

Lech Długiewicz, Jerzy Kolowrotkiewicz, Mikroma SA, Września
Wojciech Szląg, Politechnika Poznańska, Poznań
Barbara Ślusarek, Instytut Tele i Radiotechniczny, Warszawa

SILNIK MAGNETOELEKTRYCZNY DO POMPY PALIWA RAKIETOWEGO KRIOGENICZNEGO SYSTEMU NAPĘDOWEGO O MAŁEJ SILE CIĄGU

PERMANENT MAGNET MOTOR TO DRIVE PROPELLANT PUMP FOR LOW THRUST CRYOGENIC PROPULSIVE SYSTEMS

Abstract: The paper presents problems investigated by Mikroma in the project “In Space Propulsion”, realized within 7th Framework Programme of the European Union. The investigation concerns elaboration of an electric motor to propulsion of a fuel pump in the new concept of cryogenic rocket propulsion with small thrust force. The problems connected with elaboration of the motor suited to work in cryogenic conditions are discussed. Chosen results of investigations of the influence of cryogenic temperature on the properties of motor manufacturing materials are shown. Moreover, results of laboratory tests of built prototype motors are presented.

1. Wstęp

W ramach 7 Programu Ramowego finansowanego przez Unię Europejską realizowany jest program badawczy „In Space Propulsion” (ISP-1) koordynowany przez Zakłady SNECMA z Francji. Celem projektu są badania w zakresie opracowania nowego rodzaju napędu rakiety do statków kosmicznych. Badania w programie ISP-1 nie dotyczą startu rakiety z Ziemi [5, 6, 7]. Koncentrują się one na sposobie napędzania statku w kolejnych fazach misji po wyniesieniu go na tzw. orbitę niską. Wymagania dotyczące napędu po starcie rakiety zależą od przewidywanych celów misji. Misje te mogą m.in. polegać na przemieszczeniu ładunku użytkowego z orbity niskiej na orbitę geostacjonarną, zmiany orbity geostacjonarnej, lotów na Księżyc czy Marsa. Badania w programie ISP-1 koncentrują się głównie na idei napędu kriogenicznego o małej sile ciągu. Siła ta zawiera się w przedziale od 0,5 do 3 kN. W odróżnieniu od klasycznych napędów rakiety, w napędzie kriogenicznym o małej sile ciągu ciekłe czynniki napędowe podawane są bezpośrednio do komory spalania za pomocą pomp pracujących w warunkach kriogenicznych. W układach klasycznych wykorzystuje się do tego celu ciśnienie gazów. Zaletą proponowanego rozwiązania jest mniejsza masa zbiorników oraz prosta i mało czasochłonna procedura wielokrotnego uruchomienia silników [6, 7].

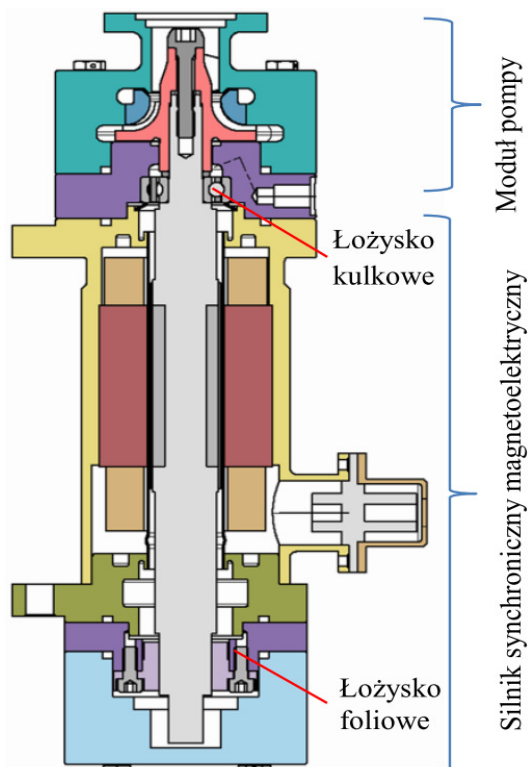
Prace MIKROMY w projekcie ISP-1 dotyczą opracowania, zbudowania oraz przebadania

wysokoobrotowego silnika synchronicznego magnetoelektrycznego przystosowanego do pracy w warunkach kriogenicznych. Podczas pracy silnika, w szczelinie między stojanem, a wirnikiem znajduje się paliwo rakiety (ciekły gaz ziemny lub ciekły wodór).

2. Silnik do napędu pompy paliwa

Zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne układu do pompowania ciekłego gazu pokazano na rys. 1. Do napędu pompy kriogenicznej wykorzystuje się wysokoobrotowy silnik synchroniczny o magnesach trwałych. Zakłada się, że będzie on zasilany przez układ energoelektroniczny z ogniwa paliwowego. W projekcie ISP-1 rozpatrywane są dwa typy rakietywych kriogenicznych układów napędowych o małej sile ciągu. W pierwszym wykorzystuje się jako czynniki napędowe ciekły wodór i ciekły tlen, a w drugim ciekły metan (CH₄) i ciekły tlen. Z przeprowadzonych rozważań [5, 6] wynika, że w celu uzyskania tej samej siły ciągu dla każdego z tych systemów, do napędu tej samej pompy paliwa trzeba zastosować silnik elektryczny o innej mocy i prędkości znamionowej. Dla przykładu dla siły ciągu 2kN i napędu typu ciekły wodór – ciekły tlen wymagana moc i prędkość znamionowa silnika elektrycznego wynoszą odpowiednio 2500W i 55000 obr/min, a dla napędu typu ciekły metan – ciekły tlen odpowiednio 620 W i 22000 obr/min [6, 7].

W opracowanej konstrukcji silnika przyjęto, że przez szczelinę między stojanem a wirnikiem przepływa niewielki strumień ciekłego gazu. Ma on zapewnić dobre chłodzenie stojana oraz umożliwić pracę tzw. łożyska foliowego (rys. 1).



Rys. 1. Silnik do napędu pompy paliwa

Łożysko to charakteryzuje się bardzo małym momentem oporowym. Natomiast od strony czopu wału zastosowano przystosowane do pracy w warunkach kriogenicznych łożysko ceramiczne. Przewiduje się, że pompa z silnikiem przez cały czas lotu będą znajdować się w warunkach kriogenicznych. Zatem silnik musi być przystosowany do pracy w temperaturze ciekłego gazu ziemnego (-165°C) lub ciekłego wodoru (-240°C), a jego podzespoły odporne na działanie czynnika napędowego.

Docelowo, pompa paliwa i silnik napędowy mają być dostosowane do pracy z ciekłym wodorem lub z ciekłym metanem. Jednakże ze względów bezpieczeństwa przyjęto, że pierwsze testy opracowanego układu będą przeprowadzone w ciekłym azocie, tj. w temperaturze -196°C . W celu zapewnienia takiej samej wydajności pompy pracującej w ciekłym azocie, jak przy pompowaniu ciekłego wodoru czy metanu przyjęto, że wymagana znamionowa moc i prędkość obrotowa silnika wynoszą odpowiednio 1600 W i 16000 obr/min [6, 7].

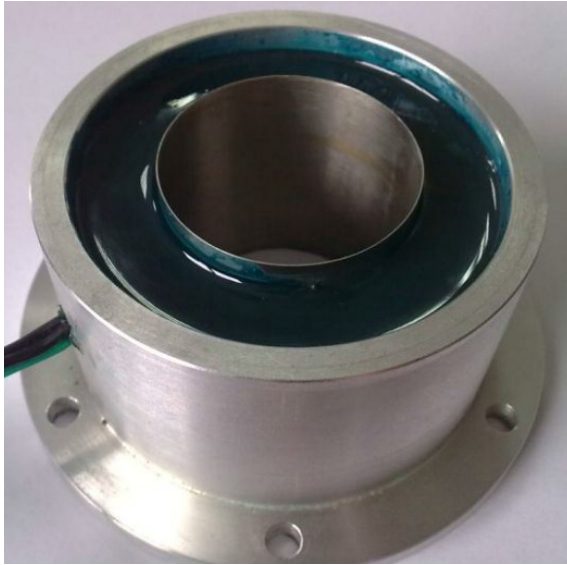
3. Obliczenia projektowe

Obliczenia projektowe silnika przeprowadzono przy wykorzystaniu połowego modelu zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w maszynie elektrycznej. Do rozwiązania równań modelu wykorzystano metodę elementów skończonych węzłowych i krawędziowych. Algorytm formułowania równań modelu dyskretnego zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych oraz sposób ich rozwiązywania przedstawiono szczegółowo w pracach [1, 2, 4, 8]. W opracowanym algorytmie obliczeń i oprogramowaniu uwzględniono m.in. wpływ temperatury na właściwości elektryczne oraz magnetyczne materiałów elektrycznie i magnetycznie czynnych. Znajomość właściwości magnetycznych, elektrycznych i mechanicznych materiałów w temperaturze kriogenicznej jest niezbędna do zaprojektowania silnika. Istotna jest także wiedza o wpływie szoków temperaturowych na wymienione właściwości materiałów. W dostępnej literaturze nie są prezentowane wyniki takich badań [3]. Dlatego w ramach prowadzonych prac, przed przystąpieniem do projektowania, przeprowadzono badania wpływu temperatury kriogenicznej na wybrane właściwości elektryczne, magnetyczne i mechaniczne materiałów przewidzianych do budowy silnika.

4. Badanie wpływu temperatury na właściwości materiałów

Zarówno przy pracy w temperaturze ciekłego metanu, azotu czy wodoru w materiałach elektrycznie czynnych wykorzystanych do budowy silnika nie występuje zjawisko nadprzewodnictwa [3]. Obserwuje się natomiast znaczne zmniejszenie rezystywności materiałów przewodzących prąd oraz zmianę właściwości magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich i twardych. Przykładowe wyniki badania wpływu temperatury na rezystancję uzwojenia wykonanego z miedzi podano w tabeli 1. Badania przeprowadzono dla stojana modelowego trójfazowego silnika o strukturze pokazanej na rys. 2. W tabeli podano średnią arytmetyczną z pomiarów trzech rezystancji uzwojeń fazowych. Ze względu na niebezpieczeństwo wybuchu nie przeprowadzono badań w ciekłym wodorze i metanie. Pomiarów przeprowadzono w temperaturze otoczenia (20°C), temperaturze wrzącego azotu (-196°C) i wrzącego helu (-269°C). Badania przeprowadzono w MIKRO-

MIE i w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk, Oddział w Odolanowie.



Rys. 2. Stojan badanego silnika modelowego

Tabela 1. Wpływ temperatury na rezystancję uzwojeń wykonanych z miedzi

Powietrze 20°C	Ciekły azot -196°C	Ciekły hel -269°C
0,322 Ω	0,0397 Ω	0,00204Ω

Z tabeli 1 wynika, że rezystancja uzwojenia wykonanego z miedzi po jego umieszczeniu w ciekłym azocie i ciekłym helu jest odpowiednio około 8 i 158 razy mniejsza od rezystancji zmierzonej w temperaturze otoczenia.

Badano również wpływ temperatury na właściwości magnetyczne i elektryczne magnesów wykonanych z proszków magnetycznie twarde. Pomiary przeprowadzono w Instytucie Tele i Radiotechnicznym oraz w MIKROMIE. Analizowano m.in. wpływ szoku temperaturowego na zmianę tych właściwości. Wybrane wyniki badań zestawiono w tabeli 2. Wynika z nich, że po szoku temperaturowym właściwości magnetyczne badanego materiału nieznacznie pogorszyły się. Ponadto, ze względów konstrukcyjnych i technologicznych, rozpatrzono także wpływ temperatury na zmianę wymiarów i wytrzymałość mechaniczną materiałów wytypowanych do zbudowania silnika. W tabeli 3 zaprezentowano wybrane wyniki badania wpływu jednokrotnego szoku temperaturowego na właściwości mechaniczne próbek magnesów wykonanych z materiału proszkowego. Cykl badań polegał na pomiarze właściwości mechanicznych na populacji próbek przed i po poddaniu ich oddziaływaniu temperatury kriogenicz-

nej. Pomiary po wyjęciu próbek z ciekłego gazu wykonano po zwiększeniu się ich temperatury do temperatury otoczenia. Można zauważyć, że po szoku temperaturowym właściwości mechaniczne materiału uległy nieznacznej poprawie. Analizowano również wpływ temperatury na wytrzymałość na ścinanie połączenia rdzenia wirnika z wałem oraz wytrzymałość tworzywa do zalewania uzwojenia stojana. Rozpatrywano połączenie klejone i połączenie moletowane rdzenia z wałem. Jeden z wykonanych wirników modelowych pokazano na rys. 3. Stanowisko prób pokazano na rys. 4, a uzyskane wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 4. Odnośnie tworzywa do zalewania stojana nie stwierdzono jego pęknięcia czy rozwarstwiania pod wpływem szoków temperaturowych.

Tabela 2. Wpływ temperatury na właściwości magnetyczne i elektryczne dielektromagnesu

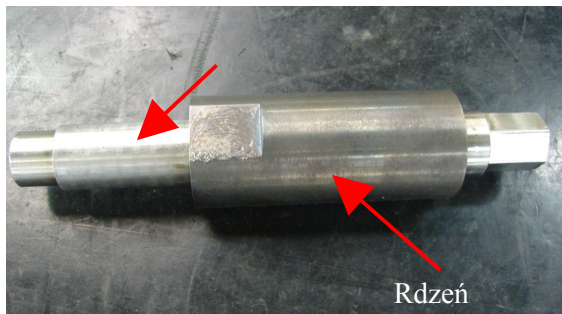
Właściwości magnetyczne				Rezystywność	Uwagi
B_r mT	H_{cJ} kA/m	H_{cB} kA/m	$(BH)_m$ kJ/m ³	ρ_{el} $\mu\Omega m$	
662	727	438	72,9	38	przed szokiem
668	711	432	72,5	38	po szokiu

Tabela 3. Wpływ temperatury na właściwości mechaniczne dielektromagnesu

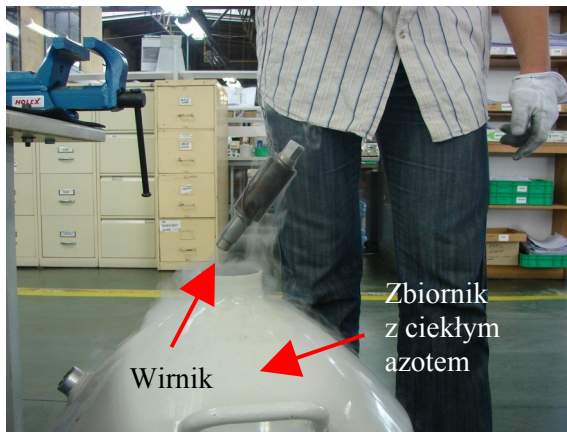
Parametr	Przed włożeniem do azotu	Po wyjęciu z azotu
Twardość w skali Brinell'a, HB	60	62
Wytrzymałość na ściskanie statyczne, MPa	162	164
Wytrzymałość na zginanie, MPa	63	65
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	25	33

Tabela 4. Wytrzymałość połączenia rdzeń-wał

Parametr	Wał gładki połączenie klejone		Wał moletowany	
	20°C	-196°C	+20°C	-196°C
Temperatura wirnika				
Moment niszczący	>200 Nm	40 Nm	>200 Nm	>200 Nm



Rys. 3. Wirnik modelowy



Rys. 4. Wirnik modelowy po wyjęciu z ciekłego azotu

5. Silniki modelowe

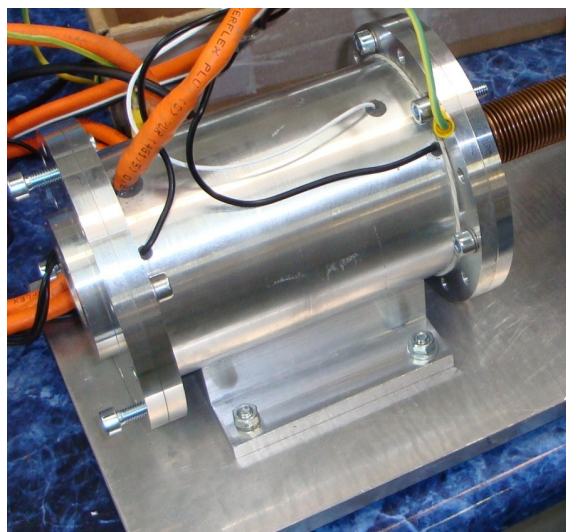
Wykorzystując wyniki przeprowadzonych badań materiałów oraz opracowane oprogramowanie do analizy i projektowania silników synchronicznych o magnesach trwałych zaprojektowano silnik przystosowany do pracy w ciekłym azocie. Wykonano dwa prototypy tego typu silnika różniące się sposobem zalewania tworzywem uzwojeń stojana i formowania drogi przepływu cieczy przez szczelinę. W silnikach tych zastosowano łożyska kulkowe o powiększonym luzie. Wybrane podzespoły silników pokazano na rysunkach 5, 6 i 7.



Rys. 5. Rdzeń stojana silnika prototypowego



Rys. 6. Podzespoły wirnika

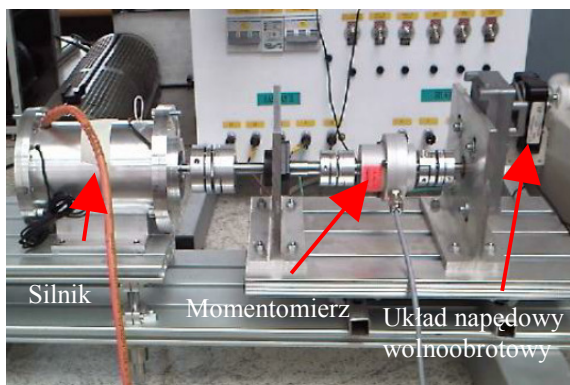


Rys. 7. Silnik prototypowy

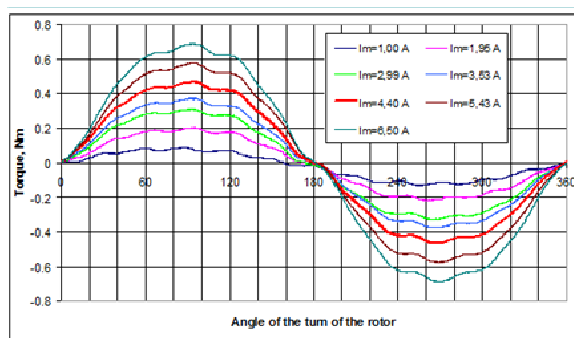
W MIKROMIE przeprowadzono badania silnika prototypowego w temperaturze otoczenia i w ciekłym azocie (rys. 8). Podczas badań silnik zasilano z przemiennika częstotliwości typu FC 302 firmy Danfoss. Zastosowany przemiennik jest przystosowany do bezczujnikowego sterowania silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. Przeprowadzone badania wskazują, że opracowane silniki spełniają stawiane przed nimi wymagania. Na rysunku 9 pokazano silnik na stanowisku prób w Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej podczas wyznaczania zależności momentu elektromagnetycznego T od kąta obrotu wału α przy zasilaniu uzwojeń stojana prądem stałym. Wartości prądów w poszczególnych uzwojeniach fazowych dobierano w taki sposób, by odwzorować zadaną chwilę czasową. Badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia dla kilku zadanych wartości prądów fazowych, a uzyskane wyniki pokazano na rys. 10.



Rys. 8. Silnik prototypowy podczas prób w ciekłym azocie



Rys. 9. Silnik na stanowisku do wyznaczania charakterystyk $T(\alpha)$



Rys. 10. Charakterystyki $T(\alpha)$ dla $I_m = \text{const}$

6. Podsumowanie

Po zakończeniu badań silników prototypowych, biorąc pod uwagę wynikające z nich wnioski, przystąpiono do opracowania i zbudowania wersji silnika przeznaczonego do napędu pompy ciekłego azotu w specjalnie do tego celu zbudowanej instalacji z ciekłym azotem. Waż-

ne i mocowanie silnika przystosowano do połączenia z turbiną pompy (rys. 11) oraz z instalacją gazową. W silniku zastosowano jedno łożysko foliowe. Instalację zbudowano w Belgii na poligonie badań kriogenicznych Uniwersytetu w Liege. Fragment tej instalacji pokazano na rys. 12. Aktualnie trwają intensywne prace nad oprzyrządowaniem i testowaniem stanowiska. Próby pompy są zaplanowane na koniec marca 2012 roku. Pozwolą one m.in. w pełni zweryfikować przydatność opracowanego silnika do napędu pompy kriogenicznej. W dalszych etapach prac przewiduje się wykorzystanie opracowanej pompy do pompowania ciekłego metanu.



Rys. 11. Turbina pompy kriogenicznej



Rys. 12. Poligon kriogeniczny w Liege

7. Literatura

- [1]. Barański M., Demenko A., Łyskawiński W., Szląg W.: *Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor*, COMPEL, 2011, 30, (3), pp 832 – 840.
- [2]. Barański M., Szląg W., *Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor working at cryogenic temperature*, Proceedings of VIII International Conference

on Computation in Electromagnetics - CEM'2011, 11 – 14 April 2011, Wrocław, pp. 144-145.

[3]. Flynn T. M.: *Cryogenic Engineering*, Second edition, CRC Press, New York 2005.

[4]. Kołowrotkiewicz J., Barański M., Szeląg W. Długiewicz L: *FE analysis of induction motor working in cryogenic temperature*, COMPEL, 2007, 26, (4), pp. 952–964.

[5]. Lemaitre A., Marciquet C., *Propellant electric pump for low thrust cryogenic propulsive systems*, 4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS).

[6]. Muszynski M., Alliot P., *The In-Space Propulsion (ISP-1) Project*, 61st International Astronautical Congress, Prague 2010, IAF, IAC-10.C4.3.10.

[7]. Muszynski M., Alliot P., *Progress of the In-Space Propulsion (ISP-1) Project*, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 2011, San Diego, California.

[8]. Szeląg W., *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magneto-reologiczną*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010, stron 138.

Informacje dodatkowe

Prace w Projekcie ISP-1 zrealizowano w ramach 7 Programu Ramowego współfinansowanego przez Unię Europejską (Projekt nr 218849).

Autorzy

Dr inż. Lech Długiewicz, MIKROMA SA

ul. Batorego 4, 62-300 Wrzeźnia

e-mail: dlugiewicz@mikroma.com

Dr inż. Jerzy Kołowrotkiewicz

MIKROMA SA

ul. Batorego 4, 62-300 Wrzeźnia

e-mail: jerzykol@icpnet.pl

Prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

Politechnika Poznańska

Instytut Elektrotechniki i Elektroniki

ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

e-mail: wojciech.szlag@put.poznan.pl

Dr hab. inż. Barbara Ślusarek

Instytut Tele i Radiotechniczny

ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa

e-mail: barbara.slusarek@itr.org.pl