

Stanisław Azarewicz, Adam Zalas
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

WPLYW WYBORU MATERIAŁÓW MAGNETYCZNYCH I KONDUKTYWNYCH NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PRACUJĄCYCH W NISKICH TEMPERATURACH

INFLUENCE CHOICE OF MAGNETIC AND CONDUCTIVITY MATERIALS ON EXPLOITATION PARAMETERS IN INDUCTION MOTORS RUNS IN LOW TEMPERATURES

Abstract: The paper presents the influence of slot geometry and resistivity of squirrel cage materials on characteristics high power motor's. Changes of electromagnetic torque run and of electrical current run as they appear in the motor with given solutions were analyzed and compared. In the paper, works concern testing and selection of generator sheets for realization of motor working in liquid natural gasses with temperature -161°C are presented. Apart from this, the results of tests conducted in liquid nitrogen environment and room temperature are included. To choose the optimal kind and thickness of electrical sheet, the behavior of electrical sheets with different thickness and kind of insulation were examined. The magnetic parameters of the tested electrical sheets, such as: magnetic induction, total energy loss with division on hysteresis and eddy current loss were determined. Simulational analyses were conducted using circuit-field method.

1. Wstęp

Maszyny elektryczne stosowane we współczesnych układach pompowych ciekłych gazów pracują zwykle w zanurzeniu, a płynny gaz przepływa przez szczelinę pomiędzy wirnikiem a stojanem. Istotne zmniejszenie rezystancji uzwojeń oraz żelaza czynnego, wynikające ze znacznego obniżenia temperatury, skutkuje zmianami w momencie i prądzie pobieranym przez silnik, szczególnie podczas rozruchu oraz w wartości jego strat elektrycznych.

Niska temperatura pracy i oddziaływanie gazu na podzespoły i uzwojenie silnika stawia przed ich konstruktorami określone zadania. Przede wszystkim niezbędna jest znajomość zmian parametrów podstawowych materiałów czynnych silnika w niskiej temperaturze a także zachowanie się zastosowanych materiałów izolacyjnych. Projektując silnik indukcyjny do pracy w bardzo niskich temperaturach można wykorzystać zarówno klasyczne rozwiązania techniczne i konstrukcje, jak również nietypowe rozwiązania, które mogą korzystnie wpływać na przebieg i wartość momentu elektromagnetycznego i prądu rozruchowego. Jednym z takich rozwiązań może być zastosowanie żłobków wirnika o innej geometrii, niż w „klasycznych” konstrukcjach. Dodatkowo, rozpatrywać można zastosowanie na klatkę wirnika innych materiałów niż powszechnie stosowane aluminium.

Obniżenie temperatury pracy maszyny elektrycznej ma znaczący wpływ na właściwości elektryczne i magnetyczne tworzących ją elementów przewodzących oraz magnetycznych [1]. Istotną zmianą właściwości blachy elektrotechnicznej jest wzrost jej stratności, indukcji nasycenia oraz maksymalnej przenikalności magnetycznej [2]. Mniejsza rezystywność materiału powoduje, że możliwe jest, w projekcie silnika uwzględnienie większej gęstości prądu. Umożliwia to zastosowanie klatki wirnika o mniejszych przekrojach prętów. Zmniejszenie przekroju żłobków wirnika powinno dodatkowo skutkować mniejszą reluktancją całkowitą obwodu magnetycznego silnika i w związku z tym zmniejszeniem prądu magnesującego. Wynika z tego, że kształtowanie parametrów silnika możliwe jest przez dobór rodzaju materiału klatki oraz kształtu żłobka wirnika.

2. Analiza zmian parametrów wybranych materiałów magnetycznych i przewodzących w niskich temperaturach pracy

2.1 Zmiany parametrów blach prądnicowych

Badano zmiany charakterystyk magnesowania blach, stratność całkowitą, oraz udział strat histerezowych i wiropądowych w ogólnych stratach badanych próbek. Pomiary przeprowadzono dla częstotliwości przemagnesowania blach $f = 50 \text{ Hz}$, 500 Hz i 1000 Hz .

Tabela 1. Badane blachy magnetyczne

| Oznaczenie blachy | Grubość d [mm] | Indukcja magnetyczna (f=50Hz), B [T] | | Stratność całkowita przy f=50 Hz | |
|-------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------|
| | | H = 2,5k Am ⁻¹ | H = 5,0k Am ⁻¹ | B= 1,0T | B= 1,5 T |
| 35C3 | 0,35 | 1,49 | 1,6 | 1,3 | 3,3 |
| 35C4 | | | | | |
| 35C6 | | | | | |
| 50C3 | 0,50 | 1,49 | 1,6 | 1,35 | 3,3 |
| 50C4 | | | | | |
| 50C6 | | | | | |

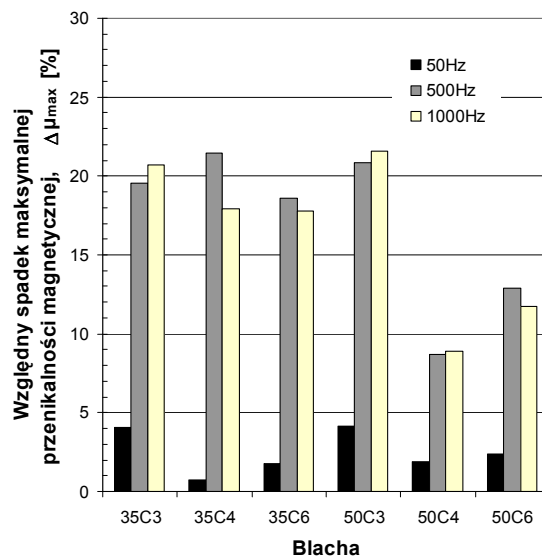
C3 – izolacja organiczna o dobrej wykrawalności,
 C4 – izolacja nieorganiczna o dobrej wytrzymałości temperaturowej,
 C6 – izolacja organiczna z wypełniaczem nieorganicznym o wysokiej oporności izolacyjnej.

Z przeprowadzonych badań wynika, że schładzanie blach prądnicowych o różnej grubości i różnym typie izolacji ma niewielki wpływ na przebieg ich charakterystyk magnesowania. Wyniki pomiarów pokazują, że zmiany indukcji nasycenia związane z niską temperaturą dla poszczególnych blach wykazują wzrost w granicach 3% w całym zakresie badanych częstotliwości przemagnesowania.

Zasadnicze różnice w przebiegu krzywych magnesowania występują w nachyleniu prostoliniowych części charakterystyk, co wpływa na maksymalną przenikalność magnetyczną (μ_{max}) [2].

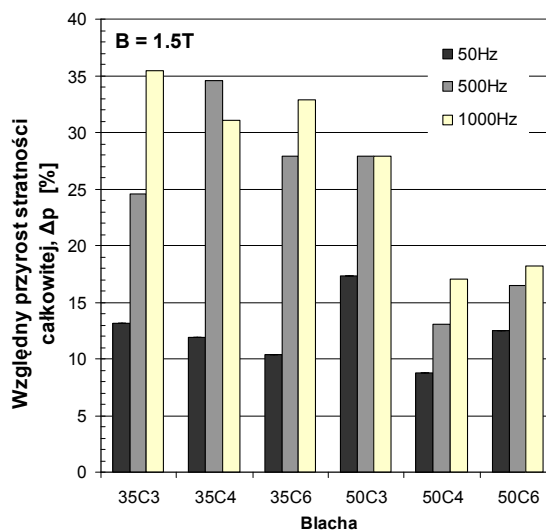
Na rysunku 1 przedstawiono względny spadek maksymalnej przenikalności magnetycznej badanych blach w temperaturze ciekłego azotu w stosunku do przenikalności zmierzonej w temperaturze otoczenia.

Stratność całkowitą zmierzono dla badanych próbek w temperaturze otoczenia oraz w temperaturze ciekłego azotu uzyskując dane porównawcze uwzględniające zarówno wpływ grubości blach na stratność jak i wpływ rodzaju ich izolacji. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 2. Ustalenie przyczyny różnic w stratności blach pokrytych różnymi typami izolacji wymaga jednakże szerszych badań. Uzyskane wyniki wskazują na izolację typu C4 jako izolację najlepszą dla obu grubości blach.



Rys. 1. Względny spadek maksymalnej przenikalności magnetycznej w temperaturze ciekłego azotu w stosunku do przenikalności zmierzonej w temperaturze otoczenia

Największe pogorszenie parametrów stratności i przenikalności magnetycznej stwierdzono w blachach pokrytych izolacją C3 (izolacja organiczna o dobrej wykrawalności).



Rys. 2. Względny przyrost stratności całkowitej, w temperaturze ciekłego azotu w stosunku do stratności zmierzonej w temperaturze pokojowej

2.2. Zmiany rezystancji przewodów nawojowych

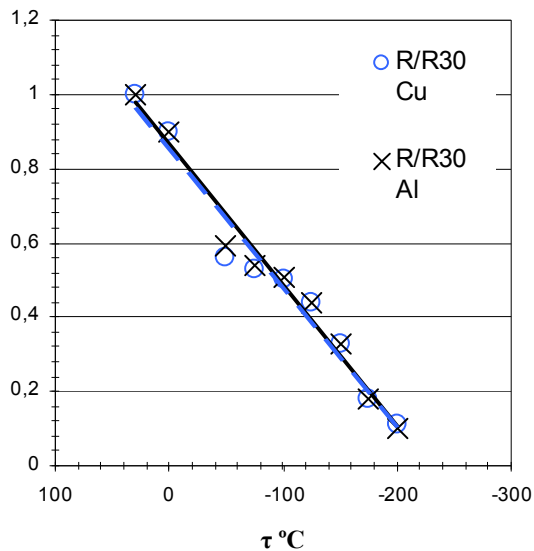
Powszechnie stosowanymi materiałami na uzwojenia maszyn są miedź i aluminium oraz ich stopy poprawiające głównie właściwości mechaniczne oraz rezystywność. Rezystancja tych metali praktycznie zależy liniowo od temperatury zgodnie z zależnością:

$$R_{\tau} = R_{\tau_0} + a(\tau - \tau_0) R_{\tau_0}$$

gdzie:

R_{τ} – rezystancja w badanej temperaturze,
 R_{τ_0} – rezystancja w temperaturze odniesienia,
 a – temperaturowy współczynnik rezystancji,
 τ – temperatura przewodnika,
 τ_0 – temperatura odniesienia.

Zmiany rezystancji materiałów czynnych w wyniku ich schładzania do temperatury ciekłego azotu przedstawiono na rysunku 3. Niska temperatura pracy uzwojeń silnika teoretycznie umożliwia stosowanie znacznie wyższych gęstości prądu. Nie jest to jednak korzystne ze względu na wzrost strat, problemy z odprowadzeniem ciepła itp.



Rys. 3. Przebieg zmian rezystancji miedzi i aluminium podczas ich schładzania

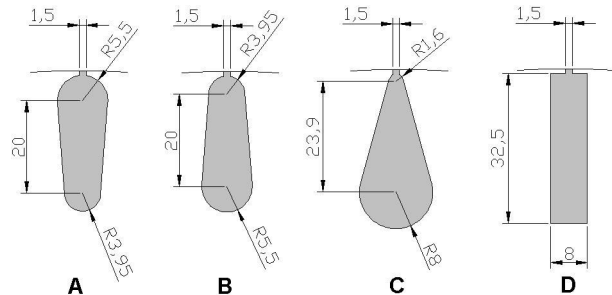
2.3. Wpływ konstrukcji wirnika na charakterystyki eksploatacyjne silnika pracującego w ciekłym gazie

Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych skutków zastosowania w konstrukcji silnika „kriogenicznego” o mocy około 1MW, różnego kształtu i przekroju żłobków wirnika oraz różnego rodzaju materiału na jego klatkę. Badania symulacyjne metodą polowo-obwodową wykonano przy wykorzystaniu programu Flux2D [3]. Analizę parametrów silnika pracującego w ciekłym azocie przeprowadzono dla silnika, zawierającego 48 żłobków w stanie i 40 żłobków w wirniku, wykorzystując model obwodowy o wymuszeniu napięciowym.

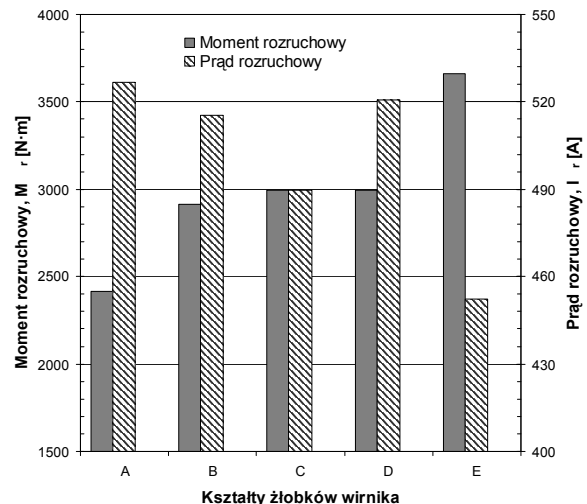
Na rysunku 4 przedstawiono, wybrane do badań, kształty żłobków wirnika badanego silnika. We wszystkich przedstawionych żłobkach za-

chowano takie samo pole przekroju poprzecznego.

W celach porównawczych, przedstawiono parametry otrzymane dla silnika o kształcie żłobków wirnika A, ale pracującego w temperaturze pokojowej (kształt E). Na rysunku 5 przedstawiono wartości momentów i prądów rozruchowych badanych modeli silnika.



Rys. 4. Kształty żłobka wirnika badanego silnika „kriogenicznego”



Rys. 5. Wartości momentu i prądu rozruchowego silnika „kriogenicznego” dla różnych kształtów żłobków wirnika

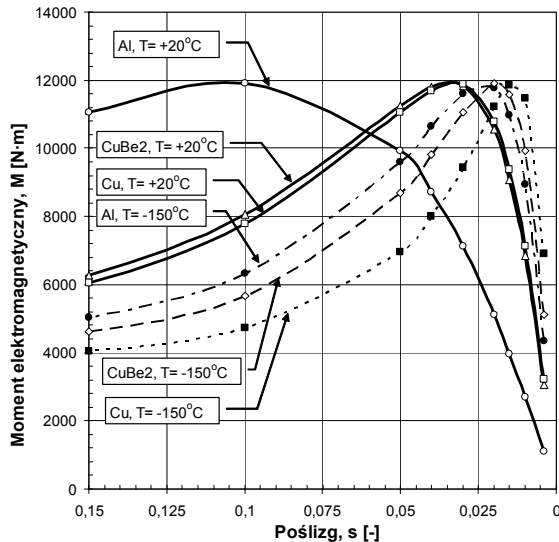
Z przedstawionych wyników obliczeń wynika, że dość powszechnie stosowany kształt żłobka wirnika silnika indukcyjnego (A), zastosowany w silniku pracującym w warunkach „kriogenicznych” pozwala osiągnąć największy moment krytyczny, jednakże, dla silnika z tym kształtem żłobka otrzymano najmniejszy moment rozruchowy.

Za najbardziej odpowiedni kształt żłobka wirnika w silnikach powszechnego stosowania można zatem przyjąć kształt C. W odniesieniu do kształtu żłobka A uzyskano zmniejszenie prądu rozruchowego silnika o około 7% przy równoczesnym zmniejszeniu momentu krytycznego o około 8%. Równocześnie moment

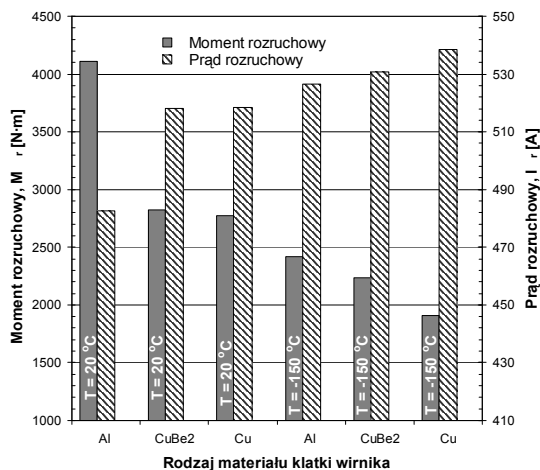
rozruchowy silnika z tym kształtem żłobka zwiększył się o około 24%.

2.4. Wpływ materiału klatki wirnika na parametry silnika

Symulacje silnika „kriogenicznego” dla różnych materiałów klatki wirnika przeprowadzono dla pręta wirnika o kształcie A (rys. 4).



Rys. 6. Przebiegi momentu elektromagnetycznego silnika z klatką wykonaną z różnych materiałów



Rys. 7. Wartości momentu i prądu rozruchowego silnika dla różnych materiałów klatki wirnika

W badaniach zastosowano następujące rodzaje materiału klatki wirnika:

- aluminium odlewane na „gorąco”,
- brąz berylowy o niskiej zawartości berylu,
- miedź.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego w funkcji poślizgu silnika z klatką wykonaną z ww. materiałów. Na rysunku 7 przedstawiono wartości mo-

mentu i prądu rozruchowego silnika „kriogenicznego” z wirnikami o klatce z analizowanych materiałów. Z przedstawionych wartości wynika, że silnik z klatką miedzianą w porównaniu do silnika z klatką aluminiową, w temperaturze pracy (-150°C), charakteryzuje się mniejszym o około 21% momentem rozruchowym i większym o około 2,3% prądem rozruchowym.

3. Wnioski

Schładzanie blach prądnicowych do temperatury ciekłego azotu (-196°C) w nieznacznym (około 3%) stopniu wpływa na poprawę charakterystyk magnesowania.

Wzrost stratności całkowitej w blachach schłodzonych do temperatury ciekłego azotu zawiera się w granicach 10 - 20%. Straty całkowite dla blach o grubości 0,50 mm pokrytych izolacjami C4 i C6 są niższe niż dla blach o grubościach 0,35 mm.

W stratach całkowitych badanych blach zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w ciekłym azocie dominują straty histerezy.

Na podstawie uzyskanych wyników symulacyjnych konstrukcji wirnika można stwierdzić, że z rozpatrywanych konstrukcji najlepsze parametry podczas rozruchu uzyskano dla wirnika z prętem o kształcie C. Silnik z takim wirnikiem charakteryzuje się nieznacznie mniejszym momentem krytycznym

Literatura

- Azarewicz S., Buniowski A., Gaworska D., Węgliński B.: *Research of behaviour of electrical sheets in cryogenic temperatures*, Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits. XVIII Symposium. Proceedings EPNC 2004
- Azarewicz S., Gaworska D., Węgliński B.: *Właściwości blach prądnicowych w ciekłych gazach*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Oficyna Wydaw. PWroc. 2005
- Azarewicz S., Koniarek J., Węgliński B.: *Wpływ konstrukcji wirnika na parametry silnika indukcyjnego pracującego w ciekłych gazach*. Proceedings of XLII International Symposium on Electrical Machines. SME 2006, 3 – 6 July, Cracov, Poland

Autorzy

Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław
e-mail: stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl
adam.zalas@pwr.wroc.pl