

Stanisław Azarewicz, Sławomir Śniegoń, Bogumił Węgliński
Politechnika Wroclawska, Wrocław

WPLYW ZAMKNIĘCIA ŻŁOBKÓW STOJANA KLINAMI MAGNETYCZNYMI NA PARAMETRY SILNIKA PRACUJĄCEGO W CIEKŁYM AZOCIE

THE INFLUENCE OF STATOR SLOT CLOSURE WITH MAGNETIC WEDGES ON PARAMETERS OF A CRYOGENIC MOTOR

Abstract: This paper presents the influence of stator slot closure with magnetic wedge on different magnetic permeabilities in a motor designed specifically for cryogenic application. Calculation results of are obtained by simulation research on the basis of finite element analysis conducted using Flux2D computer program. Basing on the obtained results, it was found that the application of a magnetic wedge in cryogenic motor causes decreases of both the electrical current drawn and electromagnetic torque. Simultaneously, the magnetic flux in air-gap is more uniformly distributed when compared with a typical motor. As a consequence, the values of current harmonics of the motor also decrease.

1. Wstęp

Kryzys paliwowy i wzrost cen ropy na rynku światowym stanowi silny bodziec do poszukiwania nowych źródeł energii, takich jak np. gaz naturalny transportowany w formie ciekłej, w temperaturze -161°C . Wzrost ogólnego zapotrzebowania na ciekłe gazy o bardzo niskich temperaturach wymusza opracowanie nowych rozwiązań urządzeń związanych z ich wytwarzaniem, transportowaniem i przetwarzaniem, w tym także silników elektrycznych. 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 rezystywności 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.

Oprócz typowych metod kształtowania parametrów elektromagnetycznych silnika należy rozważyć także możliwość zastosowania dodatkowych, nietypowych rozwiązań konstrukcyjnych, które mogą korzystnie wpłynąć na ostateczny przebieg i wartość momentu rozwijanego przez silnik „kriogeniczny”. Dotyczy to w szczególności silników przeznaczonych do zasilania zarówno z sieci jak i przekształtnikowych źródeł energii o dużej zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym. Jednym z takich rozwiązań może być zastoso-

wanie klinów magnetycznych, o odpowiednio dobranej przenikalności, w stojanie silnika.

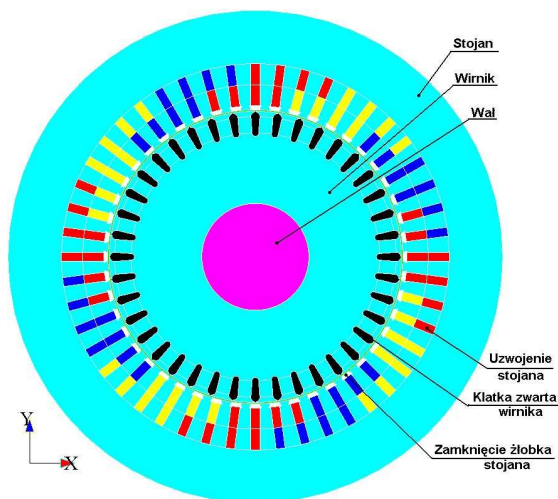
Zastosowanie zamknięcia żłobków klinami wykonanymi z materiału magnetycznie miękkiego w maszynach indukcyjnych powoduje podniesienie ich sprawności przy zachowaniu stałej wartości momentu rozruchowego w porównaniu do silników z klinami wykonanymi z materiałów niemagnetycznych [1]. Ponadto zastosowanie magnetycznego zamknięcia żłobka prowadzić powinno do zmniejszenia harmonicznych żłobkowych stojana oraz zmniejszenia strat związanych ze zmniejszeniem się prądu magnesującego [2]. Przyjmuje się też, że przy zasilaniu silników z przemienników częstotliwości konstrukcja maszyny powinna być odwrotna do klasycznej – żłobki stojana powinny być zamknięte, a wirnika otwarte.

Zależności te mogą jednak wykazywać różnice w przypadku silników pracujących w bardzo niskich temperaturach. Dlatego też celowym jest sprawdzenie wpływu wprowadzenia klinów magnetycznych do silnika „kriogenicznego” na przebieg jego podstawowych parametrów. Kliny magnetyczne powodują wygładzenie przebiegu indukcji magnetycznej, co wpływa na zmniejszenie współczynnika Cartera, a to z kolei pociąga za sobą zmianę prawie wszystkich parametrów maszyny. Uzyskanie dokładnej oceny zmian w maszynie, wskutek zastosowania klinów magnetycznych, wymaga zatem przeprowadzenia kompleksowych obliczeń wszystkich jej parametrów.

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych skutków wprowadzenia do konstrukcji silnika „kriogenicznego” o mocy około 1MW, klinów magnetycznych o różnej przenikalności magnetycznej. Badania symulacyjne metodą polowo-obwodową wykonano przy wykorzystaniu programu Flux2D [3]. W szczególności analizie i porównaniu poddano zmiany wartości przebiegu momentu elektromagnetycznego i prądu silnika z zastosowanymi klinami magnetycznymi w porównaniu z klinami klasycznymi-niemagnetycznymi. Zbadano także zmiany w przebiegu strumienia magnetycznego w szczelinie silnika. Analiza uzyskanych wyników ułatwi optymalizację parametrów silników przeznaczonych do pracy w bardzo niskich temperaturach.

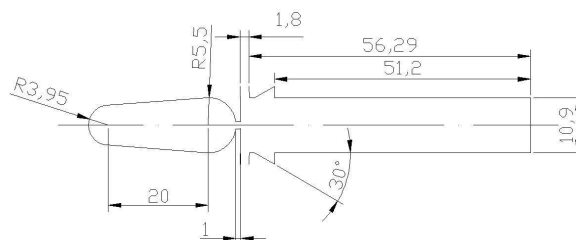
2. Badania symulacyjne

Analizę parametrów silnika pracującego w ciekłym azocie przeprowadzono dla silnika „kriogenicznego”, o obwodzie magnetycznym jak na rysunku 1. Silnik zawiera 48 żłobków w stojanie i 40 żłobków w wirniku. Na rysunku 2 przedstawiono kształt żłobków stojana i wirnika badanego silnika.

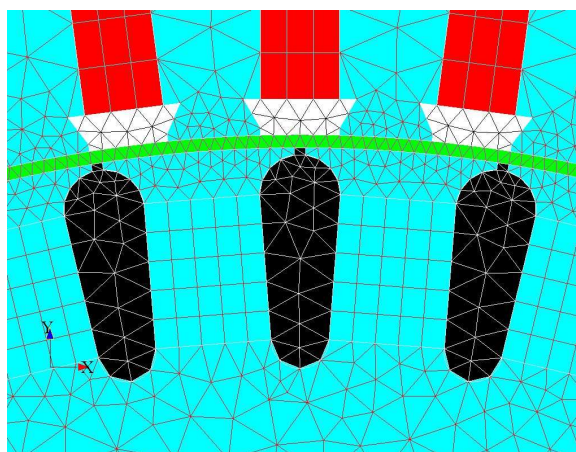


Rys.1. Model silnika „kriogenicznego” do badań symulacyjnych w programie Flux2D

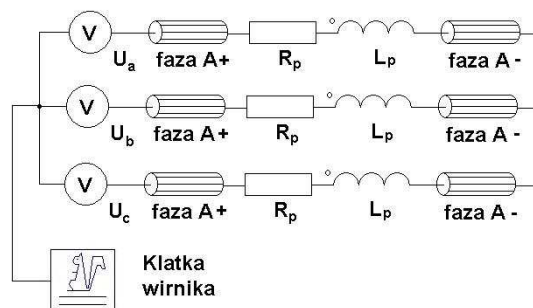
Na rysunku 3 przedstawiono wycinek badanego modelu z naniesioną siatką obliczeniową. Model obwodowy o wymuszeniu napięciowym uwzględnia parametry elektryczne układu zasilania oraz uzwojeń fazowych stojana o stałej rezystancji i indukcyjności połączeń czołowych. Schemat zastępczy modelu przedstawiono na rysunku 4.



Rys.2. Kształty żłobka stojana i wirnika badanego silnika „kriogenicznego”



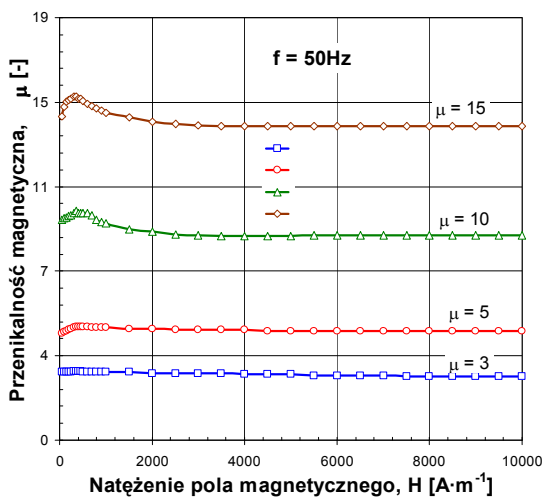
Rys. 3. Siatka dyskretyzacyjna do badań symulacyjnych w programie Flux2D



Rys. 4. Schemat zastępczy modelu do badań symulacyjnych w programie Flux2D (oznaczenia wg. programu Flux2D)

Jako klipy zamykające żłobki stojana zastosowano materiał magnetyczny magnetodielektryk [4] o przenikalności magnetycznej $\mu=3, 5, 10$ i 15 , którego charakterystyki $\mu=f(H)$ przedstawiono na rysunku 5.

Magnetodielektryki składają się z proszku magnetycznie miękkiego oraz dielektryku izolującego i wiążącego cząsteczki magnetyczne. Zastosowanie tego typu materiału magnetycznego na zamknięcie żłobków stojana wynika z szerokiej możliwości kształtowania jego parametrów magnetycznych, w prosty sposób, przez odpowiedni dobór komponentów.



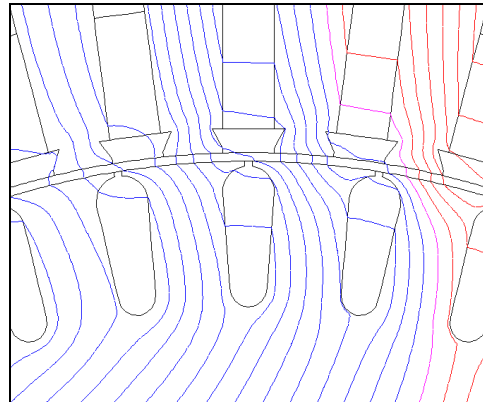
Rys.5. Przebiegi przenikalności magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego magnetodielektryków zastosowanych do zamknięcia żłobków stojana

2.1. Wyniki badań symulacyjnych

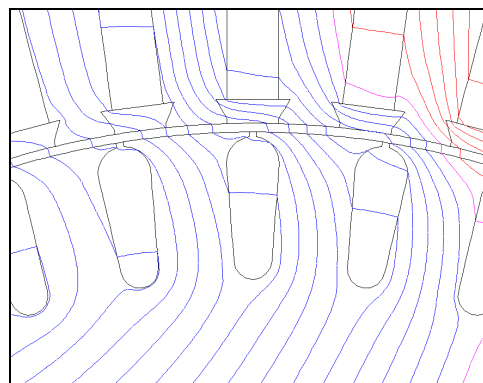
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przykładowe zmiany rozptyłu strumienia magnetycznego w przypadku zastosowania klinów niemagnetycznych (rys. 6) oraz klinów magnetycznych o przenikalności $\mu=10$ (rys. 7). Wyniki badań symulacyjnych przebiegów prądu i momentu silnika z klinami magnetycznymi i klinami niemagnetycznymi przedstawiono na rysunkach 8, 9 i 10. Na wykresach oraz w analizie wyników badań zastosowano następujące oznaczenia:

- Model-0 – model silnika z klasycznymi klinami dielektrycznymi,
- Model-1 – model silnika z klinami magnetycznymi o przenikalności $\mu=3$,
- Model-2 – model silnika z klinami magnetycznymi o przenikalności $\mu=5$,
- Model-3 – model silnika z klinami magnetycznymi o przenikalności $\mu=10$,
- Model-4 – model silnika z klinami magnetycznymi o przenikalności $\mu=15$,

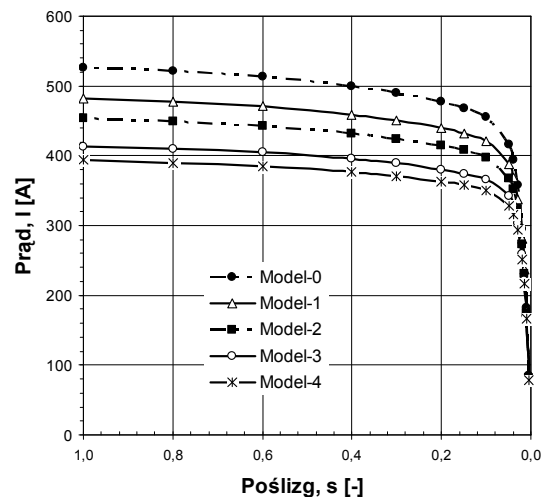
Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie w silniku „kriogenicznym” zamknięcia żłobków stojana klinami o właściwościach magnetycznych powoduje, że rozptył strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej i strefie przyszczelinowej ulega zmianie. Im wyższa przenikalność magnetyczna klina, tym większa część strumienia magnetycznego przebiega przez klin. Powoduje to obniżenie prądu silnika z klinami magnetycznymi w porównaniu do silnika klasycznego.



Rys.6. Rozptył strumienia magnetycznego w Modelu-0 dla poślizgu $s=0,01$



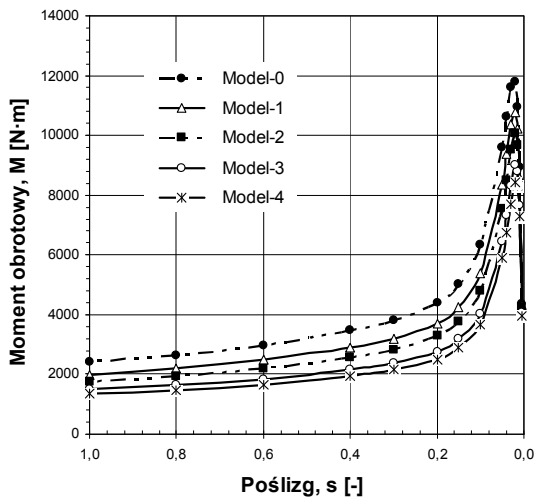
Rys.7. Rozptył strumienia magnetycznego w Modelu-3 dla poślizgu $s=0,01$



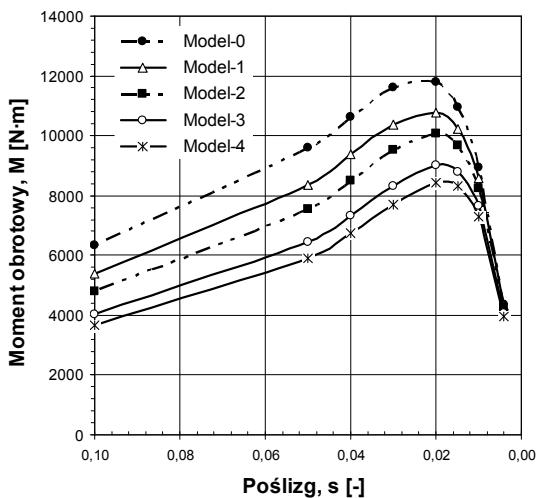
Rys.8. Przebiegi prądu silnika w funkcji poślizgu dla klinów o różnej przenikalności

Zastosowanie klina magnetycznego o przenikalności $\mu=3$ powoduje obniżenie prądu rozruchowego o około 8%, natomiast dla klina magnetycznego o przenikalności $\mu=15$ uzyskano obniżenie prądu rozruchowego o około 25%. Równocześnie zmniejszeniu ulega moment krytyczny i rozruchowy silnika. Dla klina magnetycznego o

przenikalności $\mu=3$ otrzymano o około 17% niższy moment rozruchowy i o około 8,5% niższy moment krytyczny. Dla modelu silnika z klinem magnetycznym o przenikalności $\mu=15$ uzyskano o około 44% niższy moment rozruchowy i o około 28% niższy moment krytyczny.



Rys.9. Przebiegi momentu elektromagnetycznego silnika w funkcji poślizgu dla klinów o różnej przenikalności



Rys.10. Przebieg momentu krytycznego silnika przy zastosowaniu klinów o różnej przenikalności magnetycznej

3. Wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne silnika przeznaczonego do pracy w ciekłym gazie naturalnym, w którym zamknięcie żłobków stojana wykonano klinami o różnej przenikalności magnetycznej wykazują, że ich zastosowanie przyniesie zarówno pozytywne jak i negatywne skutki. Do pozytywnych skutków należy zaliczyć obniżenie prądu rozruchowego silnika oraz

zmniejszenie zawartości harmonicznych w pobieranym prądzie, co ułatwia spełnienie warunków kompatybilności elektromagnetycznej napędu. Obniżenie prądu rozruchowego jest szczególnie korzystne przy napędzie pompy odśrodkowej. W przypadku takiego napędu, również obniżenie momentu rozruchowego silnika, a tym samym złagodzenie przebiegów dynamicznych należy uznać za korzystny skutek zastosowania klinów magnetycznych.

Jako niekorzystne należy uznać obniżenie momentu krytycznego silnika, co jest szczególnie istotne przy zasilaniu silnika z przemiennika częstotliwości w przypadku konieczności regulacji np. pompy odśrodkowej powyżej częstotliwości znamionowej napięcia zasilającego. Obniżenie momentu krytycznego skutkować będzie, w tym przypadku, obniżeniem maksymalnego zakresu regulacji.

W przypadku zasilania silnika wyłącznie z sieci o stałej częstotliwości w pewnych przypadkach zastosowanie klinów magnetycznych o odpowiednio dobranej przenikalności może być korzystne.

4. Literatura

- [1]. Y.Anazawa, A. Kaga, H. Akadami, S. Watabe, M. Makino, *A research of efficiency improvement by means of wedging with soft ferrite in small induction motors*, I.E.E. Transaction on Magnetic, Vol. Mag-18, No.6, s. 1547-1549, 1982,
- [2]. Y.Anazawa, A. Kaga, H. Akadami, S. Watabe, M. Makino, *Prevention of harmonic torques in squirrel cage induction motors by means of soft ferrite magnetic wedges*, I.E.E. Transaction on Magnetic, Vol. Mag-18, No.6, s. 1550-1552, 1982,
- [3]. CEDRAT, FLUX® 0.10 2D Application, User guide, vol.4, Solving and results postprocessing, March 2005.
- [4]. Węgliński Bogumił, *Soft magnetic PM materials*, Selected case studies in powder metallurgy, London, Institute of Metals 1991 The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy s. 113-129.

Autorzy

dr inż. Azarewicz Stanisław
tel.: (071) 320 38 06
stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl
mgr inż. Śniegoń Sławomir
tel.: (071) 320 37 18
slawomir.sniegon@pwr.wroc.pl
Prof. dr hab. inż. Węgliński Bogumił
tel.: (071) 320 34 76
bogumil.weglinski@pwr.wroc.pl
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów
Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław