

Stanisław Azarewicz, Dominika Gaworska, Bogumił Węgliński
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

BADANIA BLACH PRĄDNICOWYCH PRZEZNACZONYCH DO SILNIKÓW PRACUJĄCYCH W CIEKŁYCH GAZACH

GENERATOR SHEETS DESIGNED FOR WORK IN MOTORS IN LIQUID NATURAL GASES

Abstract: The squirrel-cage asynchronous motors working in liquid natural gasses place the particular requirements concerned both active materials and insulation, fastening, electrical connections etc. Generator sheets, used in magnetic core of motor, their insulation and way of packeting are only few essential elements which have the influence on parameters and durability of the motors working in range of temperatures -160°C - -196°C . 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. On the grounds of the obtained results and analysis of literature the kind and thickness of electrical sheet used in construction of magnetic core of motors working in liquid gasses was chosen.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój gospodarki światowej wymusza, między innymi, konieczność poszukiwania nowych źródeł energii. Jednym z nich jest z całą pewnością ciekły gaz naturalny. Wzrost zainteresowania wykorzystaniem ciekłego gazu jako źródła energii, alternatywnego dla ropy naftowej związany jest z opracowaniem efektywnych i tanich metod jego skraplania, transportowania i przechowywania. Ciekły gaz naturalny (LNG) stwarza pewne problemy ze względu na swoją niską temperaturę (-161°C), a także skład chemiczny oddziałujący na niektóre materiały. Dotyczy to także silników elektrycznych pracujących w urządzeniach technologicznych, w których wykorzystywany jest ciekły gaz naturalny. Przykładem mogą być pogrążalne pompy stosowane w systemach jego przepompowywania. 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 [1, 4]. Jednym z podstawowych elementów maszyny elektrycznej jest jej magnetowód. Istotne jest, zatem poznanie zmian parametrów magnetycznych powszechnie stosowanych blach prądnicowych oraz poznanie zachowań ich

izolacji podczas pracy w niskiej temperaturze. Umożliwi to prawidłowe obliczanie i projektowanie silników przeznaczonych do pracy w ciekłych gazach. W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych blach prądnicowych w ciekłym azocie (LN_2) i porównanie uzyskanych wyników z badanymi w temperaturze pokojowej. Temperatura ciekłego azotu (-196°C) jest niższa od temperatury gazu naturalnego, a prowadzone badania nie wymagają szczególnych środków ostrożności.

2. Badania blach prądnicowych

Celem badań było określenie zmian w charakterystykach magnesowania oraz stratnościach blach prądnicowych powszechnie stosowanych w konstrukcji maszyn elektrycznych po ich schłodzeniu do temperatury ciekłego azotu. Badaniom poddano blachy prądnicowe Stalproduktu o dwóch grubościach: 0,35 i 0,50 mm, pokryte różnymi typami izolacji. Podstawowe dane dotyczące badanych blach przedstawiono w tabeli 1. Badania magnetyczne blach przeprowadzono, na próbkach pierścieniowych o wymiarach 50/60 mm i grubości pakietu blach wynoszącego 5 mm. Parametry te wynikają z wymagań zastosowanej do badania aparatury, którą stanowił komputerowy zestaw do pomiarów magnetycznych typu MAG – TD200. Badano zmiany charakterystyk

Tabela 1. Badane blachy prądnicowe [3]

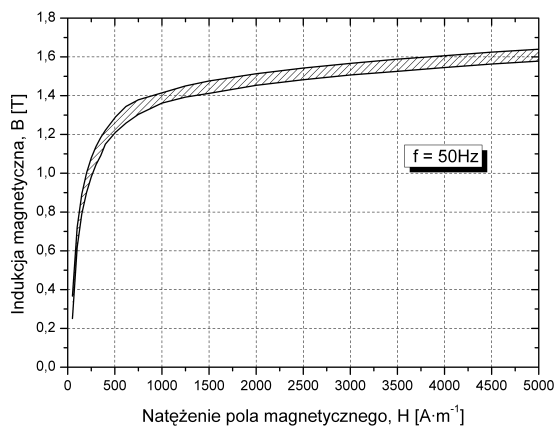
Oznaczenie blachy	Grubość d [mm]	Indukcja magnetyczna (f=50Hz), B [T]		Stratność całkowita przy f=50 Hz	
		H = 2,5kAm ⁻¹	H = 5,0kAm ⁻¹	B=1,0T	B=1,5 T
35C3	0,35	1,49	1,60	1,30	3,30
35C4					
35C6					
50C3	0,50	1,49	1,60	1,35	3,30
50C4					
50C6					

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

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 . Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 1, 2, i 3 oraz w tabelach 2,3 i 4.

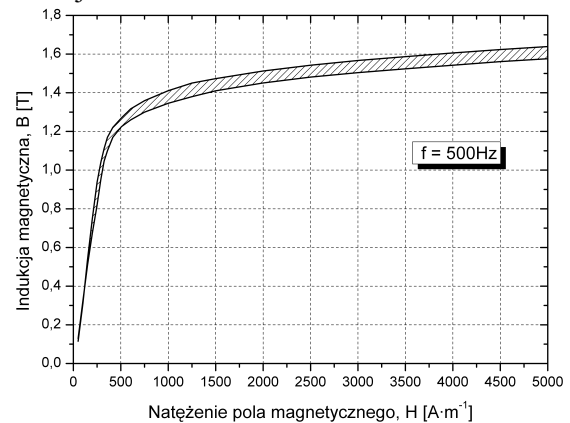
Tabele zawierają wyniki pomiaru indukcji magnetycznej dla dwóch wartości natężenia pola: $H = 2,5 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ oraz $H = 5,0 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ przy częstotliwościach 50 Hz , 500 Hz , 1000 Hz .

Zarówno z wykresów przedstawionych na rys. 1 – 3 jak i w tabelach 2 – 4 wynika, że schładzanie blach prądnicowych o różnej grubości i różnym typie izolacji ma niewielki wpływ na przebieg ich charakterystyk magnesowania. Wyniki pomiarów wykazują, że zmiany indukcji związane z temperaturą dla poszczególnych blach nie przekraczają 3%. Zasadnicze różnice w przebiegu krzywych magnesowania występują w nachyleniu prostoliniowych części charakterystyk, co wpływa na maksymalną przenikalność magnetyczną (μ_{max}) [2].

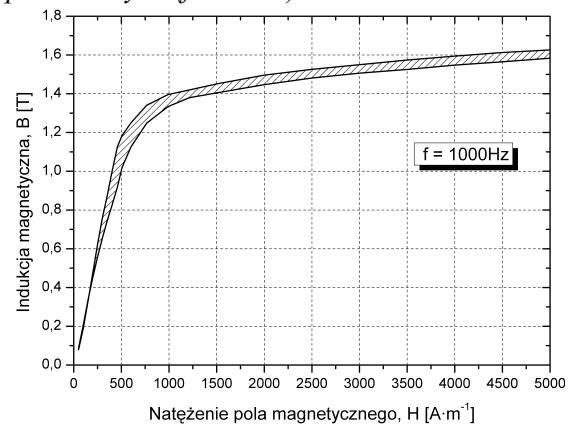


Rys. 1. Pasma indukcji magnetycznej osiągniętej przez badane blachy w obu temperaturach pomiarowych ($f=50 \text{ Hz}$)

Drugim istotnym parametrem, niezbędnym projektantom silników, jest stratność blach. 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.



Rys. 2. Pasma indukcji magnetycznej osiągniętej przez badane blachy w obu temperaturach pomiarowych ($f=500 \text{ Hz}$)



Rys. 3. Pasma indukcji magnetycznej osiągniętej przez badane blachy w obu temperaturach pomiarowych ($f=1000 \text{ Hz}$).

Tabela 2. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej badanych blach przy częstotliwości 50Hz

Blacha	Indukcja magnetyczna, B [T]			
	H=2,5kA·m ⁻¹		H=5,0kA·m ⁻¹	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	1,48	1,51	1,58	1,60
35C4	1,51	1,54	1,61	1,63
35C6	1,50	1,53	1,60	1,63
50C3	1,50	1,53	1,61	1,63
50C4	1,50	1,53	1,60	1,63
50C6	1,51	1,54	1,61	1,64

Tabela 3. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej badanych blach przy częstotliwości 500Hz

Blacha	Indukcja magnetyczna, B [T]			
	H=2,5kA·m ⁻¹		H=5,0kA·m ⁻¹	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	1,48	1,51	1,58	1,60
35C4	1,51	1,54	1,61	1,63
35C6	1,49	1,53	1,60	1,63
50C3	1,481	1,53	1,59	1,63
50C4	1,49	1,53	1,60	1,62
50C6	1,50	1,54	1,61	1,64

Tabela 4. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej badanych blach przy częstotliwości 1000Hz

Blacha	Indukcja magnetyczna, B [T]			
	H=2,5kA·m ⁻¹		H=5,0kA·m ⁻¹	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	1,48	1,51	1,58	1,61
35C4	1,49	1,53	1,60	1,63
35C6	1,47	1,53	1,59	1,63
50C3	1,47	1,51	1,59	1,61
50C4	1,49	1,51	1,61	1,62
50C6	1,47	1,52	1,58	1,62

Podobnie jak pomiary charakterystyk magnesowania stratność całkowitą określono dla częstotliwości przemagnesowania $f = 50, 500$ i 1000 Hz. Wyniki pomiarów zestawiono w tabelach 5, 6, i 7.

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabelach 5–7 straty całkowite przy częstotliwości przemagnesowania blach $f = 50$ Hz okazały się nieco większe od podawanych przez wytwórcę. Zwiększenie strat może być skutkiem zarówno tolerancji technologicznych przy produkcji blach jak również, efektem wycinania próbek pierścieniowych o stosunkowo małej różnicy średnic. Próbkę o przyjętych wymiarach mają jednakże pewną zaletę – lepiej przybliżają wzrost strat w wyniku wycinania zębów stojana i wirnika. Straty całkowite blach przemagnesowywanych przemiennym strumieniem składają

się głównie ze strat histerezy i wiroprądowych. W tabelach 8 i 9 przedstawiono przykładowe wartości strat histerezy i wiroprądowych przy częstotliwości 50 Hz, rozdzielone metodą częstotliwościową. Wyniki pomiarów wskazują na przeważający udział w stratach, dla każdego typu blachy strat histerezy, co może wskazywać na istnienie znaczących naprężeń mechanicznych w badanych próbkach blach. Dodatkowo wystąpiły różnice w wartościach strat zarówno całkowitych jak i histerezy oraz wiroprądowych blach pokrytych różnymi typami izolacji. Najmniejsze straty otrzymano dla blach pokrytych izolacją C4 (izolacja nieorganiczna o zwiększonej wytrzymałości termicznej). Dotyczy to zarówno badanych blach o grubości 0,35 mm jak i 0,50 mm.

Tabela 5. Stratność całkowita badanych blach prądnicowych przy częstotliwości 50Hz

Blacha	Stratność całkowita, p [$W \cdot kg^{-1}$] przy 50Hz			
	B=1,0T		B=1,5T	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	1,72	1,95	3,99	4,51
35C4	1,53	1,77	3,62	4,05
35C6	1,78	1,97	4,03	4,45
50C3	1,58	1,90	3,64	4,27
50C4	1,57	1,72	3,58	3,89
50C6	1,53	1,72	3,44	3,87

Tabela 6. Stratność całkowita badanych blach prądnicowych przy częstotliwości 500Hz

Blacha	Stratność całkowita, p [$W \cdot kg^{-1}$] przy 500Hz			
	B=1,0T		B=1,5T	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	41,14	50,86	92,91	115,8
35C4	37,28	50,96	83,44	112,4
35C6	41,29	53,51	91,52	117,1
50C3	55,94	72,43	129,6	165,8
50C4	53,58	59,77	117,3	132,6
50C6	55,08	63,16	122,1	142,2

Tabela 7. Stratność całkowita badanych blach prądnicowych przy częstotliwości 1000Hz

Blacha	Stratność całkowita, p [$W \cdot kg^{-1}$] przy 1000Hz			
	B=1,0T		B=1,5T	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	114,5	148,1	240,0	325,1
35C4	111,7	146,5	234,2	306,8
35C6	121,9	151,7	246,9	328,1
50C3	179,8	221,1	386,4	494,3
50C4	168,1	188,6	358,6	419,8
50C6	175,0	198,7	388,4	459,0

3. Analiza wyników

Przeprowadzone badania próbek blach prądnicowych o grubościach 0,35 mm i 0,50 mm wykazały, że zmiana charakterystyki magnesowania blach dla częstotliwości 50 Hz w ciekłym azocie jest stosunkowo niewielka i zmniejszenie wartości indukcji magnetycznej B wynosi około 3%. Zmiany w nachyleniach obszaru prostoliniowego krzywych magnesowania blach związane są ze wzrostem strat całkowitych w blachach, wynoszącym przy częstotliwości 50 Hz około 10% - 20% [2]. Wpływ niskiej temperatury na parametry blach uwidacznia się mocniej przy wyższych częstotliwościach ich przemagnesowania. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono względny spadek maksymalnej przenikalności magnetycznej oraz względny przyrost stratności całkowitej badanych blach w temperaturze ciekłego azotu. Z przedstawionych rysunków wynika, że najwięk-

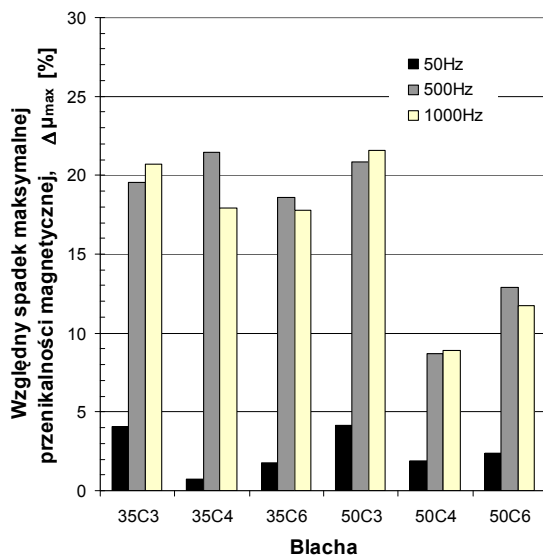
sze zmiany przenikalności magnetycznej i stratności całkowitej uzyskano dla blach o grubości 0,35 mm. Analiza udziału strat histerezowych i wiropądowych w ogólnych stratach przy częstotliwości 50 Hz w temperaturze otoczenia i ciekłego azotu wskazuje na dominujący udział strat histerezowych zarówno w blachach o grubości 0,35 mm jak i 0,50 mm, z tym że straty całkowite w blachach 0,50 mm w temperaturze otoczenia i w ciekłym azocie są niższe niż w blachach o grubości 0,35 mm. W wyższych częstotliwościach, blachy o grubości 0,35 mm charakteryzują się niższą stratnością niż blachy 0,50 mm. Dominujący udział w stratach mają wówczas straty wiropądowe. Zależność ta wskazuje na celowość stosowania cienkich blach o małej stratności w silnikach zasilanych napięciem o podwyższonej częstotliwości lub mocno odkształconym.

Tabela 8. Straty z histerezy badanych blach prądnicowych przy częstotliwości 50Hz

Blacha	Straty z histerezy, p_h [$W \cdot kg^{-1}$]			
	B=1,0T		B=1,5T	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	1,41	1,52	3,20	3,52
35C4	1,24	1,32	2,94	3,02
35C6	1,42	1,52	3,19	3,42
50C3	1,07	1,18	2,46	2,67
50C4	1,10	1,20	2,47	2,70
50C6	1,00	1,10	2,23	2,48

Tabela 9. Straty z prądów wirowych badanych blach prądnicowych przy częstotliwości 50Hz

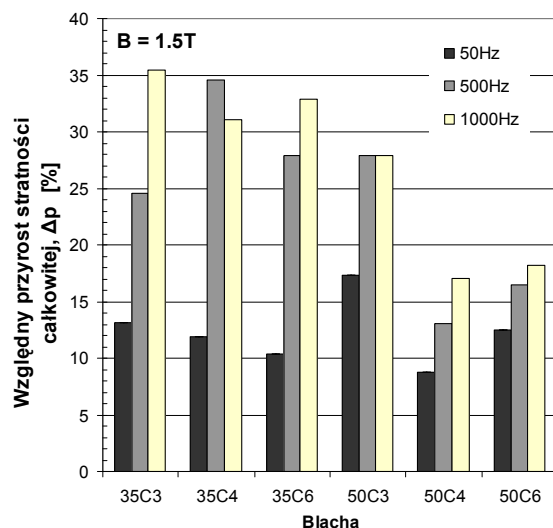
Blacha	Straty z prądów wirowych, p_e [$W \cdot kg^{-1}$]			
	B=1,0T		B=1,5T	
	T=25°C	T=-196°C	T=25°C	T=-196°C
35C3	0,31	0,43	0,79	1,00
35C4	0,29	0,45	0,66	1,03
35C6	0,36	0,45	0,86	1,03
50C3	0,51	0,72	1,18	1,61
50C4	0,47	0,53	1,11	1,20
50C6	0,52	0,62	1,22	1,39



Rys. 4. Względny spadek maksymalnej przenikalności magnetycznej w temperaturze ciekłego azotu w stosunku do przenikalności zmierzonej w temperaturze pokojowej

Interesującym zjawiskiem jest wpływ rodzaju izolacji blach na wartość strat. Przyczyny tego mogą leżeć zarówno po stronie technologicznej (partia blach, proces walcowania), jak również może występować pewien wpływ izolacji na odkształcenia krawędzi blach podczas wykrawania próbek oraz upływności izolacji. Ustalenie przyczyn 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. Największe pogorszenie parametrów stratności i przenikalności magnetycznej stwierdzono w blachach pokrytych izolacją C3 (izolacja organiczna o dobrej wykrawalności).



Rys. 5. Względny przyrost stratności całkowitej, w temperaturze ciekłego azotu w stosunku do stratności zmierzonej w temperaturze pokojowej

4. Wnioski

Przeprowadzone badania porównawcze zmian podstawowych parametrów magnetycznych blach prądnicowych o grubościach 0,35 i 0,50 mm w temperaturze otoczenia i ciekłego

azotu przy częstotliwości przemagnesowania 50 Hz pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Schładzanie blach prądnicowych do temperatury ciekłego azotu (-196°C) w nieznacznym (około 3%) stopniu wpływa na pogorszenie 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.
- Stwierdzono zależność pomiędzy stratnością blach a rodzajem zastosowanej izolacji. Najlepsze parametry uzyskano dla blach pokrytych izolacją C4. Prawdopodobnie ta wymaga jednakże potwierdzenia w dalszych badaniach.

Na podstawie uzyskanych wyników można przyjąć, że do realizacji silników indukcyjnych pracujących w ciekłych gazach można zastosować blachę prądnicową o grubości 0,50 mm pokrytą izolacją typu C4.

Przeprowadzone badania wpływu wyższej częstotliwości magnesowania na parametry blach wskazują istotną zależność przenikalności magnetycznej i stratności od częstotliwości.

Otrzymane wyniki przedstawione na wykresach wskazują, że największe zmiany maksymalnej przenikalności magnetycznej i stratności występują przy zwiększeniu częstotliwości przemagnesowania do 500 Hz. Zwiększenie częstotliwości przemagnesowania próbek z 500 Hz na 1000 Hz, skutkuje znacznie mniejszym spadkiem maksymalnej przenikalności i wzrostem stratności (przy indukcji B równej 1,5 T). Wzrost strat w blachach grubszych (0,50 mm) jest większy niż w blachach cieńszych, a główny udział w stratach całkowitych mają straty wiropądowe.

Uzyskane wyniki wskazują, że w silnikach zasilanych napięciem o podwyższonej częstotliwości (np. powyżej 400 Hz) celowe jest stosowanie blach o grubościach mniejszych od 0,35 mm i obniżonej stratności.

5. Literatura

[1]. S. Azarewicz, A. Buniowski, D. Gaworska, B. Węgliński, "Research of behaviour of electrical sheets in cryogenic temperatures", Electromagnetic

phenomena in nonlinear circuits. XVIII Symposium. Proceedings EPNC 2004,

[2]. S. Azarewicz, A. Buniowski, D. Gaworska, B. Węgliński, "Performance of chosen magnetic materials in cryogenic temperatures". Sixth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. 6th UEES '04.

[3]. „Cold rolled electrical steel”, Katalog Stalproduct S.A. Bochnia 2004,

[4]. K. Adamczyk, S. Azarewicz, A. Buniowski, A. Mierzwiak, B. Węgliński, "Tests of materials for applications in cryogenic environment", SPR#10/2004,

Informacje o autorach

Dr inż. Stanisław Azarewicz,

mgr inż. Dominika Gaworska

Prof. Dr hab. inż. Bogumił Węgliński

Politechnika Wrocławska,

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych,

ul. Smoluchowskiego 19,

50-372 Wrocław,

tel.+48 (0-71) 320-38-06,

e-mail: stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl

e-mail: dominika.gaworska@pwr.wroc.pl

e-mail: bogumil.weglinski@pwr.wroc.pl