

Tadeusz Janowski*, Beata Kondratowicz-Kucewicz**, Grzegorz Wojtasiewicz**

*Politechnika Lubelska, Lublin

**Instytut Elektrotechniki, Warszawa

NADPRZEWODNIKOWE MASZYNY ELEKTRYCZNE W NAPĘDACH JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH

SUPERCONDUCTING ELECTRIC MACHINES IN WATERCRAFT

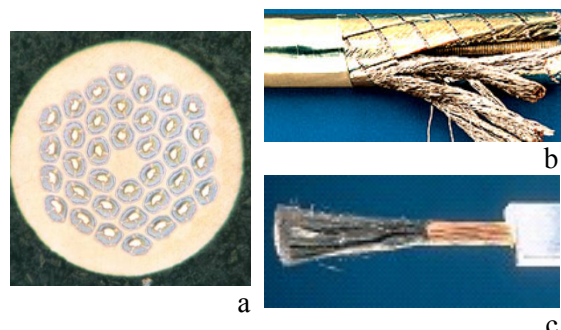
Abstract: Superconductors, especially high temperature superconductors (HTS) are used in electric machines. Superconducting generators and motors have smaller mass and overall dimensions in comparison to conventional machines. Because of these specific quality that solutions are interested for ship propulsion applications. Current density in HTS superconducting winding may be two orders of magnitude higher than in copper windings, which allows to reach two times higher magnetic field density in the gap of synchronous machine, even without iron in the rotor and slots in the stator of the motor. Such design of synchronous machine can substantially reduce the distortion of current and voltage waveforms, as well as the acoustic effects. The construction without iron in rotor and higher magnetic induction makes the superconducting machine, with cooling system, several times lighter than conventional ones. The electric machines could be used in ships and airplanes where smaller dimensions and weight of propulsion equipment results in growth of ship displacement and cargo space. In ship propulsion supplied by generator with frequency converter, high speed generators e.g. 16 000 rpm (800 Hz) and low speed motors e.g. 230 rpm (115 Hz) are preferred for big weight decreasing. Paper presents basic knowledge about superconductors, the construction principles of electric superconducting devices and the examples of generators and motors with HTS winding. The parameters of these superconductor generators and motors were described too.

1. Wstęp

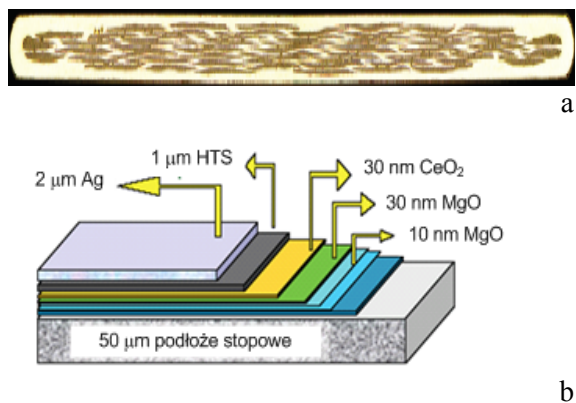
Nadprzewodnictwem nazywamy połączenie właściwości magnetycznych i elektrycznych materiału objawiających się zanikiem rezystancji elektrycznej w określonych warunkach. Materiały nadprzewodnikowe znajdują się w stanie nadprzewodzącym, gdy punkt ich pracy wyznaczony przez temperaturę, gęstość prądu oraz natężenie pola magnetycznego leży poniżej charakterystycznej dla danego materiału powierzchni krytycznej. Ze względu na wartość temperatury krytycznej wprowadzono podział nadprzewodników na niskotemperaturowe (LTS) oraz wysokotemperaturowe (HTS) [3], [6]. Umowną granicą rozdzielającą nadprzewodniki LTS i HTS jest temperatura $T_c = 25$ K. Masowa produkcja nadprzewodników LTS rozpoczęła się w latach 60. Są to nadprzewodniki NbTi oraz Nb₃Sn, w postaci drutów o strukturze włóknistej, w matrycy metalowej (Cu, Cu-Sn) (rys. 1). Po odkryciu nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w 1986 roku rozpoczęto w latach 90 produkcję ceramicznych nadprzewodników I generacji, Bi-2212 i Bi-2223, w postaci przewodów o strukturze włóknistej lub kształtek masywnych, oraz nadprzewodniki II generacji YBCO, w postaci taśm (rys. 2).

Tabela 1. Parametry krytyczne materiałów LTS i HTS dla urządzeń elektrycznych [3]

Nadprzewodnik	NbTi	Nb ₃ Sn	YBCO	BSCCO	MgB ₂
Parametr					
Temp., K	10	18	90	110	39
Gęstość prądu, A/mm ²	10 ³	10 ⁴	10 ²	10 ²	10 ²
Indukcja magnetyczna, T	10	18	10 ²	10 ²	10
Chłodzenie	LHe	LHe	LN ₂ , H	LN ₂ , H	LH, LNe
kriochłodziarki kontaktowe					



Rys. 1. Przewód o średnicy 0,78 mm z 6048 włóknami Nb₃Sn (a); przewód NbTi z włóknami w matrycy miedzianej (b), (c) [5]



Rys. 2. Taśma HTS I generacji BSCCO (a) i II generacji YBCO (b) [3], [5]

2. Budowa maszyn HTS

Budowę generatorów nadprzewodnikowych rozpoczęto w 1970 roku, bazując na przewodach LTS (NbTi). Zbudowano i przetestowano generator nadprzewodnikowy 20 MVA, który był pierwszą nadprzewodnikową maszyną wirującą. Kolejną maszyną nadprzewodnikową LTS był generator 70 MW, zbudowany i przetestowany przez konsorcjum Japanese w roku 1990. Oba generatory wykonane były z nadprzewodnika NbTi. Pomimo początkowych sukcesów związanych ze zmniejszeniem masy i gabarytów generatorów, przy jednoczesnym zwiększeniu mocy i sprawności, nie znalazły one zastosowania w elektroenergetyce.

Maszyny LTS wymagały skomplikowanego układu chłodzenia i izolacji termicznej, koniecznych do utrzymania temperatury pracy 4,2 K. Koszty wynikające z ich budowy i eksploatacji przewyższały korzyści związane z dużą gęstością prądu w uzwojeniu nadprzewodnikowym.

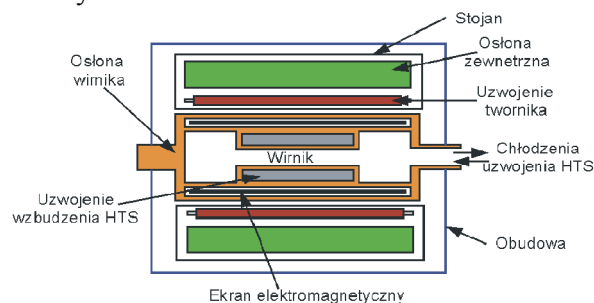
Odkrycie nadprzewodników wysokotemperaturowych, pozwoliło na nowo podjąć prace nad maszynami nadprzewodnikowymi. Układy chłodzenia maszyn HTS mają prostszą budowę i większą sprawność, a izolacją termiczną może być próżnia. Do chłodzenia uzwojeń stosuje się ciekły azot, hel gazowy i kriochłodziarki kontaktowe. Wszystko to wpływa na obniżenie kosztów budowy i eksploatacji maszyn HTS, przy jednoczesnym zwiększeniu sprawności, w stosunku do urządzeń konwencjonalnych, oraz zmniejszeniu masy użytych materiałów [5].

3. Generatory nadprzewodnikowe

Generatory nadprzewodnikowe HTS posiadają nadprzewodnikowe uzwojenie wzbudzenia,

umieszczone na konstrukcji wsporczej wirnika oraz konwencjonalne miedziane uzwojenie twornika, znajdujące się w bezżłobkowym jarzmie stojana. Zastosowanie nadprzewodnikowego uzwojenia wzbudzenia pozwala na zmniejszenie strat mocy w wirniku. Twornik generatora nadprzewodnikowego nie posiada żłobków, pole magnetyczne w szczelinie maszyny wzbudzone przez uzwojenie wirnika jest mniej odkształcone.

Dzięki zastosowaniu nadprzewodnikowego uzwojenia wzbudzenia i podwyższeniu indukcji w szczelinie generatora niemal dwukrotnie, objętość generatora HTS jest około 2 do 3 razy mniejsza niż generatora z uzwojeniami miedzianymi.



Rys. 3. Budowa nadprzewodnikowego generatora HTS [1]

Do głównych zalet generatorów nadprzewodnikowych HTS możemy zaliczyć:

- dużą gęstość mocy, pozwalającą zmniejszyć gabaryty i masę generatora,
- dużą sprawność przy częściowym obciążeniu,
- cichą pracę, ze względu na brak żłobków w stojanie i wirniku,
- małą reaktancję synchroniczną, co pozwala na pracę przy bardzo małych kątach obciążenia,
- wytwarzanie napięć z bardzo małą zawartością wyższych harmonicznych.

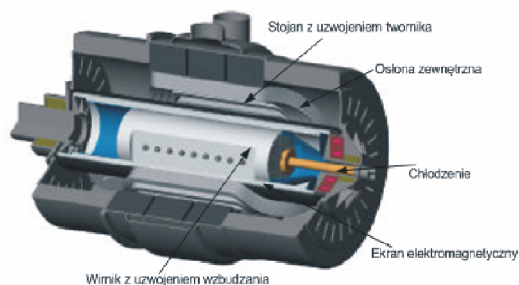
Jednym z najważniejszych problemów związanych z budową i eksploatacją generatorów i silników HTS jest zapewnienie odpowiedniego chłodzenia uzwojeń nadprzewodnikowych. Na całkowite obciążenie cieplne uzwojenia wirnika składają się między innymi ciepło przewodzone przez układ zawieszenia, przewodzenie cieplne przepustów prądowych oraz straty przemienoprądowe. Straty te podwyższają moc systemu chłodzenia, utrzymującego uzwojenie nadprzewodnikowe w temperaturze niższej od temperatury krytycznej. Do chłodzenia uzwojeń HTS

stosuje się gazowy hel i kriochłodziarki mechaniczne Gifforda-McMahona (G-M).

3.1. Generator 50 MW

Generator o mocy 50 MW zbudowany w ramach projektu Super G-M w latach 90-tych był nową konstrukcją maszyn synchronicznych z wirnikiem bez żelaza i gładkim, bezzłobkowym stojanem, o wartości indukcji w szczelinie znacznie wyższej niż w maszynach konwencjonalnych (rys. 4).

Wymiary SuperGeneratora wynoszą około 1/2 długości i 2/3 średnicy generatora konwencjonalnego tej samej mocy. Zespół wirnika zawiera uzwojenie wzbudzenia HTS z taśmy Bi-2223, w kriostacie próżniowym, konstrukcje wsporczą oraz ekran elektromagnetyczny i termiczny. Rolą ekranu elektromagnetycznego jest tłumienie pól generowanych przez stojan, przenoszenie dużych wahań momentu obrotowego podczas awarii oraz tłumienie oscylacji o niskiej częstotliwości. Zespół stojana zawiera miedziane uzwojenie twornika oraz osłonę (rys. 4).



Rys. 4. Schemat SuperGeneratora [1]

Tabela 2. Parametry SuperGeneratora [1]

Moc znamionowa	50 MW
Prąd znamionowy	6,6 kA
Współczynnik mocy	0,8 przy obc. indukcyjnym
Prędkość obrotowa	3600 obr/min
Częstotliwość	60 Hz
Uzwojenie wzbudzenia	
Uzwojenie nadprzewodnikowe HTS	Taśma BSCOO 2223
Prąd roboczy uzwojenia	186 A
Napięcie nominalne uzwojenia	<2 V
Temperatura pracy	35 K
Chłodzenie	Gazowy hel, kriochłodziarki G-M
Uzwojenia twornika	
Rodzaj uzwojenia	Miedziane
Chłodzenie	Powietrze
Maksymalna temperatura przewodu	120 °C
Wymiary	
Średnica zewnętrzna	249 cm
Długość	279 cm
Masa	28 t

Pole magnetyczne wytwarzane przez nadprzewodnikowe uzwojenie wzbudzenia SuperGeneratora jest dwukrotnie większe niż pole wytwa-

rzane w analogicznym uzwojeniu konwencjonalnym i wynosi 1,6 T [3].

Omawiany generator charakteryzuje się bardzo małą reaktancją synchroniczną – 0,28 pu. Przy pełnym obciążeniu, jego kąt obciążenia wynosi 10,4 stopni. Reaktancja synchroniczna porównywalnego generatora konwencjonalnego wynosi 2 pu, przy kącie obciążenia 50 stopni, przy znamionowym obciążeniu. SuperGenerator może więc pracować w szerokim zakresie obciążeń bez konieczności zmiany wzbudzenia pola, a jego praca jest sztywna i stabilna.

Całkowita sprawność SuperGeneratora przy pełnym obciążeniu wynosi 98,6 % i utrzymywana jest dla wartości obciążenia większych od 0.5 obciążenia znamionowego.

4. Silniki nadprzewodnikowe

Silniki nadprzewodnikowe budowane są jako maszyny synchroniczne prądu przemiennego, w których miedziane uzwojenie wirnika zastąpione jest uzwojeniem nadprzewodnikowym HTS [3]. Wirnik silnika HTS nie zawiera żelaza, a uzwojenie zamontowane jest na specjalnej konstrukcji wsporczej. Ponieważ gęstość prądu w uzwojeniu nadprzewodnikowym jest znacznie większa niż w konwencjonalnym, możliwe jest uzyskanie większej wartości indukcji magnetycznej w szczelinie. Powoduje to znaczne zmniejszenie wymiarów i masy silnika, podobnie jak w przypadku generatora HTS. Zastąpienie uzwojenia miedzianego bezrezystancyjnym uzwojeniem nadprzewodnikowym wpływa na znaczne ograniczenie strat mocy w wirniku, a tym samym na zwiększenie sprawności silnika [1], [2]. Ze względu na dużą gęstość prądu wzbudzenia w uzwojeniu HTS, moment obrotowy silnika, proporcjonalny do prądu wzbudzenia, jest bardzo duży. Dlatego też zespół wirnika musi sprostać odpowiedniom wymaganiom wytrzymałościowym i termicznym. Uzwojenie stojana nadprzewodnikowych silników synchronicznych HTS nie jest umieszczone w żłobkach, ale w gładkim jarzmie osłonięte ekranem elektromagnetycznym. Wpływa to nie tylko na zmniejszenie masy i wymiarów stojana, ale także w znacznym stopniu redukuje hałas emitowany przez silnik. Zalety silników HTS są analogiczne do zalet generatorów [3].

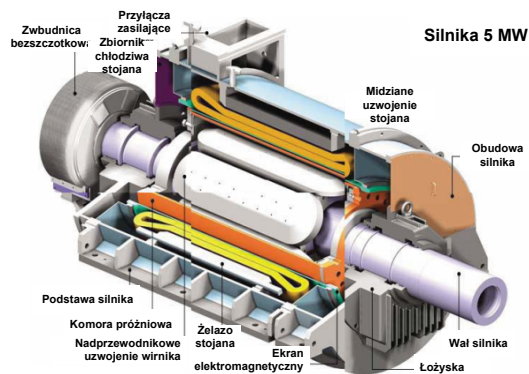
5. Silniki HTS dla jednostek pływających

W napędach morskich jest szczególnie istotne minimalizowanie masy i wymiarów maszyn i urządzeń napędowych, oraz poziomu drgań

i hałasu, co powoduje, że maszyny nadprzewodnikowe znalazły zastosowanie na okrętach i statkach wcześniej niż w innych gałęziach gospodarki. Ponadto w napędach morskich do bezpośredniego napędu śruby stosowane są silniki wolnoobrotowe o mocach do kilkudziesięciu MW, w których zmniejszenie masy i wymiarów w stosunku do maszyn konwencjonalnych, jest bardzo duże. Również koszty chłodzenia dużych maszyn są relatywnie mniejsze niż małych.

5.1. Silnik HTS 5 MW

Pierwszym zbudowanym silnikiem do bezpośredniego napędu śruby okrętowej był silnik HTS o mocy 5 MW i prędkości obrotowej 230 obr/min. (tabela 3, rys. 5) [3], chłodzony gazowym helem i chłodziarkami kontaktowymi typu G-M.



Rys. 5. Silnik HTS 5 MW [3]

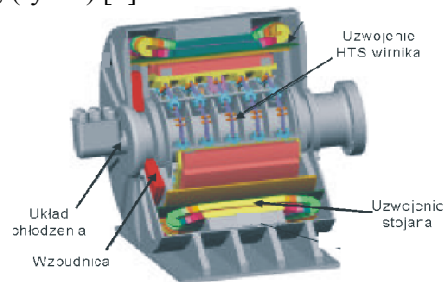
Tabela 3. Parametry synchronicznego silnika HTS o mocy 5 MW [3]

Moc	5 MW
Prędkość obrotowa	230 obr/min.
Sprawność	96%
Liczba par biegunów	3
Napięcie	4,16 kV
Prąd twornika	722 A
Liczba faz	3
Częstotliwość	11,5 Hz
Masa	23 t
Wymiary (długość / wysokość / szerokość)	2,5 m / 1,9 m / 1,9 m
Chłodzenie uzwojenia HTS	Hel gazowy + kriochłodziarki G-M

5.2. Silnik 25 MW

Silnik posiada uzwojenie stojana, chłodzone wodą, oraz nadprzewodnikowe uzwojenie wirnika, chłodzone kriochłodziarkami mechanicznymi. Sprawność omawianego silnika wynosi 97% przy prędkości maksymalnej oraz 99%

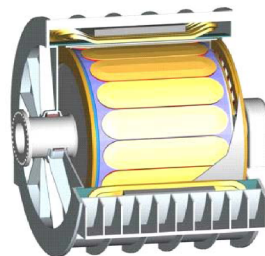
przy 1/3 prędkości maksymalnej. Masa silnika o długości 2,08 m i średnicy 2,65 m wynosi 60 t, (rys. 6) [1].



Rys. 6. Silnik HTS 25 MW [1]

5.3. Silnik 36,5 MW

Kolejnym osiągnięciem w budowie silników morskich było uruchomienie w 2006 silnika HTS o mocy 36,5 MW (49 000 KM) i prędkości obrotowej 120 obr/min., którego parametry zamieszczone są w tabeli 4 [4].



Rys. 7. Wirnik silnika HTS 36,5 MW [4]

Silnik ten przeznaczony jest do napędu najnowszej generacji okrętów Marynarki Wojennej USA.

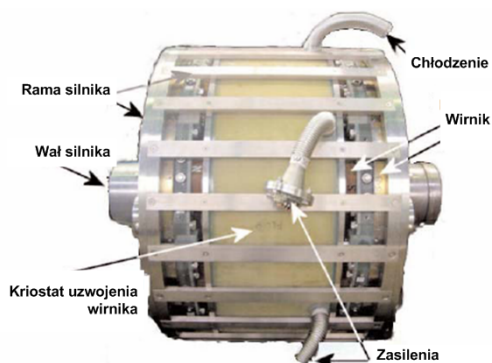
Tabela 4. Parametry synchronicznego silnika HTS o mocy 36,5 MW [3]

Moc	36,5 MW
Prędkość obrotowa	120 obr/min.
Sprawność	97%
Liczba par biegunów	8
Napięcie	6 kV
Prąd twornika	1270 A
Liczba faz	9
Częstotliwość	16 Hz
Masa	75 t
długość / wysokość / szerokość	3,4 m / 4,6 m / 4,1 m
Chłodzenie uzwojenia HTS	Hel gazowy + kriochłodziarki G-M

5.4. Silnik 365 kW

Wiele projektów silników okrętowych zrealizowano w ostatnich latach w Japonii [5]. Ostatnio zbudowano oraz przeprowadzono próby eksploatacyjne silnika HTS o mocy 365 kW (490 KM), prędkości obrotowej 250 obr/min., długości 1,2 m, średnicy 0,8 m i masie 4,4 t. Uzwojenie HTS wykonane jest z taśmy

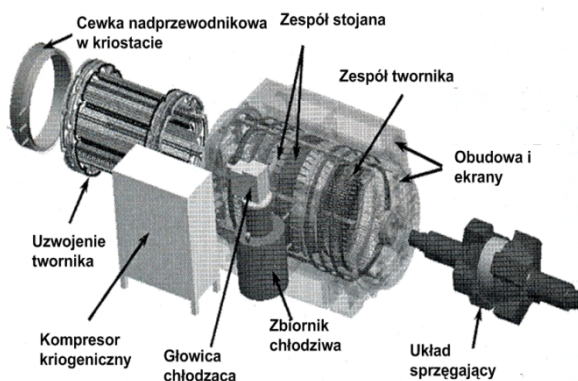
Bi-2223, chłodzonej gazowym helem do temperatury 30°K.



Rys. 8. Japoński silnik 365 kW [2]

6. Generatory szybkoobrotowe i silniki wolnoobrotowych HTS o mocy 36 MW

Nowoczesne rozwiązania generatorów i silników dla marynarki opierają się na konstrukcji HIA (homopolar inductor alternator). Jest nią generator szybkoobrotowy zbudowany w oparciu o stacjonarną, nadprzewodnikową cewkę wzbudnika, litego wirnika, oraz konwencjonalnego stojana zawierającego żłobkowane uzwojenie twornika wraz z żelaznym jarzmem oraz wodnym układem chłodzenia (rys. 9) [4].



Rys. 9. Schemat generatora szybkoobrotowego z uzwojeniem nadprzewodnikowym HTS [4]

Nadprzewodnikowe uzwojenie wzbudnika umieszczone jest wokół ferromagnetycznego wirnika z wystającymi nabiegunnikami, umieszczonymi na obu jego końcach. Uzwojenie wzbudnika wytwarza pole stacjonarne, które współdziałając z wirującym żelazem wirnika,

generuje wirujące pole magnetyczne. Pole to pełni podobną funkcję jak pole wzbudzenia w standardowych maszynach synchronicznych. Wydzielenie uzwojenia wzbudnika z wirnika i uczynienie go stacjonarnym pozwala osiągnąć wiele korzyści, w stosunku do maszyn konwencjonalnych [4]:

- Stacjonarne uzwojenie wzbudnika nie powoduje powstawania sił odśrodkowych, które mogą pojawić się przy uzwojeniu wzbudnika umieszczonym na wirniku.
- Uzwojenie może być wykonane w postaci prostej cewki solenoidalnej, a nie bardziej skomplikowanej cewki typu racetrack, wymagającej dodatkowo specjalnej konstrukcji wsporczej.
- Łatwiej jest także zapewnić odpowiednią izolację termiczną oraz chłodzenie cewki nadprzewodnikowej, umieszczonej na zewnątrz wirnika. Kriostat uzwojenia ma prostą budowę, jako izolację termiczną stosuje się próżnię lub superizolację warstwową, natomiast do chłodzenia uzwojeń można zastosować kriochłodziarki kontaktowe.
- Mniejsze siły dynamiczne w uzwojeniu wzbudnika, a tym samym mniejsze naprężenia pozwalają wykorzystać do jego budowy nadprzewodniki wysokotemperaturowe HTS – BSCCO oraz YBCO. Duża gęstość prądu nadprzewodników HTS, zwłaszcza YBCO, pozwala na ograniczenie wartości amperozwojów uzwojenia wzbudnika, co ogranicza ilość taśmy nadprzewodnikowej potrzebnej do jego wykonania.
- Eliminacja pierścienia ślizgowego, stosowanego w maszynach konwencjonalnych w celu dostarczenia prądu do uzwojenia wzbudnika z zewnętrznej wzbudnicy.
- Brak konieczności stosowania obrotowych szczotek zewnętrznej wzbudnicy.

W tabeli 5 przedstawiono parametry techniczne nadprzewodnikowego generatora szybkoobrotowego opracowanego w Air Force Research Laboratory.

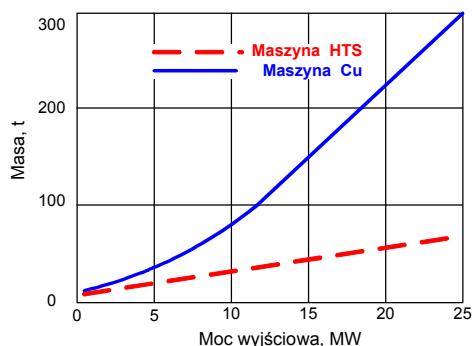
Tabela 5. Parametry generatora szybkoobrotowego 36 MW i silnika wolnoobrotowego 3 MW [4]

Urządzenie	Generator	Silnik
Moc, MVA	36	36
Zastosowanie	Generator	Silnik okrętowy
Prędkość obrotowa, obr/min.	3600	120
Napięcie, kV	6,6	3,8
Liczba faz	3	3
Liczba biegunów	6	18
Częstotliwość, Hz	180	18
Sprawność przy pełnym obciążeniu, %	>98	>95
Długość taśmy nadprzewodnikowej, m	6000	11000
Nadprzewodnik	BSCCO	BSCCO
Prąd krytyczny taśmy w polu własnym i w temperaturze 77K, A	150	150
Średnica, cm	200	290
Długość, cm	110	400
Moc chłodziarki kriogenicznej, kW	14,4	14,4
Masa chłodziarki kriogenicznej, kg	300	300
Całkowita masa, kg	12000	100000

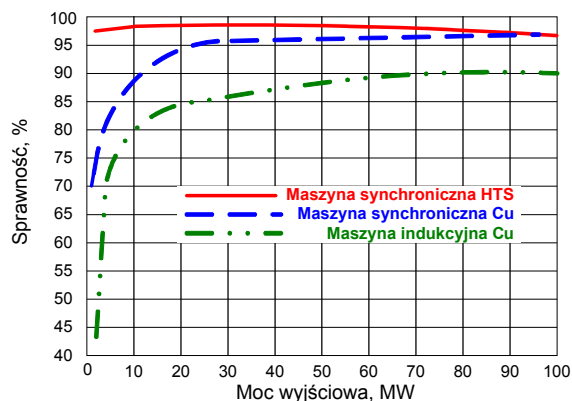
7. Podsumowanie

Maszyny nadprzewodnikowe posiadają wiele zalet w porównaniu z maszynami konwencjonalnymi o takiej samej mocy.

Uzwojenia HTS w maszynach znajdują się w stałej temperaturze dlatego nie są narażone na występowanie naprężeń cieplnych w przeciwieństwie do uzwojeń konwencjonalnych. Nie wymagają zatem częstych przeglądów i konserwacji. Materiały HTS mogą przewodzić prąd o większych wartościach w przewodach o znacznie mniejszych przekrojach i niższych stratach energii co powoduje, że ogólna sprawność urządzeń jest większa nawet przy uwzględnieniu zasilania układów chłodzenia.



Rys. 10. Porównanie masy maszyn klasycznych i nadprzewodnikowych o tej samej mocy [3]



Rys. 11. Porównanie sprawności synchronicznych maszyn klasycznych i nadprzewodnikowych o tej samej mocy [3]

Mniejsze gabaryty i masa jednostek napędowych pozwalają lepiej wykorzystać wyporność i przestrzeń ładunkową jednostek pływających. Przyszłość maszyn nadprzewodnikowych, związana jest z dalszym rozwojem synchronicznych silników okrętowych, zwłaszcza zespołów szybkoobrotowych generatorów HTS i wolnoobrotowych silników HTS.

8. Literatura

- [1] Kalsi S. S., Gamble B., Ige O.: *The Status of the Ship Propulsion Motor Developments*, AES 2005
- [2] *Japanese HTS Motor*, Superconductor week, Vol. 21, No. 18, October 15, 2007
- [3] Janowski T., Wojtasiewicz G.: *Nadprzewodnikowe maszyny elektryczne*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6/2008, ss. 157-160
- [4] Sivasubramaniam K., Laskaris E.T., Shah M.R., Bray J.W. Garrin N.R.: *High-Temperature Superconducting Homopolar Inductor Alternator for Marine Applications*, IEE Trans. on Appl. Superc., Vol 18, Nr 1, 2008
- [5] Sato K., *Present Status and Future Perspective of High-Temperature Superconductors*, SEI Technical Review, Number 66, April 2008, pp. 55-67
- [6] Pałka R.: *Monolityczne nadprzewodniki wysokotemperaturowe, modele makroskopowe i zastosowania*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, ISBN 978-83-7457-042-8, 2008

Autorzy

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski -
e-mail: t.janowski@pollub.pl
Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw
Elektrotechniki i Elektrotechnologii
ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin