

Badania eksperymentalne transformatora nadprzewodnikowego 10 kVA

Streszczenie. Dostępne obecnie komercyjne taśmy nadprzewodnikowe 2G na bazie itru (YBCO) stwarzają możliwość budowy transformatorów energetycznych odpornych na zwarcia, energooszczędnych i proekologicznych. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych modelu 1-fazowego transformatora nadprzewodnikowego o mocy znamionowej 10 kVA, z uzwojeniami wykonanymi z taśmy HTS 2G.

Abstract. Currently available 2G HTS tapes, on basis of yttrium (YBCO), allow to build short-circuit resistant superconducting power transformers, environmentally friendly with low energy losses. This article presents the results of experimental investigation of 1-phase, 10 kVA superconducting transformer with winding made of 2G HTS tape. **Experimental Investigation of 10 kVA Superconducting Transformer.**

Słowa kluczowe: transformator nadprzewodnikowy, taśma HTS 2G, parametry uzwojeń, charakterystyki pracy, porównanie
Keywords: superconducting transformer, 2nd generation HTS tape, windings parameters, work characteristics, comparison

doi:10.12915/pe.2014.03.33

Wstęp

Prawie cała energia elektryczna wytwarzana na Ziemi jest przynajmniej trzykrotnie przetwarzana w transformatorach systemu elektroenergetycznego. Mimo dużej sprawności energetycznej transformatorów traci się w nich ponad 5% wytworzonej energii elektrycznej. Większość tych strat powstaje w uzwojeniach wykonanych z miedzi. Próby zastosowania uzwojeń z nadprzewodników niskotemperaturowych (Nb-Ti) w latach 70-tych oraz z nadprzewodników wysokotemperaturowych (HTS 1G)), w latach 90-tych XX wieku, nie przyniosły oczekiwanych rezultatów [1].

Przewody o strukturze warstwowej z warstwą nadprzewodnika wysokotemperaturowego na bazie itru ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ – YBCO) są od kilku lat produkowane na skalę przemysłową. W tych zaliczanych do drugiej generacji (2G) taśmach nadprzewodnikowych inżynierska gęstość prądu ma wartość w przedziale od 75 do 450 A/mm², zależną od grubości substratu i sposobu laminacji warstwami stabilizującymi. Ze względu na wielokrotnie większą gęstość prądu w uzwojeniach wykonanych z wysokotemperaturowej taśmy nadprzewodnikowej 2G, transformator z takimi uzwojeniami może być zaprojektowany i zbudowany jako urządzenie o 50% lżejsze i mniejsze pod względem objętości niż transformator konwencjonalny o tych samych parametrach elektrycznych [1]. Możliwe jest znaczące obniżenie zużycia konwencjonalnych materiałów oraz rozwiązanie szeregu problemów związanych z transportem i umiejscowieniem jednostki dużej. Do zalet transformatorów z uzwojeniami nadprzewodnikowymi można zaliczyć [2], [3]:

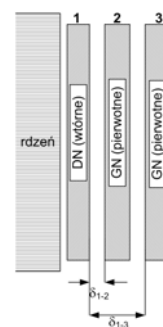
- ograniczenie strat mocy w uzwojeniach. Straty Joule'a, ze względu na zerową rezystancję nadprzewodnika w stanie nadprzewodzącym są wyeliminowane,
- odporność na zwarcia. Wartość prądu zwarcia nie może wzrosnąć ponad wartości prądu krytycznego uzwojenia nadprzewodnikowego transformatora,
- eliminacje olejowego układu chłodzenia. Są one przez to bezpieczne i przyjazne dla środowiska naturalnego i użytkowników.
- zmniejszenie masy i gabarytów transformatorów.

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych modelu 1-fazowego transformatora nadprzewodnikowego o mocy znamionowej 10 kVA, z uzwojeniami wykonanymi z taśmy HTS 2G. Badania obejmowały wyznaczenie charakterystyk pracy oraz parametrów transformatora w stanie jałowym oraz w stanie zwarcia pomiarowego.

Projekt i budowa transformatora nadprzewodnikowego

W projekcie założono wykonanie modelu fizycznego jednofazowego transformatora nadprzewodnikowego o mocy 10 kVA z uzwojeniami cylindrycznymi, umieszczonymi na jednej kolumnie. Taka konfiguracja pozwala na zastosowanie tylko jednego kriostatu co jest korzystne ze względu na uproszczenie układu chłodzenia [4].

Zaprojektowany i wykonany transformator składa się z trzech uzwojeń: dwóch uzwojeń GN (pierwotnych) i jednego uzwojenia DN (wtórnego). Jedno z uzwojeń GN zostało nawinięte bezpośrednio na uzwojeniu DN podczas gdy drugie na oddzielnym karkasie, rys. 1.



Rys. 1. Konfiguracja uzwojeń nadprzewodnikowych modelu fizycznego transformatora (schemat)

Taka konstrukcja uzwojeń pozwala skonfigurować transformator do pracy z dwoma wartościami szerokości szczeliny powietrznej δ : $\delta_{1-3} = 0,01$ m (konfiguracja 1 – 3, rys 1.1) oraz $\delta_{1-2} = 0,001$ m (konfiguracja 1 – 2, rys 1.1). W ten sposób możemy sprawdzić wpływ szerokości szczeliny powietrznej na charakterystyki pracy transformatora, a tym samym na parametry uzwojeń.

Wszystkie uzwojenia nadprzewodnikowe umieszczone były we wspólnym niemetalicznym kriostacie i chłodzone w kąpeli ciekłego azotu, w temperaturze 77K, podczas gdy rdzeń magnetyczny znajdował się w temperaturze pokojowej.

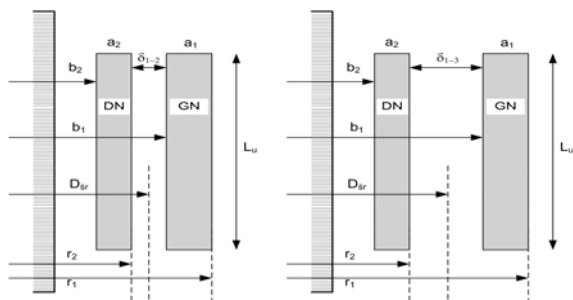
W przypadku uzwojeń wykonanych z taśm nadprzewodnikowych HTS 2G o dużych gęstościach prądu, wartość prądu znamionowego uzwojeń jest pojęciem umownym. Prąd znamionowy uzwojeń wykonanych z tych taśm, może zawierać się w granicach od 0 do I_c . Przy projektowaniu uzwojeń transformatora zakłada się, że maksymalny prąd roboczy każdego z uzwojeń nie może przekroczyć 70% prądu krytycznego taśmy. W przyjętych

założeniach projektowych modelu transformatora nadprzewodnikowego założono, że wszystkie uzwojenia wykonane zostaną z taśmy HTS 2G SCS4050 produkcji SuperPower Inc., o prądzie krytycznym 117 A, a prądy robocze uzwojeń nadprzewodnikowych transformatora będą wynosić odpowiednio: 44 A dla uzwojenia pierwotnego (GN) oraz 88 A dla uzwojenia wtórnego (DN). Dla napięć 230 V/115 V (GN/DN), na które zostały zaprojektowane uzwojenia transformatora oraz w/w wartości prądów roboczych uzwojeń, moc znamionowa transformatora wynosi 10 kV. Wykonany na podstawie projektu model transformatora może jednak pracować przy innych wartościach prądu roboczego uzwojeń ($I < 70\%I_c$), co skutkować będzie mniejszą mocą transformatora.

W tabeli 1 zamieszczono parametry modelu fizycznego transformatora nadprzewodnikowych oraz wymiary uzwojeń nadprzewodnikowego dla dwóch wartości δ . Na rys. 2 przedstawiono sposób zdefiniowania wymiarów uzwojeń transformatora.

Tabela 1. Parametry modelu fizycznego transformatora nadprzewodnikowego 10 kVA oraz wymiary uzwojeń nadprzewodnikowego dla dwóch wartości δ

Parametry transformatora		
Rdzeń magnetyczny zwijany cięty o przekroju $70 \times 70 \text{ mm}^2 = 4900 \text{ mm}^2$ – RZC 70 / 230-70, $B_{\text{max}} = 1,7 \text{ T}$		
Uzwojenia GN i DN wykonane z taśmy 2G SCS4050		
wymiary taśmy (szer./gr.) mm	4 x 0,095	
prąd krytyczny taśmy, A	117	
napięcie strony GN (pierwotne), V	230	
napięcie strony DN (wtórne), V	115	
prąd znamionowy uzwojenia GN (pierwotnego)	44	
prąd znamionowy uzwojenia DN (wtórnego)	88	
Indukcja robocza B, T	1,6	
Wymiary uzwojenia dla dwóch wartości δ :		
	$\delta_{1-3} = 0,01 \text{ m}$	$\delta_{1-2} = 0,001 \text{ m}$
a_1 , m	0,001	0,001
a_2 , m	0,001	0,001
b_1 , m	0,0765	0,0685
b_2 , m	0,0655	0,0655
r_1 , m	0,0775	0,0695
r_2 , m	0,0665	0,0665
l_u , m	0,132	0,132
I_{srGN} / I_{srDN} , m	0,483 / 0,414	0,433 / 0,414
ZWOJE Z_{GN} / Z_{DN}	132 / 66	132 / 66
warstwy m_{GN} / m_{DN}	4 / 2	4 / 2
zwojów / warstwę	33 / 33	33 / 33
długość taśmy GN / DN, m	65 / 27	57 / 27



Rys. 2. Definicja wymiarów uzwojeń nadprzewodnikowych

W celu porównania charakterystyk pracy i parametrów transformatora nadprzewodnikowego z charakterystykami i parametrami transformatora konwencjonalnego, zaprojektowano i wykonano model transformatora z uzwojeniami Cu tej samej mocy (tych samych parametrach elektrycznych). Oba transformatory (HTS i Cu) różnią się jedynie wymiarami promieniowymi uzwojeń wynikającymi z różnicy grubości uzwojeń, Tablica 2. Ponadto dla transformatora Cu uzwojenia wykonano dla jednej wartości szerokości szczeliny powietrznej $\delta = 0,01 \text{ m}$. W obu

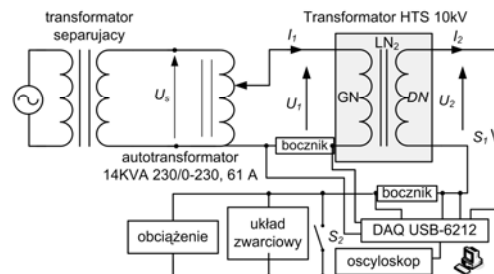
przypadkach zastosowano także ten sam rdzeń magnetyczny.

Tabela 2. Parametry modelu fizycznego transformatora konwencjonalnego Cu 10 kVA

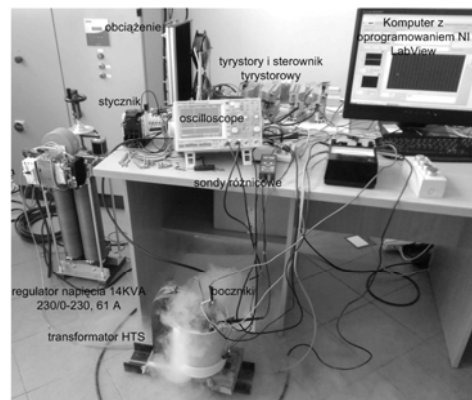
przewód nawojowy GN / DN, mm		Cu 2 x 4	
Wymiary uzwojenia			
a_1 , m	0,008	l_u , m	0,132
a_2 , m	0,004	I_{srGN} / I_{srDN} , m	0,513 / 0,424 ($I_{sr} = 0,47$)
b_1 , m	0,0777	zwoje Z_{GN} / Z_{DN}	132 / 66
b_2 , m	0,0655	warstwy m_{GN} / m_{DN}	4 / 2
r_1 , m	0,0857	zwojów / warstwę	33 / 33
r_2 , m	0,0695	δ , m	0,01

Badania eksperymentalne modeli transformatorów nadprzewodnikowego i konwencjonalnego 10 kVA

Charakterystyki stanu jałowego oraz zwarcia pomiarowego wyznaczono w układzie pomiarowym, którego uproszczony schemat przedstawiono na rys. 3. Uzwojenie pierwotne badanego transformatora zasilane było z autotransformatora połączonego z siecią za pośrednictwem transformatora separacyjnego. Uzwojenie wtórne obciążone było układem zwarciovym. Wszystkie pomiary realizowane były za pomocą karty pomiarowej i procedur napisanych w programie LabView.



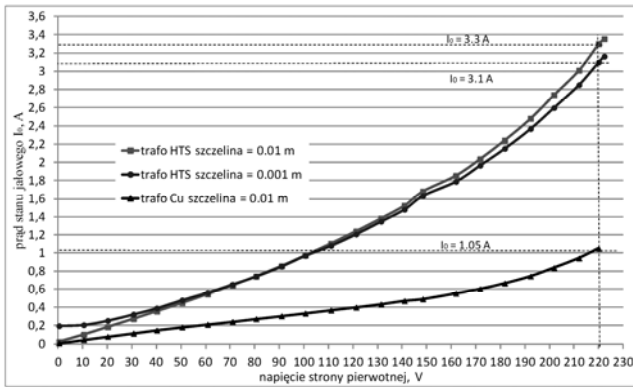
Rys. 3. Uproszczony schemat układu pomiarowego



Rys. 4. Model transformatora HTS podczas pomiarów

Pomiary stanu jałowego transformatorów HTS i Cu

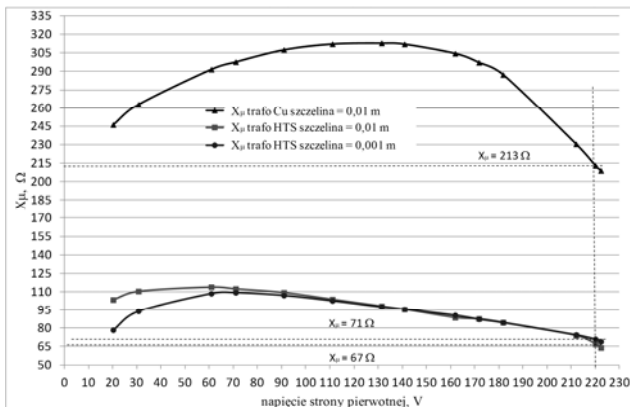
Podstawowym celem próby stanu jałowego transformatora były pomiary wartości strat jałowych i prądu jałowego przy napięciu znamionowym. Próba stanu jałowego polegała na zasilaniu transformatora z dowolnej strony i pomiarze pobieranego przez transformator prądu i mocy. W czasie pomiaru uzwojenie wtórne transformatora było otwarte. Podczas wyznaczania charakterystyk stanu jałowego uzwojenia chłodzone były do temperatury 77 K w ciekłym azocie i znajdowały się w stanie nadprzewodzenia. Charakterystyki stanu jałowego transformatora HTS, dla dwóch wartości szczeliny powietrznej δ , oraz transformatora Cu, przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Charakterystyki stanu jałowego transformatorów HTS i Cu

Prąd jałowy transformatora HTS, dla wartości znamionowej napięcia pierwotnego niezależnie od wartości szerokości szczeliny powietrznej, jest trzykrotnie większy od prądu jałowego transformatora z uzwojeniami miedzianymi. Podobna relacja zachodzi w przypadku wartości prądu magnesującego, I_m , rozpatrywanych transformatorów, którego wartości wynoszą odpowiednio 3,29 A dla tr. HTS z $\delta = 0,01$ m, 3,09 A - HTS z $\delta = 0,001$ m oraz 1,03 A - Cu $\delta = 0,01$ m.

Różnica w wartości prądu magnesującego transformatorów HTS i Cu wynika z mniejszej wartości reaktancji gałęzi poprzecznej, X_m , transformatora nadprzewodnikowego niż miedzianego, rys. 6.

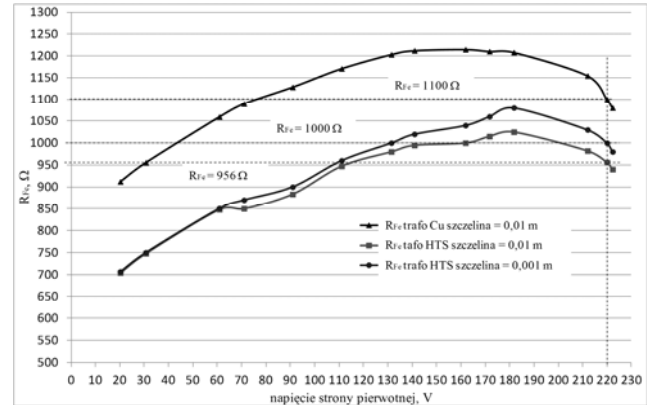


Rys. 6. Reaktancja gałęzi poprzecznej transformatorów HTS i Cu

Ponieważ gałąź poprzeczna transformatora reprezentuje rdzeń magnetyczny, a w obu transformatorach był wykorzystany ten sam rdzeń, różnicę w reaktancji rdzenia należy tłumaczyć warunkami w których on pracował. W przypadku transformatora z uzwojeniami Cu rdzeń pracował w temperaturze pokojowej. W przypadku transformatora z uzwojeniami nadprzewodnikowymi rdzeń znajdował się wprawdzie w „ciepłym otworze” kriostat uzwojeń, ale jego temperatura pracy wynosiła około -80°C co wpłynęło na spadek przenikalności magnetycznej rdzenia, a tym samym wzrost prądu magnesującego. Powodem schłodzenia rdzenia do tak niskiej temperatury był nieprzewidywany wyciek ciekłego azotu podczas eksperymentu, z połączenia podstawy dolnej i ściany wewnętrznej kriostat w obszarze ciepłego otworu.

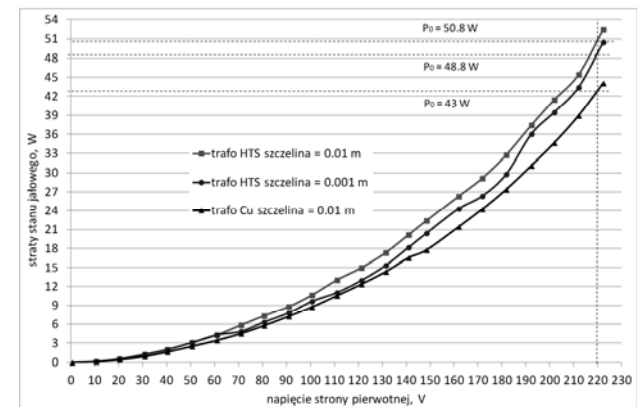
O ile obniżenie temperatury pracy rdzenia transformatora nadprzewodnikowego wpłynęło na 300% wzrost jego prądu magnesującego, to umowna rezystancja R_{Fe} , reprezentująca straty w rdzeniu, a tym samym składowa czynna prądu jałowego, I_{Fe} , (która określa te straty), różni się już tylko o około 13% od analogicznych

wartości dla transformatora konwencjonalnego, z rdzeniem pracującym w temperaturze pokojowej, rys. 7.



Rys. 7. Rezystancja R_{Fe} odpowiadająca stratom mocy w rdzeniu

Wartości R_{Fe} i I_{Fe} decydują o wartości strat w rdzeniu transformatora. Straty w schłodzonym rdzeniu transformatora HTS są o około 7 W większe niż w „ciepłym” rdzeniu transformatora Cu, rys. 8



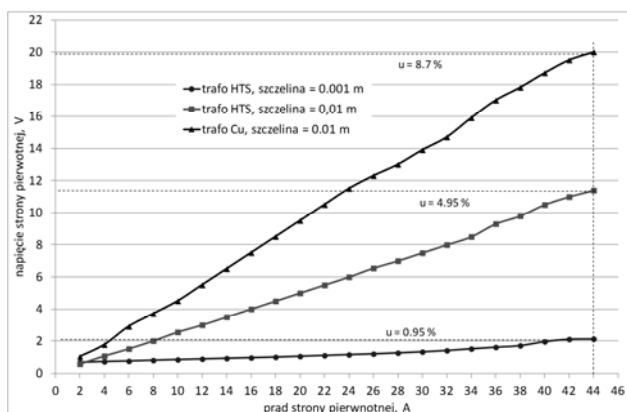
Rys. 8. Straty mocy w rdzeniu transformatorów HTS i Cu

Pomiary stanu zwarcia pomiarowego transformatorów HTS i Cu

Podstawowym celem próby stanu zwarcia transformatora były pomiary wartości strat w uzwojeniach i napięcia zwarcia. Próba stanu zwarcia transformatora polegała na zasilaniu transformatora z dowolnej strony i pomiarze pobranego przez transformator prądu I_z i mocy P_z oraz napięcia zasilania. W czasie próby uzwojenie wtórne było zwarte. Analogicznie jak podczas wyznaczania charakterystyk stanu jałowego transformatora, podczas wyznaczania charakterystyk stanu zwarcia jego uzwojenia chłodzone były do temperatury 77 K w ciekłym azocie i znajdowały się w stanie nadprzewodzenia, natomiast uzwojenia transformatora konwencjonalnego znajdowały się w temperaturze otoczenia – 300 K.

Charakterystyki zwarcia pomiarowego transformatora Cu i HTS dla dwóch wartości szerokości szczeliny δ , przedstawia rys. 9

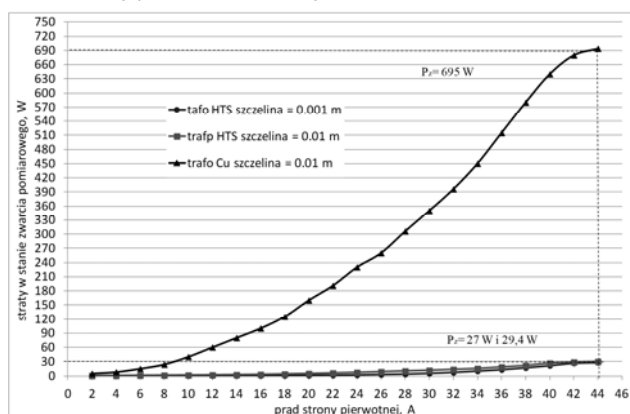
Wyznaczone z charakterystyk wartości procentowego napięcia zwarcia, $u\%$, dla przyjętej w projekcie znamionowej wartości prądu uzwojenia pierwotnego, 44 A, wykazują dużą zgodność z wartościami obliczonym (odpowiednio 4,78% dla tr. HTS z $\delta = 0,01$ m, 1,13% – HTS z $\delta = 0,001$ m oraz 9% - Cu z $\delta = 0,01$ m). Odpowiadające zmierzonym wartościom $u\%$, wartości impedancji zwarcia Z_z , wynoszą odpowiednio: 0,26 Ω - HTS, $\delta = 0,01$ m, 0,05 Ω - HTS, $\delta = 0,001$ m i 0,45 Ω - Cu. $\delta = 0,01$ m.



Rys. 9. Charakterystyka zwarcia pomiarowego transformatorów HTS i Cu

Dla tej samej wysokości uzwojeń i tej samej szerokości szczeliny powietrznej transformatora HTS i Cu ($\delta = 0,01$ m) zarówno impedancja zwarcia jak i procentowe napięcie zwarcia transformatora z uzwojeniami miedzianymi są większe niż transformatora z uzwojeniami nadprzewodnikowymi znajdującymi się w stanie nadprzewodzącym. W analizowanym przypadku różnica ta wynosi około 56 % i wynika głównie z różnicy w grubościach uzwojeń HTS i Cu, ponieważ wpływ rezystancji uzwojeń na impedancję zwarcia w przypadku uzwojeń miedzianych jest niewielki a w przypadku uzwojeń nadprzewodnikowych nie występuje (w stanie nadprzewodzącym $R_{HTS} = 0$). Mniejsza wartość procentowego napięcia zwarcia transformatora HTS ze szczeliną powietrzną $\delta = 0,001$ m wynika z mniejszej wartości indukcyjności rozproszenia uzwojeń, ponieważ jej wartość zależy wprost proporcjonalnie od wartości δ .

Całkowite straty mocy podczas zwarcia pomiarowego przedstawia charakterystyka na rys. 10. Składają się na nie zarówno straty w uzwojeniach jak i straty w rdzeniu. Ponieważ jednak straty w rdzeniu podczas zwarcia pomiarowego są pomijalnie małe, zatem charakterystyki te odpowiadają stratom w uzwojeniach transformatora.



Rys. 10. Straty mocy w uzwojeniach transformatorów HTS i Cu

Uzyskana wartość strat w uzwojeniach nadprzewodnikowych odpowiada sumie strat w samej taśmie nadprzewodnikowej oraz strat w miedzianych przepustach i połączeniach prądowych. Łączne straty w elementach miedzianych uzwojeń wynoszą 23,2 W ($\delta = 0,001$ m) oraz 24,5 W ($\delta = 0,001$ m). Pozostałe 3,8 W w uzwojeniu z $\delta = 0,001$ m oraz 4,9 W w uzwojeniu z $\delta = 0,01$

m, to straty w taśmie nadprzewodnikowej. Przyjmuje się wprawdzie, że ze względu na zerową wartość rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych w stanie nadprzewodzenia straty Joule'a są równe zero, ale w rzeczywistości w rezystywnych warstwach taśmy nadprzewodnikowej indukują się straty przemiennoprądowe: wiroprądowe i histerezowe. Straty te stanowią jednak niewielki procent strat powstających w uzwojeniach miedzianych. W analizowanym przypadku straty w uzwojeniach transformatora miedzianego wynoszą 695 W, i w porównaniu z nimi straty w taśmie nadprzewodnikowej w stanie nadprzewodzenia są pomijalnie małe. Straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych stanowią około 0,5 % ($\delta = 0,001$ m) oraz 0,7 % ($\delta = 0,01$ m) strat w uzwojeniach miedzianych. Straty na metr taśmy HTS wynoszą: 0,053 W/m - dla uzwojenia z $\delta = 0,01$ oraz 0,045 W/m - dla uzwojenia z $\delta = 0,001$

Wnioski

Zbudowanie nadprzewodnikowego transformatora elektroenergetycznego chłodzonego ciekłym azotem w oparciu o aktualnie dostępne materiały nadprzewodnikowe (2G) i technologie wykonania elementów konstrukcyjnych jest możliwe. Uwzględniając straty powstające w układzie chłodzenia kriogenicznego, transformator nadprzewodnikowy dużej mocy wykonany w oparciu o taśmę nadprzewodnikową HTS drugiej generacji będzie posiadać wyższą sprawność niż jego konwencjonalny odpowiednik, będzie też lżejszy, mniejszy, łatwiejszy w transporcie i bezpieczny w eksploatacji [1].

Poza tym mniejsze napięcie zwarcia transformatora nadprzewodnikowego HTS wpłynie na zmniejszenie wahań napięcia w sieci.

Przy analizie strat i sprawności nie uwzględniono kosztów chłodzenia, których oszacowanie jest możliwe na drodze badań eksploatacyjnych transformatora znacznie większej mocy niż model zbudowany i przebadany.

Zastąpienie oleju transformatorowego ciekłym azotem – czynnikiem o dobrych właściwościach izolacyjnych, niepalnym, obojętnym dla środowiska naturalnego, łatwym do pozyskania i stosunkowo tanim – minimalizuje obciążenie środowiska naturalnego oraz ryzyko jego skażenia w wyniku pożaru lub eksplozji.

LITERATURA

- [1] Wojtasiewicz G., Janowski T., Kozak S., Kozak J., Majka M., Kondratowicz-Kucewicz B., Experimental investigation of the model of superconducting transformer with the windings made of 2G HTS tape, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3. 2012, article number: 5500604.
- [2] Berger A., Cherevatskiy S., Noe M., Leibfried T., Comparison of the Efficiency of Superconducting and Conventional Transformer, *Journal of Physics: Conference Series* 234(2010) 032004
- [3] Janowski T., Głowacki B., Wojtasiewicz G., Kozak S., Kozak J., Kondratowicz-Kucewicz B., Majka M., Woźniak M., Fault Current Limitation in Power Network by the Superconducting Transformers Made of 2G HTS, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no 3, June 2011, pp. 1413-1416.
- [4] Morandi N., Trevisani L., Ribani P. L., Fabbri L., Bocchi M., Superconducting Transformer: Key Design Aspects for Power Applications, *Journal of Physics: Conference Series* 97(2008) 012318

Autorzy: dr inż. Grzegorz Wojtasiewicz, dr inż. Michał Majka, dr inż. Janusz Kozak, Instytut Elektroenergetyki w Warszawie, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie, Nadbystrzycka 36a, 20-618 Lublin, E-mail: g.wojtasiewicz@iel.waw.pl, m.majka@iel.waw.pl