste sumowanie dwóch momentów pochodzących od prądów pasm obu kanałów, należy uwzględnić moment pochodzący od strumieni sprzężeń pomiędzy kanałami.
- Analiza pracy silnika DCSRМ w warunkach niesymetrii zasilania czy sterowania obu kanałów, w stanach awaryjnych, a także przy pracy jednokanałowej wymaga stosowania

modeli uwzględniających wszystkie sprzężenia pomiędzy poszczególnymi pasmami zarówno w obrębie tego samego kanału, jak i pomiędzy kanałami.

Badania laboratoryjne silnika DCSRМ w pełni potwierdzają słuszność wyciągniętych wniosków [5].

6. Literatura

- [1] Ding W.; Liang D.: *Comparison of transient and steady-state performances analysis for a dual-channel switched reluctance machine operation under different modes*, Electric Power Applications, IET, Volume: 4, Issue: 8, 2010, p. 603 - 617
- [2] Ding W, Liang D, Sui H.: *Dynamic Modeling and Performance Prediction for Dual-Channel Switched Reluctance Machine Considering Mutual Coupling*, IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 46, Issue: 9, 2010, p. 3652 - 3663
- [3] Prokop J.: *Modele matematyczne wielopasmowych dwukanałowych maszyn reluktancyjnych przelączalnych*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 2012, str. 149 - 156
- [4] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Analiza charakterystyk statycznych dwukanałowego silnika reluktancyjnego przelączalnego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7a, 2012, str. 206-213
- [5] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Analiza wpływu sprzężeń międzypasmowych na właściwości dwukanałowego silnika reluktancyjnego przelączalnego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 8/2012, str. 309-316

Autor

dr inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska, ul. Powstańców
Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Wydział
Elektrotechniki i Informatyki

Informacje dodatkowe

Badania przeprowadzono z zastosowaniem 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.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn