

Model i bilans mocy czynnej przełączalnego silnika reluktancyjnego

Streszczenie. Parametrem modelu symulacyjnego przełączalnego silnika reluktancyjnego decydującym o jego działaniu jest indukcyjność zależna od kąta obrotu. Duży wpływ na pracę silnika ma również rezystancja stojana. Przeprowadzono identyfikację parametrów tego silnika w funkcji kąta obrotu wirnika zasilając uzwojenia napięciem przemiennym 50Hz. Na podstawie zidentyfikowanych parametrów opracowano model silnika wraz z układem sterowania w systemie Matlab - Simulink. W modelu uwzględniono nieliniowość parametrów oraz nieholonomiczność przełączalnego silnika reluktancyjnego. Dla otrzymanego modelu silnika przedstawiono bilans mocy czynnej. Zaprezentowano charakterystyczne przebiegi w stanie przejściowym i stanie ustalonym modelowanego silnika.

Abstract. The inductance of switched reluctance motor depends on the rotation angle is a parameter which decide about functioning of the motor. The significance effect on the operation of the engine has also the stator resistance. The identification of the parameters of the engine a function of the angle of rotation of the rotor was carried out for the winding supplying alternating current 50Hz. Based on the identified parameters of the engine model the engine and the control system were simulated in the Matlab – Simulink system. The model takes into account the parameters nonlinearity and nonholonomy of switched reluctance motor. For the engine model is presented the active power balance. The waveforms of the transient state and steady-state of modeled engine are presented. (**Modeling of switched reluctance motor and its active power balance**).

Słowa kluczowe: przełączalny silnik reluktancyjny, modelowanie, rezystancja, bilans mocy.

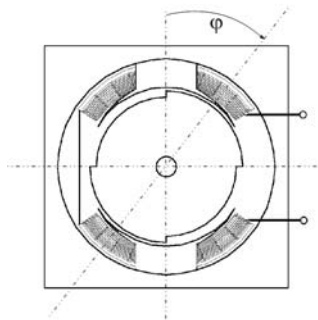
Keywords: switched reluctance motor, modeling, resistance, power balance.

doi:10.12915/pe.2014.02.55

Wstęp

W ostatnich latach wiele publikacji poświęconych jest przełączalnym silnikom reluktancyjnym (SRM) [1, 2, 3]. W przeciwieństwie do silników prądu stałego i zmiennego, silniki te nie posiadają uzwojeń na wirniku, co powoduje, że projektowanie silnika wydaje się zadaniem łatwiejszym, a zastosowanie go w napędach - atrakcyjnym [2]. Silniki te charakteryzuje wewnętrzna prostota, wytrzymała konstrukcja, szeroki zakres prędkości, odporność na uszkodzenia oraz mała bezwładność wirnika. Przyczynia się to do wykorzystywania silników reluktancyjnych w wielu aplikacjach. Silniki te nagrzewają się w mniejszym stopniu niż indukcyjne i mogą być stosowane z powodzeniem w trudnych warunkach eksploatacyjnych, takich jak przemysł lotniczy czy samochodowy.

Silniki reluktancyjne posiadają także wady. Podstawową wadą są tętnienia momentu obrotowego, które wynikają z zasady działania, sterowania i niesymetrycznej struktury magnetycznej wirnika tego silnika. Tętnienia te przyczyniają się do mechanicznego zużycia łożysk oraz hałasu. Wpływ tych zjawisk może być zmniejszony poprzez dobór geometrii silnika i użycie odpowiedniej metody sterowania [3]. Analizę i modelowanie silnika reluktancyjnego utrudnia nieliniowość parametrów spowodowana przez asymetrię magnetyczną [2]. Dlatego do analizy efektywności energetycznej układu elektromechanicznego wybrano silnik reluktancyjny o jednej parze biegunów stojana i wirnika – rysunek 1.



Rys.1. Przekrój poprzeczny analizowanego silnika

Silnik ten startuje tylko przy pewnych kątach wirnika, co stanowi jego wadę, ale obwód elektryczny opisany jest tylko jednym równaniem. Upraszcza to modelowanie i analizę,

oraz ułatwia weryfikację doświadczalną modelu matematycznego.

Model matematyczny silnika reluktancyjnego

Modele matematyczne silników elektrycznych składają się z równań opisujących obwody elektryczne oraz układ mechaniczny. Równanie mechaniczne zapisywane jest postaci (1) [4, 5]:

$$(1) \quad J \frac{d\omega}{dt} + k\omega + T_L = T_e$$

gdzie: J - moment bezwładności, k - współczynnik tarcia, T_L - moment obciążenia, T_e - moment elektromagnetyczny, który określony jest jako [4, 5]:

$$(2) \quad T_e = \frac{1}{2} \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} i^2$$

gdzie: i - wartość prądu, $dL(\varphi)/d\varphi$ - pochodna indukcyjności względem kąta obrotu wirnika.

Mnożąc równanie (1) przez prędkość kątową, otrzymuje się równanie bilansu mocy:

$$(3) \quad \frac{1}{2} J \frac{d\omega^2}{dt} + k\omega^2 + T_L \omega = \frac{1}{2} \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} \omega i^2$$

Składnik z prawej strony równania (3) reprezentuje natężenie energii przekazywanej z układu elektrycznego. Spotykane w literaturze [6, 7] równanie elektryczne ma postać:

$$(4) \quad L(\varphi) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} \omega + R_s i = U_s$$

gdzie: R_s - rezystancja uzwojenia, L - indukcyjność uzwojenia, φ - kąt obrotu.

Mnożąc równanie (4) przez prąd i oraz zamieniając prawą i lewą stronę otrzymuje się równanie bilansu mocy:

$$(5) \quad U_s i = L(\varphi) \frac{di}{dt} i + \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} \omega i^2 + R_s i^2$$

Pierwszy ze składników określa natężenie zmiany energii magnetycznej kumulowanej w indukcyjności silnika, drugi zaś oznacza natężenie energii przekazywanej do układu mechanicznego. Należy zauważyć, że natężenie energii przekazywanej do układu mechanicznego w równaniu (5) jest inne niż natężenie energii przekazywanej z układu elektrycznego w równaniu (3). W [8, 9, 10] bilans mocy obwodu silnika reluktancyjnego (5) przedstawiano jako sumę mocy cieplnej, zmian energii magnetycznej oraz mocy przekazywanej do układu mechanicznego:

$$(6) \quad U_s i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\varphi} \omega$$

Szybkość zmian gromadzonej energii magnetycznej opisana jest w postaci:

$$(7) \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) = L \frac{di}{dt} i + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\varphi} \omega = \frac{1}{2} L \frac{di^2}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\varphi} \omega$$

Należy zwrócić uwagę, że zmagazynowaną energię w cewce opisuje składnik w postaci: $\frac{1}{2} L di^2/dt$. W stanie ustalonym, przy sterowaniu impulsowym jest on zerowy. Natomiast pozostały składnik mocy $\frac{1}{2} i^2 (dL/d\varphi) \omega$ jest takiej samej postaci jak moc dostarczana do układu mechanicznego i powodowałby w stanie ustalonym ciągły przyrost energii magnetycznej kumulowanej.

W [11] udowodniono, że silnik reluktancyjny jest układem nieholonomicznym i część elektryczna opisywana jest równaniem w postaci (8), w którym przy pochodnej indukcyjności w funkcji kąta występuje współczynnik $\frac{1}{2}$.

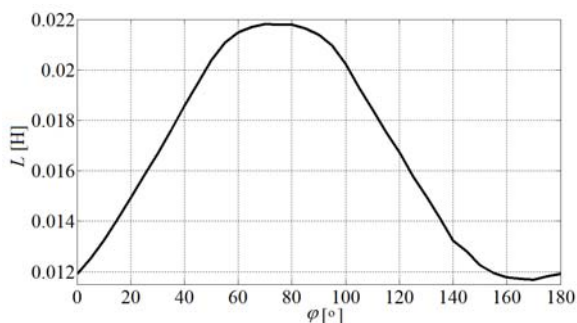
$$(8) \quad L(\varphi) \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} i \omega + R_s i = U_s$$

Dla przełączalnego silnika reluktancyjnego jako układu nieholonomicznego przeprowadzono identyfikację parametrów oraz utworzono model w Simulinku.

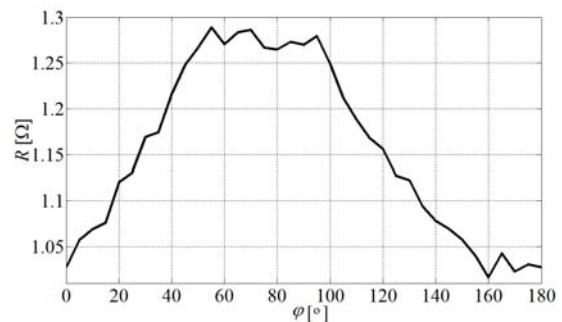
Identyfikacja parametrów

Do identyfikacji parametrów zbudowano stanowisko badawcze zawierające wspomniany silnik reluktancyjny, którego stojan ma jedną parę biegunów, a wirnik posiada jedną parę zębów – rysunek 1.

Dla sprawdzenia, jak zmienia się indukcyjność i rezystancja stojana w zależności od kąta obrotu wirnika jednofazowego silnika reluktancyjnego przeprowadzono identyfikację tych parametrów w funkcji kąta obrotu wirnika zasilając uzwojenia napięciem przemiennym 50Hz. Mierząc co 5 stopni prąd i napięcie na uzwojeniu silnika oraz określając pochodną prądu po czasie, wyznaczono charakterystykę indukcyjności w funkcji kąta - rysunek 2 oraz charakterystykę rezystancji w funkcji kąta obrotu – rysunek 3. Ze względu na symetrię silnika badania układu zrealizowano dla kąta obrotu w zakresie 180 stopni.



Rys.2. Zależność indukcyjności w funkcji kąta obrotu



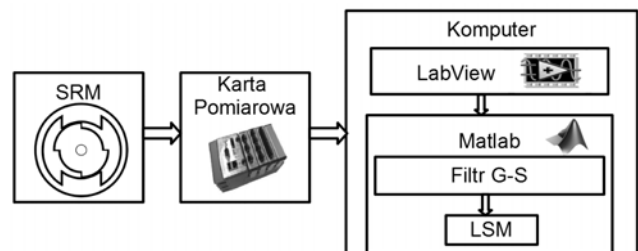
Rys.3. Zależność rezystancji w funkcji kąta obrotu

Wyznaczono średnią wartość pochodnej indukcyjności względem kąta dla narastającej części liniowej charakterystyki, na rysunku 2, między 20° a 75°. Wynosi ona:

$$(9) \quad \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} \cong 0,0395 \frac{\text{H}}{\text{rad}}$$

Zmiana indukcyjności względem kąta obrotu wynika ze zmieniającej się reluktancji i wiąże się ze zmianą indukcji magnetycznej w rdzeniu magnetycznym. Strumień magnetyczny jest tym większy im większy jest kąt szczeliny między biegunem stojana i zębem wirnika. W podobny sposób zależność będzie zastępcza rezystancja silnika reluktancyjnego, wynikająca z prądów płynących poprzez zmieniające się prądy płynące w rdzeniach magnetycznych stojana i wirnika. Na podstawie rysunku 3 można stwierdzić, że rezystancja stojana zmienia swoją wartość wraz z kątem obrotu, podobnie jak indukcyjność i przyjmowanie jej jako wartości stałej jest pewnym uproszczeniem.

Sposób postępowania w celu wyznaczenia parametrów układu został przedstawiony na rysunku 4.



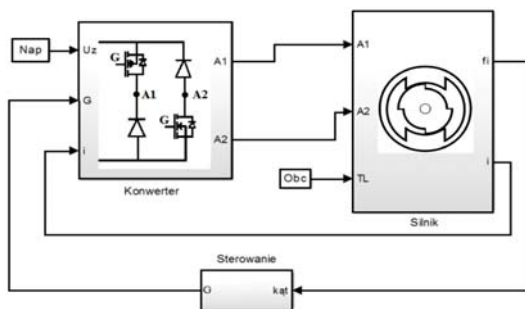
Rys.4. Schemat postępowania w celu wyznaczenia parametrów silnika reluktancyjnego

Z przełączalnego silnika reluktancyjnego odczytywane są równolegle wartości napięcia, prądu i kąta obrotu za pomocą kart pomiarowych NI 9225 i NI 6216 firmy National Instruments. Karty obsługiwane są przez program LabView zainstalowany na komputerze, na którym dane zapisywane są w pliku tekstowym *.txt. W kolejnym etapie, pliki z danymi wczytywane są do programu Matlab i przetwarzane za pomocą filtra Golaya - Savitzky'ego w celu wyeliminowania zakłóceń. Wykorzystując metodą najmniejszych kwadratów obliczono parametry schematu zastępczego silnika reluktancyjnego.

Do identyfikacji pozostałych parametrów, tj. momentu bezwładności i współczynnika tarcia wykorzystano układ mechaniczny opisany w [11]. W układzie tym ze względu na złożoność pomiaru w trakcie wirowania silnika ze względu na konieczność pomiaru momentu obciążenia wykorzystano inny układ mechaniczny. Na osi wirnika zamocowano stalowy pręt, który wraz z wirnikiem tworzy wahadło fizyczne. Na wale silnika umieszczony jest także enkoder absolutny do pomiaru kąta wychylenia wirnika względem stojana. Zasilając obwód stojana ze źródła

prądowego powodowano wychylenie wahadła o pewien kąt, zależny od kąta położenia biegunów stojana względem kierunku przyciągania ziemskiego. Przykładając do wahadła siłę zewnętrzną o charakterze impulsowym, powodowano ruch oscylacyjny w pewnym zakresie kąta obrotu. Pomiar wykonywano tak, aby zmiany indukcyjności na rysunku 2 występowały dla następującej części liniowej charakterystyki. Na podstawie pomiarów wyznaczony moment bezwładności wynosi $J = 0,0005 \text{ kg m}^2$, a współczynnik tarcia $k = 0,0001 \text{ kg m}^2/\text{s}$.

Na podstawie identyfikacji parametrów silnika reluktancyjnego oraz opisu modelu matematycznego, przedstawionego w [11] utworzono model silnika wraz z układem sterowania w Simulinku – rysunek 5.



Rys.5. Schemat modelu silnika reluktancyjnego wraz z układem sterowania w Simulinku

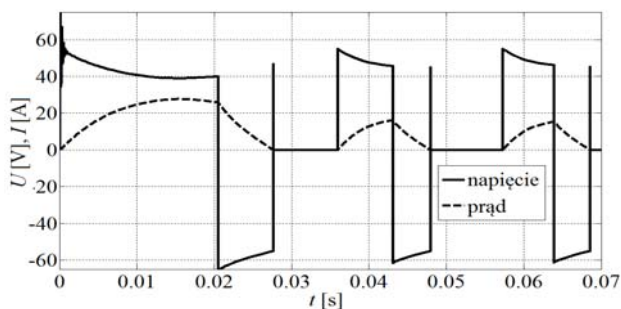
W schemacie modelu wykorzystano układ półmostka typu H do sterowania silników reluktancyjnych [12]. Układ ten dla silnika reluktancyjnego jednofazowego zawiera dwa tranzystory i dwie diody. W modelu silnika reluktancyjnego uwzględniono nieliniowości związane z indukcyjnością, pochodną indukcyjności oraz rezystancją. Nieliniowości te zostały aproksymowane za pomocą szeregu Fouriera. Funkcje opisujące indukcyjność (H) i rezystancje (Ω) są postaci:

$$(10) \quad L(\varphi) = 0,0168 + 0,0026\sin(2\varphi) - 0,0046\cos(2\varphi) - 0,0001\sin(4\varphi) - 0,0001\cos(4\varphi)$$

$$(11) \quad R(\varphi) = 1,1584 + 0,0685\sin(2\varphi) - 0,1128\cos(2\varphi) - 0,0026\sin(4\varphi) - 0,0092\cos(4\varphi)$$

Stany przejściowe i bilans mocy silnika reluktancyjnego

Dla zobrazowania stanów przejściowych oraz bilansu mocy przełączalnego silnika reluktancyjnego, model z rysunku 5 zasilono napięciem o wartości 55V. Moment obciążenia przyjęto na poziomie 0.1Nm. Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu silnika.



Rys.6. Napięcie (linia ciągła) i prąd (linia kreskowana) na silniku

Jak widać na rysunku 6 napięcie na przełączalnym silniku reluktancyjnym podczas załączania oscyluje ze znaczną częstotliwością. Przy przełączeniach zmienia się

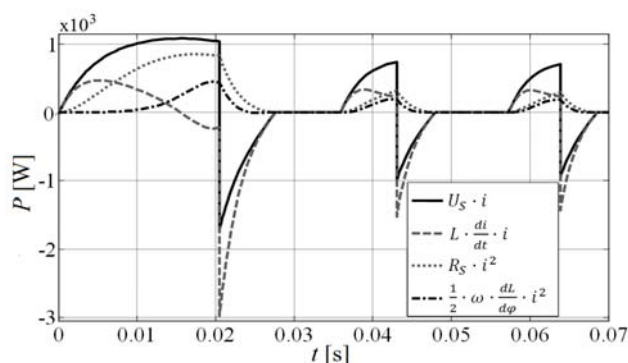
między -65V i +55V. Gdy silnik jest załączony napięcie wynosi +55V, podczas wyłączenia przez pewien czas wynosi około -60V, a następnie spada do zera. Spadki napięć widoczne na charakterystyce napięciowej spowodowane są przez rezystancje tranzystorów i diod. Prąd dla dodatniej wartości napięcia wzrasta, następnie maleje do zera przy rozłączonych tranzystorach.

Równania przedstawiające bilans chwilowych mocy czynnych dla części elektrycznej i mechanicznej są w postaci (12) i (13):

$$(12) \quad L(\varphi) \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} \omega i^2 + R_s i^2 = U_s i$$

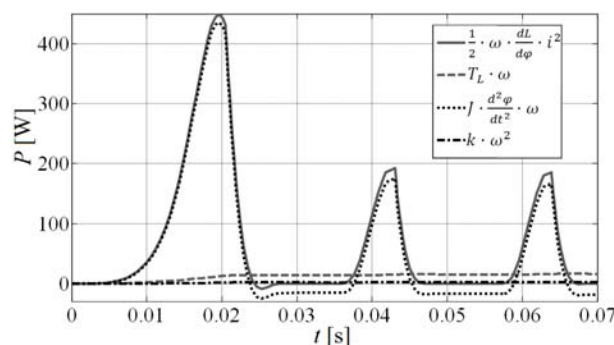
$$(13) \quad J \frac{d^2\varphi}{dt^2} \omega + k \omega^2 + T_L \omega = \frac{1}{2} \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} \omega i^2$$

Na rysunkach 7 i 8 zaprezentowano przebiegi składników równań bilansu chwilowych mocy czynnych odpowiednio dla części elektrycznej i dla części mechanicznej.



Rys.7. Składniki chwilowej mocy czynnej równania elektrycznego przełączalnego silnika reluktancyjnego

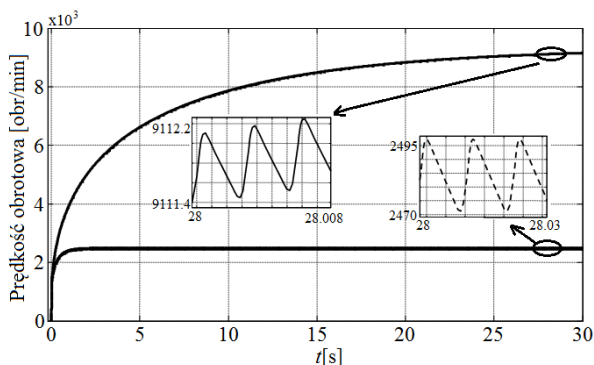
Na rysunku 7 linia ciągła przedstawia moc dostarczaną do silnika. Gdy tranzystory są załączone silnik pobiera moc z układu zasilania, po ich wyłączeniu część mocy zostaje zwrócona do układu zasilania. Linia kreskowana przedstawia energię magazynowaną w cewce. W pierwszym etapie cewka zwiększa swoją energię (tranzystory załączone), by następnie poprzez diody zwrócić ją do obwodu zasilającego (tranzystory wyłączone). Podczas uruchamiania silnika, można zauważyć pewne zmniejszanie się energii zgromadzonej w cewce przed rozłączeniem tranzystorów. Wpływ na ten proces ma prąd, którego wartość maleje gdy tranzystory są załączone. Krzywa oznaczona linią kropkową określa moc strat spowodowaną przepływem prądu przez rezystancję i ma duży udział w wartości mocy pobieranej z układu zasilania. Linia kresko-kropkowa określa moc dostarczaną do układu mechanicznego.



Rys.8. Składniki chwilowej mocy czynnej równania mechanicznego przełączalnego silnika reluktancyjnego

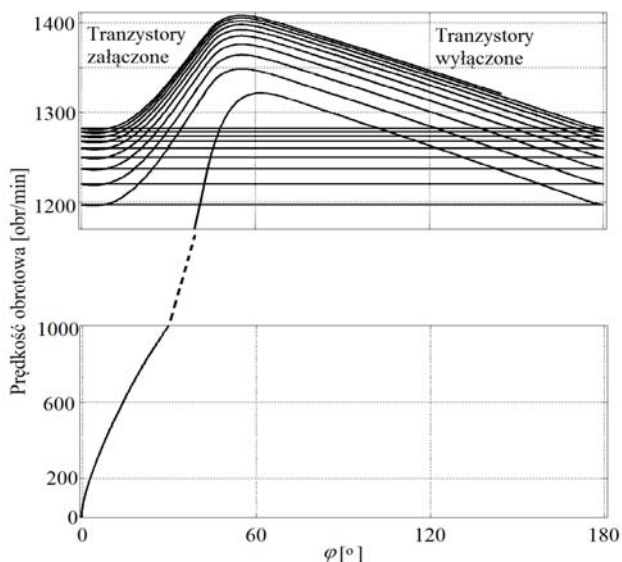
Na rysunku 8 linia ciągła przedstawia moc dostarczaną do układu mechanicznego z układu elektrycznego. Moc dostarczona z układu elektrycznego przekształcana jest głównie na energię kinetyczną układu mechanicznego. Moc związana z momentem bezwładności pokrywa w dużej części charakterystykę momentu elektromagnetycznego. Gdy moc z układu elektrycznego nie jest dostarczana (tranzystory wyłączone) energia kinetyczna zużywana jest na moment obciążenia i moment tarcia. Moce związane z momentem obciążenia i współczynnikiem tarcia zmieniają swoją wartość zależnie od prędkości obrotowej.

Na rysunku 9 przedstawiono prędkość obrotową silnika reluktancyjnego z obciążeniem i bez obciążenia. Dla silnika z obciążeniem prędkość obrotowa osiąga stan ustalony po czasie ok. 1s. Dla silnika bez obciążenia prędkość obrotowa stan ustalony osiąga po znacznie dłuższym czasie ok. 30s. W obu przypadkach można zauważyć zmiany prędkości związane z załączaniem tranzystorów.



Rys.9. Obroty silnika z obciążeniem (linia przerywana) i bez obciążenia (linia ciągła)

Na rysunku 10 przedstawiono prędkość obrotową silnika w funkcji kąta obrotu wirnika. Na rysunku można zauważyć, że prędkość wzrasta gdy tranzystory są załączone, natomiast maleje gdy tranzystory są wyłączone. Występuje też znacząca zmiana prędkości dla obciążonego silnika. Im większe obciążenie silnika tym różnica prędkości jest większa.



Rys.10. Obroty silnika w funkcji kąta obrotu wirnika

Wnioski

W rozważanym silniku reluktancyjnym moc bilansuje się dla równań opisujących silnik jako układ nieholonomiczny w postaci (12) i (13). Duży wpływ na pobór mocy przełączalnego silnika reluktancyjnego ma rezystancja, szczególnie podczas załączania silnika. Rezystancja ta zmienia swoją wartość względem kąta obrotu i przyjmowanie jej jako wartości stałej jest pewnym uproszczeniem. Ze względu na hamowanie silnika reluktancyjnego załączanie i wyłączenie silnika powinno następować na dodatnim nachyleniu charakterystyki indukcyjności względem kąta obrotu. Uwzględniając przebiegi poszczególnych "mocy" na rysunkach 7 i 8 można stwierdzić, że procesy wymiany energii w układzie elektrycznym są bardziej złożone niż w układzie mechanicznym i wpływają one w znacznym stopniu na sprawność silnika.

LITERATURA

- [1] Padurariu E., Somesan L., Viorel I.A., Switched Reluctance Motor Analytical Models, Comparative Analysis, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, IEEE 2010, 285-290
- [2] Mhatli K., Salah B. B., Improved Modeling of Switched Reluctance Motor Including Mutual and Saturation Effects, 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, IEEE 2010, 1470-1475
- [3] Tanujaya M., Lee D.H., An Y. J., Ahn J. W., A Novel 6/5 Switched Reluctance Motor with Short Flux Path: Concept, Design and Analysis, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, (2012), Vol.1, No.147-53
- [4] Tomczewski K., Symulacja pracy napędu z nowym układem zasilania przełączalnego silnika reluktancyjnego, Przegląd Elektrotechniczny (2009)
- [5] Kowol M., Mynarek P., Mroczeń D., Model matematyczny przełączalnego silnika reluktancyjnego do analizy stanów dynamicznych, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 88 (2010)
- [6] Krishnan R., Switched Reluctance Motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, COTA Virginia Tech (2001)
- [7] Vasquez H., Parker J.K., A new simplified mathematical model for a switched reluctance motor in a variable speed pumping application, Mechatronics 14 (2004), 1055-1068
- [8] Miller T. J. E., Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Clarendon press Oxford, (1989)
- [9] Miller T. J. E., Electronic control of switched reluctance machines, Newnes Power Engineering Series, (2001)
- [10] Skvarenina T. L., The power electronics handbook industrial electronics series, CRC Press LLC, (2002)
- [11] Wcislik M., Suchenia K., Zagniński P., Równania ruchu układu elektromechanicznego na przykładzie silnika reluktancyjnego, Przegląd Elektrotechniczny, 2012-12b
- [12] Zadeh A. D., Adib E., Farzanehfard H., Saghalian-Nejad S. M., New Converter for Switched Reluctance Motor Drive With Wide Speed Range Operation, Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, (2011), 473-477

Autorzy: Prof. dr hab. inż. Mirosław Wcislik, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce, E-mail: mwcislik@tu.kielce.pl;

mgr inż. Karol Suchenia, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce, E-mail: ksuchenia@tu.kielce.pl;