

Porównanie sprawności napędu wyposażonego w silnik indukcyjny i reluktancyjny

Streszczenie. Rozwój algorytmów sterowania silnikami elektrycznymi przyczynił się do rozwoju napędu elektrycznego opartego o silniki reluktancyjne. Konstrukcja, charakteryzująca się brakiem obwodu wzbudzenia daje tu podstawę do dyskusji na temat zwiększonej sprawności, w stosunku do silnika indukcyjnego. W niniejszym artykule przedstawiono badania porównawcze sprawności napędu wyposażonego w silnik synchroniczny reluktancyjny oraz silnik indukcyjny, obciążonych stałym momentem.

Abstract. Development of algorithms for control of electric motors contributed to a development of electric drive based on reluctance motors. The design of motor without induction circuit gives a reason for discussion on increased efficiency of this motor in comparison with efficiency of induction motor. Comparative tests of efficiency of drive equipped with synchronous reluctance motor and drive equipped with induction motor, both of constant torque, are presented. (Assessment of efficiency of drive equipped with induction motor and drive equipped with reluctance motor)

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, silnik synchroniczny reluktancyjny, przekształtnik energoelektroniczny, sprawność.

Keywords: induction motor, synchronous reluctance motor, power electronic converter, efficiency.

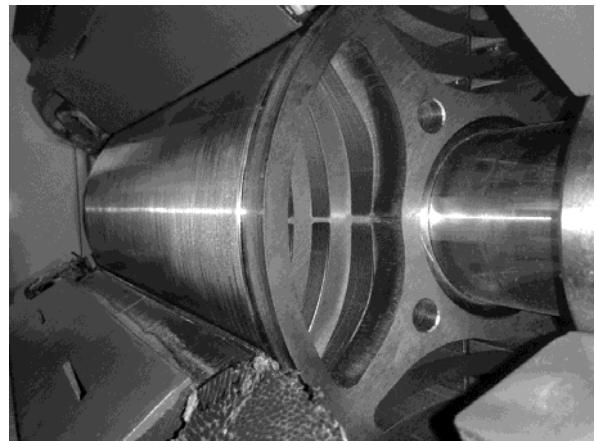
Wstęp

Rozwój energoelektroniki w zakresie zaawansowanych metod sterowania wektorowego wpłynął znacząco na efektywność użytkowania silników indukcyjnych. Wspomniany rozwój metod sterowania implementowany w nowoczesnych procesorach sygnałowych umożliwił rozwój technologiczny napędów elektrycznych, które do tej pory nie były powszechnie stosowane. Przykładem, może być znany od dawna silnik reluktancyjny, jednak dopiero od początku XXI wieku użytkowany dzięki zaistniałym możliwościom sterowania. Budowa silnika reluktancyjnego charakteryzuje się brakiem obwodu wzbudzenia oraz jawnobiegunowością [1]. Dzięki temu, jego konstrukcja mechaniczna jest prostsza niż konstrukcja klasycznego silnika indukcyjnego klatkowego. W tego typu konstrukcji, brak uzwojenia w obwodzie twornika może mieć wpływ na uzyskanie większej efektywności energetycznej, względem silnika indukcyjnego (redukcja strat w tworniku) [2, 3, 4, 5]. W dobie intensywnych poszukiwań rozwiązań, mających na celu poprawę efektywności energetycznej urządzeń elektrycznych (Dyrektywa Unii Europejskiej nr 2005/32/WE [6]), które są ściśle związane z silnikami elektrycznymi, należy rozważyć możliwość zastąpienia klasycznych napędów wyposażonych w silniki indukcyjne, napędami z silnikami reluktancyjnymi. Mając na uwadze własności energetyczne silników reluktancyjnych przeprowadzono badania mające na celu ocenę sprawności napędów wyposażonych w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny (tych samych mocy), obciążonych stałym momentem.

Silnik synchroniczny reluktancyjny (SynRM)

Główną cechą silnika synchronicznego reluktancyjnego (zwanego dalej reluktancyjnym) jest brak uzwojenia wzbudzenia oraz jawnobiegunowość. Jedynym dostępnym momentem jest moment reluktancyjny, który występuje pomimo braku wzbudzenia, wskutek dynamicznego działania pola magnetycznego na element magnetycznie niesymetryczny, wykonany z materiału ferromagnetycznego. Wirnik dąży do zajęcia takiego położenia względem stojana, przy którym reluktancja dla strumienia jest najmniejsza. W sytuacji, w której elementy magnetyczne są symetryczne względem dowolnej osi, moment reluktancyjny nie powstaje (w każdym położeniu wirnika względem stojana reluktancja drogi strumienia jest taka sama). Konstrukcja wirników silników reluktancyjnych sprawia, że reluktancja podłużna różni się znacznie od

poprzecznej. Na rysunku 1 przedstawiono widok wirnika silnika synchronicznego reluktancyjnego produkcji ABB.



Rys.1. Wirnik silnika synchronicznego reluktancyjnego produkcji ABB (zdjęcie: Andrzej Niedworok)

Konstrukcja silnika reluktancyjnego niesie ze sobą wiele korzystnych cech konstrukcyjnych:

- prostą budowę, co przekłada się na niski koszt wykonania oraz trwałość i niezawodność pracy,
 - wysoką sprawność,
 - łatwe, do automatyzacji produkcji, uzwojenie stojana,
 - wydzielanie się przeważającej ilości strat w stojanie, co ułatwia budowę układu chłodzenia,
 - łatwą regulację prędkości obrotowej i możliwość formowania charakterystyki mechanicznej (za pomocą przekształtnika energoelektronicznego),
 - dużą odporność na uszkodzenia względem rozwiązań silników indukcyjnych oraz silników synchronicznych z magnesami trwałymi,
 - dużą odporność mechaniczną i termiczną, ze względu na brak mechanicznego komutatora.
- Oprócz zalet, konstrukcja silnika reluktancyjnego posiada również wady, do których można zaliczyć:
- mniejszy moment siły (moment rozruchowy), który ogranicza zakres użytkowania w aplikacjach pompowych i wentylatorowych,
 - obecność pulsacji momentu elektro-magnetycznego (wynikająca z jawno-biegunowości), skutkująca występowaniem drgań mechanicznych i hałasu,

- konieczność współpracy z przekształtnikiem [7].

Pulsacja momentu elektromagnetycznego silnika reluktancyjnego była przedmiotem wielu prac badawczych mających na celu jego minimalizację [1].

Z punktu widzenia użytkownika, istotną właściwością silnika reluktancyjnego jest przede wszystkim wyższa sprawność (względem rozwiązania silnika indukcyjnego).

Metodyka badań sprawności napędów

Badania sprawności przeprowadzono dla napędu wyposażonego w przekształtnik typu ACS880-01 o mocy 2,2 kW produkcji ABB oraz w dwa silniki o mocy 1,5 kW:

- indukcyjny, typu M3AA 090L-2,
- synchroniczny reluktancyjny, typu M3AL 90L 4

Silniki pochodziły także od tego samego producenta. W tabelach 1 i 2 zestawiono parametry przekształtnika oraz silników.

Tabela 1. Parametry znamionowe przekształtnika typu ACS880-01 (odczytane z tabliczki znamionowej)

Wejściowe napięcie znamionowe U_1 [V]	3~ 400
Wejściowy prąd znamionowy I_1 [A]	5,6
Częstotliwość wejściowa f_1 [Hz]	50 / 60
Wyjściowe napięcie znamionowe U_2 [V]	3~ U_1
Wyjściowy prąd znamionowy I_2 [A]	5,6
Częstotliwość wyjściowa f_2 [Hz]	0...500

Tabela 2. Parametry znamionowe silników typu M3AA 090L-2 oraz M3AL 90L 4 (odczytane z tabliczek znamionowych)

Parametr	Silnik indukcyjny M3AA 090L-2	Silnik reluktancyjny M3AL 90L 4
Moc znamionowa [kW]	1,5	1,5
Napięcie znamionowe [V]	400	370 (praca w sieci 400 V AC)
Prąd przy napięciu znamionowym [A]	2,9	3,9
Częstotliwość [Hz]	50	100
Prędkość znamionowa [obr/min]	2900	3000
Moment obrotowy znamionowy [Nm]	4,9	4,8
Połączenie uzwojeń stojana	Y	Y

Sprawność wyznaczono na podstawie pomiaru mocy mechanicznej na wale silnika oraz mocy czynnej elektrycznej pobieranej z sieci energetycznej. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy stanowiska badawczego do wyznaczania sprawności. Silniki umieszczono na stanowisku hamowni wyposażonej w silnik prądu stałego, sterowany z przekształtnika tyrystorowego. Pomiędzy badanymi silnikami, a silnikiem hamowni zainstalowano momentomierz o zakresie pomiarowym 10 [Nm]. Z przekształtnika tyrystorowego wyprowadzono sygnał prędkości obrotowej, mierzony za pomocą enkodera, zainstalowanego na wale silnika prądu stałego.

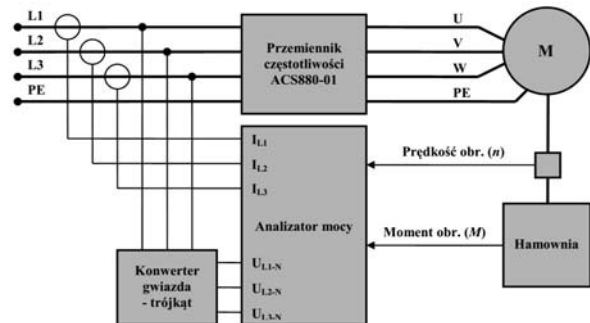
Sygnały pomiarowe momentu (M) oraz prędkości (n) obrotowej przesyłano na wejścia analogowe analizatora mocy. Na ich podstawie analizator wyznaczał moc mechaniczną (P_M). Od strony sieci energetycznej dokonywano pomiaru mocy, mierząc napięcia międzyfazowe oraz prądy fazowe. Sygnały napięciowe oraz prądowe przesyłano na wejścia analizatora mocy, który na ich podstawie wyznaczał moc elektryczną (P_E). Na rysunku 3 przedstawiono stanowisko badawcze z zainstalowanym silnikiem reluktancyjnym.

Stosowano dwa tryby sterowania silników. Dla silnika indukcyjnego, stosowano sterowanie skalarnie oraz

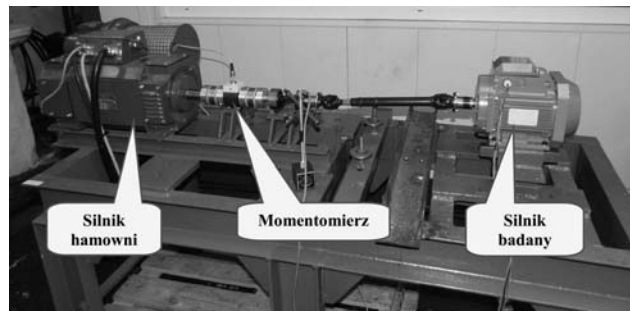
wektorowe (DTC – ang. *Direct Torque Control*), natomiast dla silnika reluktancyjnego tryb wektorowy DTC. Dla trybu wektorowego, dla obu silników, wykonano bieg identyfikacyjny (wprowadzono do przekształtnika parametry znamionowe silników zgodnie z tabelami 1 i 2).

W celu określenia sprawności wyznaczano następujące charakterystyki mechaniczno – elektryczne:

- moment obrotowy w funkcji prędkości obrotowej $M=f(n)$,
- moc elektryczna (czynna) na wejściu przekształtnika w funkcji prędkości obrotowej $P_E=f(n)$,
- moc mechaniczna na wale silnika w funkcji prędkości obrotowej $P_M=f(n)$.

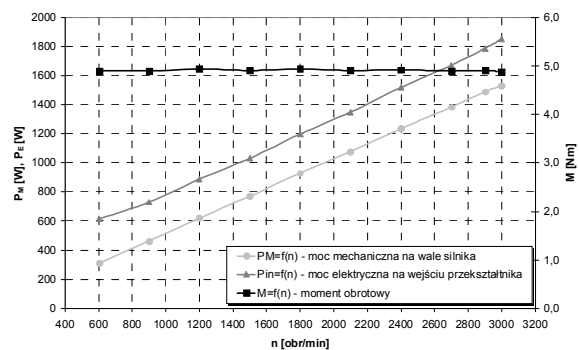


Rys.2. Schemat blokowy stanowiska do wyznaczania sprawności układu napędowego [8, 9]

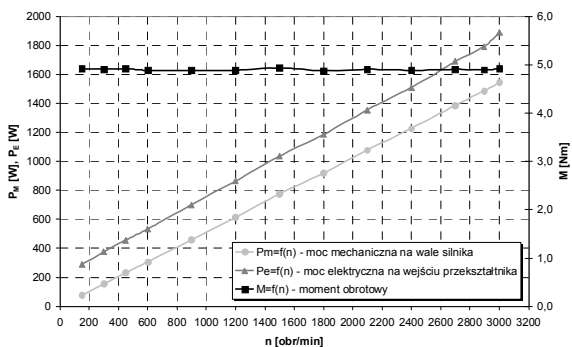


Rys.3. Stanowisko badawcze z zainstalowanym silnikiem reluktancyjnym [8]

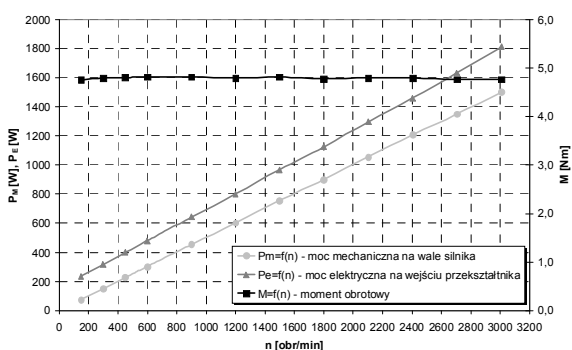
Charakterystyki wyznaczono dla trzech wartości momentu obrotowego silnika: $50\%M_n$, $75\%M_n$ oraz $100\%M_n$. Regulowano prędkość obrotową silnika w przedziale od 150 do 3000 [obr/min]. Badania realizowano w zakresie znamionowych parametrów silników (nie przekraczano znamionowej mocy prądów fazowych oraz prędkości obrotowej). Utrzymywano stałą wartość momentu obrotowego dla rozpatrywanego przedziału prędkości obrotowej, celem odzwierciedlenia warunków pracy stałomomentowej.



Rys.4. Charakterystyki mechaniczno – elektryczne napędu wyposażonego w silnik indukcyjny typu M3AA 090L-2 dla $100\%M_n$ (sterowanie skalarnie) [9]



Rys.5. Charakterystyki mechaniczno – elektryczne napędu wyposażonego w silnik indukcyjny typu M3AA 090L-2 dla 100%M_n (sterowanie DTC) [9]



Rys.6. Charakterystyki mechaniczno – elektryczne napędu wyposażonego w silnik reluktancyjny typu M3AL 90L 4 dla 100%M_n (sterowanie DTC) [8]

Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych badań napędu wyposażonego w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny uzyskano charakterystyki mechaniczno – elektryczne. Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono przykładowe charakterystyki mechaniczno – elektryczne napędu wyposażonego w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny (wyznaczone dla 100%M_n) dla różnych trybów sterowania. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk określono sprawność, korzystając z zależności (1):

$$(1) \quad \eta = \frac{P_M}{P_E} \cdot 100\%$$

W tabelach 3, 4 i 5 zestawiono wartości sprawności napędu wyposażonego w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny w funkcji prędkości obrotowej dla różnych trybów sterowania.

Tabela 3. Wybrane wartości sprawności dla napędu wyposażonego w silnik indukcyjny typu M3AA 090L-2 (sterowanie skalarne) [9]

n [obr/min]	η _{ACIM} [%] (sterowanie skalarne)		
	50%M _n	75%M _n	100%M _n
300	42,5	–	–
600	59,9	57,4	50,4
900	68,1	67,5	63,3
1200	72,8	73,0	69,8
1500	75,8	76,6	74,7
2400	80,8	82,1	81,3
2700	81,3	82,9	82,8
3000	81,9	82,9	82,7

¹ Pomiaru nie wykonano ze względu na brak możliwości stabilizacji zadanej wartości momentu obrotowego na wale badanego silnika.

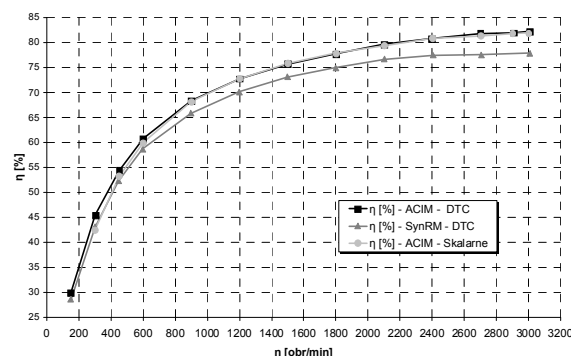
Tabela 4. Wybrane wartości sprawności dla napędu wyposażonego w silnik indukcyjny typu M3AA 090L-2 (sterowanie wektorowe DTC) [9]

n [obr/min]	η _{ACIM} [%] (sterowanie wektorowe DTC)		
	50%M _n	75%M _n	100%M _n
300	45,4	44,7	41,1
600	60,7	60,4	57,4
900	68,3	68,3	65,5
1200	72,7	73,3	71,0
1500	75,7	76,6	74,8
2400	80,8	82,0	81,4
2700	81,8	82,7	82,1
3000	82,2	81,7	81,6

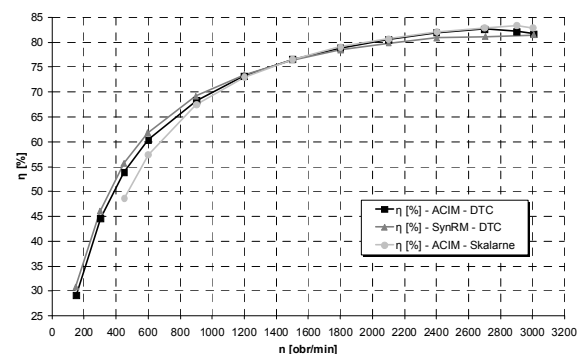
Tabela 5. Wybrane wartości sprawności dla napędu wyposażonego w silnik reluktancyjny typu M3AL 90L 4 (sterowanie wektorowe DTC) [8]

n [obr/min]	η _{SynRM} [%] (sterowanie wektorowe DTC)		
	50%M _n	75%M _n	100%M _n
300	43,1	46,0	47,5
600	58,7	61,8	62,8
900	65,8	69,2	70,7
1200	70,1	73,5	75,2
1500	73,1	76,4	78,1
2400	77,4	80,9	82,7
2700	77,5	81,1	82,7
3000	77,9	81,5	82,8

Na rysunkach 7, 8 i 9 przedstawiono wykresy sprawności napędów w funkcji prędkości obrotowej dla różnych trybów sterowania.



Rys.7. Wykresy sprawności napędu wyposażonego w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny dla momentu obr. 50%M_n [10]



Rys.7. Wykresy sprawności napędu wyposażonego w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny dla momentu obr. 75%M_n [10]

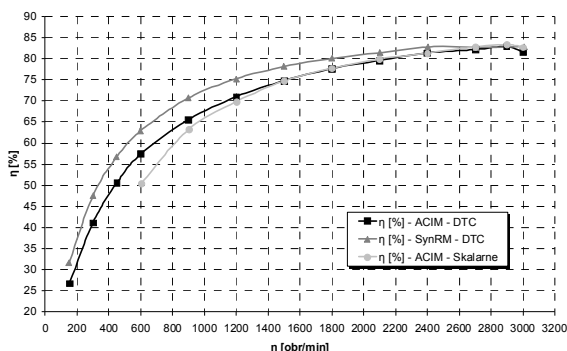
Uzyskane wyniki sprawności napędu, wyposażonego w przekształtnik typu ACS880-01 produkcji ABB, pozwoliły dokonać obiektywnej oceny korzyści i strat płynących z zastosowania dwóch silników indukcyjnego typu M3AA 090L-2 oraz reluktancyjnego typu M3AL 90L-4. Przyjęto napęd z silnikiem reluktancyjnym jako napęd odniesienia.

Różnice sprawności $\Delta\eta_1$, $\Delta\eta_2$ wyznaczano posługując się zależnościami (2 i 3):

$$(2) \quad \Delta\eta_1 = \eta_{SynRM(DTC)} - \eta_{ACIM(SKALARNE)}$$

$$(3) \quad \Delta\eta_2 = \eta_{SynRM(DTC)} - \eta_{ACIM(DTC)}$$

gdzie: $\eta_{SynRM(DTC)}$ – sprawność napędu wyposażonego w silnik reluktancyjny (sterowanie wektorowe – DTC), $\eta_{ACIM(SKALARNE)}$ – sprawność napędu wyposażonego w silnik indukcyjny (sterowanie skalarnie), $\eta_{ACIM(DTC)}$ – sprawność napędu wyposażonego w silnik indukcyjny (sterowanie wektorowe – DTC).



Rys.8. Wykresy sprawności napędu wyposażonego w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny dla momentu obr. 100%M_n [10]

W tabelach 6, 7 i 8 zestawiono różnice sprawności badanych napędów dla wybranych prędkości obrotowych.

Różnice w sprawności dla pracy ze znamionowym momentem obrotowym (100%M_n) wskazują, że napęd wyposażony w silnik reluktancyjny ma większą sprawność w całym zakresie rozpatrywanych prędkości obrotowych niż analogiczny napęd wyposażony w silnik indukcyjny. Na różnicę w sprawności ma także wpływ sposób sterowania silnika indukcyjnego. W zakresie prędkości znamionowej silnika reluktancyjnego i synchronicznej silnika indukcyjnego (tj. $n = 3000$ [obr/min]), największą różnicę sprawności zaobserwowano porównując napęd reluktancyjny z indukcyjnym sterowanym wektorowo DTC (napęd z silnikiem reluktancyjnym wykazywał sprawność o 1,2 % większą od napędu z silnikiem indukcyjnym). Redukując prędkość obrotową napędu z silnikiem reluktancyjnym do wartości 2100 [obr/min] zwiększono sprawność o 1,8 % względem napędu z silnikiem indukcyjnym sterowanym wektorowo (DTC). Największe różnice w sprawności występowały dla prędkości 600 oraz 900 [obr/min], gdzie napęd z silnikiem reluktancyjnym wykazywał sprawność większą o 12,4 % i 7,4 % względem napędu z silnikiem indukcyjnym sterowanym skalarnie. Należy podkreślić, że napęd z silnikiem reluktancyjnym utrzymywał stałą i zadaną prędkość synchroniczną.

Tabela 6. Wybrane różnice sprawności dla napędów pracujących z momentem obrotowym 50%M_n [10]

n [obr/min]	Moment obrotowy: 50%M _n	
	Δη ₁ [%]	Δη ₂ [%]
300	0,6	-2,3
600	-1,2	-2,0
900	-2,3	-2,5
1200	-2,7	-2,6
1500	-2,7	-2,6
2400	-3,4	-3,4
2700	-3,8	-4,3
3000	-4,0	-4,3

Tabela 7. Wybrane różnice sprawności dla napędów pracujących z momentem obrotowym 75%M_n [10]

n [obr/min]	Moment obrotowy: 75%M _n	
	Δη ₁ [%]	Δη ₂ [%]
300	- ²	1,3
600	4,4	1,4
900	1,7	0,9
1200	0,5	0,2
1500	-0,2	-0,2
2400	-1,2	-1,1
2700	-1,8	-1,6
3000	-1,4	-0,2

Tabela 8. Wybrane różnice sprawności dla napędów pracujących z momentem obrotowym 100%M_n [10]

n [obr/min]	Moment obrotowy: 100%M _n	
	Δη ₁ [%]	Δη ₂ [%]
300	- ²	6,4
600	12,4	5,4
900	7,4	5,2
1200	5,4	4,2
1500	3,4	3,3
2400	1,4	1,3
2700	-0,1	0,6
3000	0,1	1,2

Uzyskane różnice sprawności napędów pracujących z 75 % momentem obrotowym wskazują na spadek sprawności napędu z silnikiem reluktancyjnym względem napędu z silnikiem indukcyjnym. W zakresie prędkości znamionowej silnika reluktancyjnego i synchronicznej silnika indukcyjnego (tj. $n = 3000$ [obr/min]), większą o 1,4 % sprawność wykazał napęd z silnikiem indukcyjnym sterowany skalarnie. Napęd z silnikiem reluktancyjnym wykazywał większą, sprawność w przedziale prędkości od 450 do 900 [obr/min] (względem napędu z silnikiem indukcyjnym sterowanym skalarnie i wektorowo). W pozostałych obszarach rozpatrywanych prędkości obrotowych, różnice w sprawności były pomijalnie małe. Istotne korzyści wynikające ze sprawności napędu z silnikiem reluktancyjnym występują jednak w obszarach prędkości obrotowych, które nie zawsze znajdują praktyczne zastosowanie (np. aplikacjach wentylatorowych lub pompowych).

Analiza różnic sprawności dla napędów pracujących z 50 % momentem obrotowym wskazuje na tendencję spadku sprawności napędu wyposażonego w silnik reluktancyjny. Ma to miejsce zarówno dla skalarnego jak i wektorowego trybu sterowania silnikiem indukcyjnym. Należy zauważyć, że różnice w sprawności dla obu trybów sterowania są do siebie zbliżone w praktycznie całym zakresie rozpatrywanych prędkości obrotowych.

Podsumowanie

Badania napędu wyposażonego w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny pozwoliły na dokonanie oceny różnic w sprawności obu konstrukcji. Uzyskane wyniki badań wykazały, że napęd wyposażony w silnik reluktancyjny wykazuje największą sprawność podczas pracy z obciążeniem znamionowym, gdzie uzyskiwał sprawność większą o 12,4 % względem napędu wyposażonego w silnik indukcyjny (dla $n = 600$ [obr/min]). W zakresie prędkości obrotowej równej 2100 [obr/min] sprawność napędu wyposażonego w silnik reluktancyjny była większa

² Nie wyznaczono różnicy sprawności ze względu na brak wartości sprawności dla napędu wyposażonego w silnik indukcyjny (sterowanego skalarnie).

o 1,8 %, natomiast dla często stosowanej w aplikacjach przemysłowych prędkości obrotowej 1500 [obr/min] sprawność napędu z silnikiem reluktancyjnym była większa o 3,4 % względem napędu z silnikiem indukcyjnym. Wraz ze zmniejszeniem momentu obrotowego sprawność napędu wyposażonego w silnik reluktancyjny malała i dla obciążenia silnika momentem obrotowym równym $50\% \cdot M_n$ większą sprawność wykazywał już napęd wyposażony w silnik indukcyjny.

Podsumowując, należy stwierdzić, że napęd wyposażony w silnik reluktancyjny będzie zużywał mniej energii elektrycznej w przypadku jego pracy z obciążeniem znamionowym. Największy zysk wynikający ze sprawności występuje w aplikacjach stałomomentowych, gdzie możliwa jest redukcja prędkości obrotowej.

Należy podkreślić, że uzyskane wyniki badań odnoszą się do napędu wyposażonego w silnik reluktancyjny, określane przez producenta jako *High Output*. Zgodnie z informacjami zawartymi w dokumentacji producenta [2] tego typu silnik ma niższą sprawność niż klasyczny silnik synchroniczny reluktancyjny (o mocy ≥ 11 [kW]). W związku z tym, rozważa się kontynuację badań porównawczych sprawności napędów z silnikami o wyższych mocach.

Autorzy: dr inż. Andrzej Niedworok, Laboratorium Badań Stosowanych, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice, e-mail: aniedworok@komag.eu.
dr inż. Łukasz Orzech, Laboratorium Badań Stosowanych, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice, e-mail: lorzech@komag.eu.

LITERATURA

- [1] Wróbel K., Wpływ zmian konstrukcyjnych obwodu magnetycznego na parametry elektromechaniczne przełączalnego silnika reluktancyjnego (SRM), Autoreferat rozprawy doktorskiej, *Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki*, (2006)
- [2] ABB Group, SynRM motor and drive packages. Low Voltage motors and drives., *ABB Group*, (2013)
- [3] ABB Group R&D and Technology, Motoring ahead. Synchronous motors controlled by variable-speed drives are bringing higher efficiencies to industrial applications, *ABB Review, The corporate technical journal*, 1 (2011), 56-61
- [4] Hsieh M., Tai I., Weng Y., Cost-effective Design for high efficiency synchronous reluctance motor, *Magnetics Conference (INTERMAG)*, IEEE, (2015), 1-1
- [5] Toda H., Senda. K., Morimoto S., Hiratani T., Influence of Various Non-Oriented Electrical Steels on Motor Efficiency and Iron Loss in Switched Reluctance Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49 (2013), no. 7, 3850-3853
- [6] Parlament Europejski, Dyrektywa 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 lipca 2005 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów wykorzystujących energię oraz zmieniająca dyrektywę Rady 92/42/EWG, oraz dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 96/57/WE i 2000/55/WE, (2005)
- [7] Calvo E. S., Potoradi D., Synchronous reluctance motors with and without permanent magnets for high performance low cost electrical drives, *Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 2015 5th International, Nuremberg (2015), 1-7
- [8] Niedworok A., Sprawozdanie nr 248/BT/2014, Badanie napędu zawierającego przekształtnik typu ACS880 oraz silnik reluktancyjny typu M3AL 90L 4, Opracowanie wewnętrzne realizowane w ramach środków statutowych: E/BT-17254/OR3, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, (2014)
- [9] Niedworok A., Sprawozdanie nr 244/BT/2014, Badanie napędu zawierającego przekształtnik typu ACS880 oraz silnik indukcyjny typu M3AA 090L-2, Opracowanie wewnętrzne realizowane w ramach środków statutowych: E/BT-17254/OR2, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, (2014)
- [10] Niedworok A., Analiza porównawcza wyników badań napędów wyposażonych w silnik indukcyjny oraz reluktancyjny, Opracowanie wewnętrzne realizowane w ramach środków statutowych: E/BT-17254/OR4, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, (2014)