

Badania taśm nadprzewodnikowych (2G HTS) bez stabilizatora

Streszczenie. Do budowy uzwojeń nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciego stosowane są taśmy nadprzewodnikowe HTS 2G bez stabilizatora. Do projektowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciego i obliczeń modeli NOPZ metodą elementów skończonych niezbędna jest dokładana charakterystyka $R=f(T)$ taśmy HTS. W artykule przedstawiono eksperymentalnie wyznaczone charakterystyki $R=f(T)$ najnowszych taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji. W pracy opisano sposób przygotowania próbek taśm nadprzewodnikowych HTS 2G (SF12050 i SF12100) do badań, opisano metodę pomiarową oraz przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych.

Abstract. The second generation high temperature superconducting tapes 2G HTS without stabilizer are used for windings construction of superconducting faults current limiters. The exact $R=f(T)$ characteristic of HTS tape is necessary to design superconducting fault current limiters and for calculation of FEM models of SFCL. The experimental characteristics $R=f(T)$ of the newest second generation HTS tapes are presented in this paper. The paper describes samples preparation of (SF12050 and SF12100) superconducting tapes, describes the measurement method and the results of experimental studies. (Tests of superconducting tapes (2G HTS) without stabilizer).

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, uzwojenia nadprzewodnikowe, taśma HTS, nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciego.

Keywords: superconductivity, superconducting windings, HTS tape, superconducting fault current limiter.

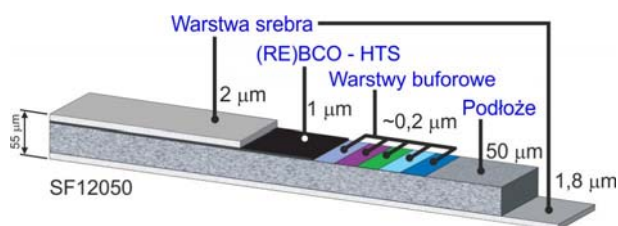
Wstęp

Postępy w technologii wytwarzania taśm nadprzewodnikowych, które nastąpiły w ostatnich latach, umożliwiają budowę nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciego. Taśmy HTS 2G na bazie itru mają odpowiednie parametry do budowy ograniczników na duże prądy i wysokie napięcia. W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarciego wykorzystuje się zjawisko wyjścia materiału nadprzewodnikowego ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego w wyniku przekroczenia wartości prądu krytycznego I_c . Od idealnego ogranicznika prądu zwarciego wymaga się prawie zerowej impedancji przy prądach roboczych oraz znacznych wartości impedancji w warunkach zwarcia, która ograniczy prąd zwarcioowy [1-12].

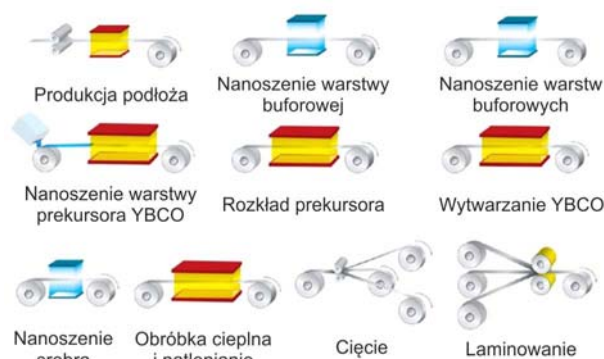
Taśmy nadprzewodnikowe HTS 2G

Strukturę taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji (taśma HTS 2G) firmy SuperPower przedstawiano na rysunku 1. Obecnie produkowane są taśmy nadprzewodnikowe HTS 2G bez stabilizatora i ze stabilizatorem miedzianym o szerokościach od 2 mm do 12 mm i grubościach podłoża 50 μm i 100 μm , z warstwą srebra od 2 μm do 4,5 μm . Taśmy HTS 2G ze stabilizatorem miedzianym przeznaczone są przede wszystkim do zastosowania w elektromagnesach i uzwojeniach transformatorów, natomiast taśmy bez stabilizatora przeznaczone są do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciego.

W procesie produkcji taśm nadprzewodnikowych 2G (rys. 2), na podłoże metalowe nanoszone są warstwy buforowe, a następnie warstwa odpowiedniego prekursora nadprzewodnika, z którego po obróbce cieplnej w atmosferze tlenowej tworzy się nadprzewodnik. Na warstwę nadprzewodnika nanoszona jest warstwa srebra, a następnie taśma jest cięta na węższe taśmy oraz laminowana w zależności od typu taśmy.



Rys. 1. Struktura taśmy nadprzewodnikowej HTS 2G firmy SuperPower [14]



Rys. 2. Proces produkcji taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji [14].

Taśmy nadprzewodnikowe typu SF (ang. Stabilizer Free) produkowane przez firmę SuperPower Inc. wykonane są w technologii cienkowarstwowej (rys. 1). Na podłoże taśm stosuje się niemagnetyczny stop Hastelloy C276 (Ni-57%, Mo-16%, Cr-15,50%, Fe-5,50%, W-4,00%, Co-2,50%) o grubości odpowiednio 50 μm dla taśmy SF12050 i 100 μm dla taśmy SF12100. Materiał nadprzewodnikowy (RE)BCO w taśmach typu SF ma grubość 1 μm . Podstawowe parametry produkowanych przez SuperPower taśm typu SF przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Parametry ogólne taśm SF12050 i SF12100 [14]

Taśma HTS 2G	SF12050	SF12100
Szerokość	12 mm	12 mm
Długość (odcinkowa)	do 700 m	do 600 m
Grubość	55 μm	105 μm
Grubość warstwy srebra	1 – 4,5 μm	1 – 4,5 μm
Grubość podłoża	50 μm	100 μm
Granica plastyczności	1200 MPa	650 MPa
Minimalna średnica gięcia	11 mm	25 mm
Materiał podłoża	C276	C276
Prąd krytyczny $I_{c(77\text{K})}$	200 – 450 A	200 – 450 A
Temperatura krytyczna T_c	~92 K	~92 K

Taśmy SF12050 oraz SF12100 są specjalnie zaprojektowane do zastosowania w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarciego, mają warstwę podłoża wykonaną z niemagnetycznego materiału o dużej rezystywności, dzięki czemu charakteryzują się małymi stratami przy przepływie zmiennego prądu roboczego. Do

budowy ograniczników prądu przeznaczone są taśmy bez stabilizatora miedzianego, w których warstwa nadprzewodnika o grubości 1 μm pokryta jest tylko cienką warstwą srebra (rys. 3).



Rys. 3. Taśmy nadprzewodnikowe SF 12100-CF i SF12050-AP

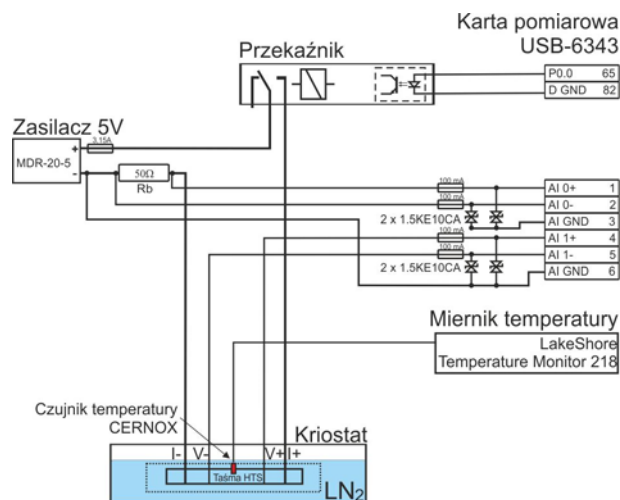
Przy prądach roboczych prąd w taśmie nadprzewodnikowej jest mniejszy od prądu krytycznego taśmy I_c . W stanie nadprzewodzącym prąd płynie w warstwie nadprzewodnika YBCO z pominięciem innych warstw. Podczas zwarcia wartość prądu w taśmie kilkakrotnie przekracza wartość prądu krytycznego I_c . Nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego i prąd w taśmie płynie głównie przez warstwę srebra (około 80-90%) oraz podłoże. Podczas przepływu prądu zwarciegowego następuje bardzo szybkie nagrzewanie się taśmy nadprzewodnikowej, dlatego taśma powinna się odpowiednią pojemnością cieplną. Podczas zwarcia temperatura oraz rezystancja taśmy rośnie, dlatego konieczne jest eksperymentalne wyznaczenie jej charakterystyki $R = f(T)$ [13-17].

Układ pomiarowy

Do przeprowadzenia pomiarów i wyznaczenia charakterystyki $R=f(T)$ taśm nadprzewodnikowych HTS 2G SF12050 i SF12100 zbudowany został laboratoryjny układ pomiarowy (rys. 4). Układ pomiarowy składa się z komputera z oprogramowaniem napisanym w środowisku LabVIEW, miernika temperatury Lake Shore Temperature Monitor 218 wraz z kriogenicznym czujnikiem temperatury typu CERNOX, karty pomiarowej NI USB-6343 (rys. 6.), kriostatu z ciekłym azotem, uchwytu próbki taśmy HTS 2G. Komunikacja miernika temperatury z komputerem realizowana jest przez port GPIB z wykorzystaniem konwertera GPIB-USB-HS+. Do pomiaru prądu (napięcia na boczniku) i napięcia na próbce taśmy wykorzystano dwa wejścia analogowe karty USB-6343 (rys. 5). Pomiar rezystancji taśmy nadprzewodnikowej wykonywany jest w czasie 50 ms prądem pomiarowym 100 mA, aby nie podgrzewać dodatkowo próbki. Pomiar wykonywany są co 0,1 K.



Rys.4. Laboratoryjny układ pomiarowy do wyznaczenia charakterystyki $R=f(T)$ taśm nadprzewodnikowych



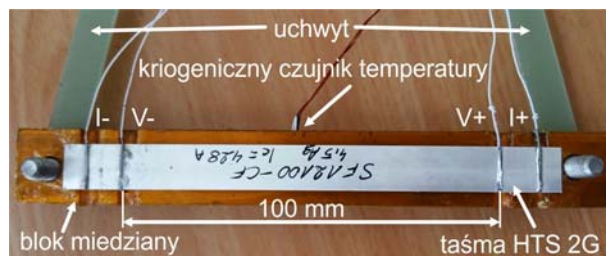
Rys. 5. Schemat układu pomiarowego



Rys.6. Układ pomiarowy – obwód zasilania i zabezpieczeń

Przygotowanie próbki taśmy HTS 2G

Próbka taśmy nadprzewodnikowej przygotowana do wyznaczenia charakterystyki $R=f(T)$ metodą czteroprzewodową ma przyłutowane dwa doprowadzenia prądowe (I-, I+) i dwa przewody do pomiaru napięcia (V-, V+) rozstawione w odległości 100 mm (rys. 7). Uchwyt próbki taśmy został wykonany z kompozytu szklano-epoksydowego do którego zamocowane są dwa płaskowniki miedziane izolowane taśmą poliimidową o grubości 50 μm . Po skręceniu uchwytu taśma nadprzewodnikowa przylega z obu stron do płaskowników, próbka jest izolowana elektrycznie, a jej temperatura mierzona jest czujnikiem LakeShore Cryotronics CERNOX model CX-1070-AA-4L-QL umieszczonym w otworze wykonanym w jednym z płaskowników miedzianych. Przewody pomiarowe przyłutowane są do próbki taśmy nadprzewodnikowej lutownicą na gorące powietrze stopem Sn62Pb36Ag2 w temperaturze 210°C.



Rys. 7. Próbką taśmy HTS 2G w uchwycie

Badanie charakterystyki $R=f(T)$

Pomiar charakterystyki $R=f(T)$ taśmy wykonany został w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 4. Po schłodzeniu uchwytu z próbką taśmy nadprzewodnikowej w kąpeli z ciekłym azotem do temperatury 77 K (rys. 8) uchwyt został wyjęty z kriostatu.

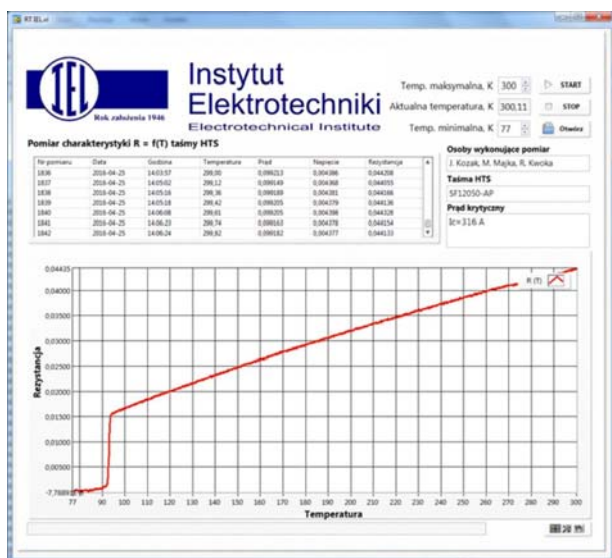


Rys. 8. Próbkę taśmy HTS 2G umieszczoną w uchwycie podczas chłodzenia w ciekłym azocie

Podczas powolnego ogrzewania rejestrowane są wyniki pomiarów w zakresie temperatur 77 K – 300 K. Do rejestracji pomiarów napisany został program RT IEL w środowisku LabView (rys. 9). Program umożliwia odczyt temperatury z miernika LakeShore Temperature monitor 218 przez port GPIB, sterowanie przekaźnikiem oraz zapis do pliku *.xls wszystkich rejestrowanych parametrów.

Tabela 2. Parametry badanych taśm HTS 2G typu SF

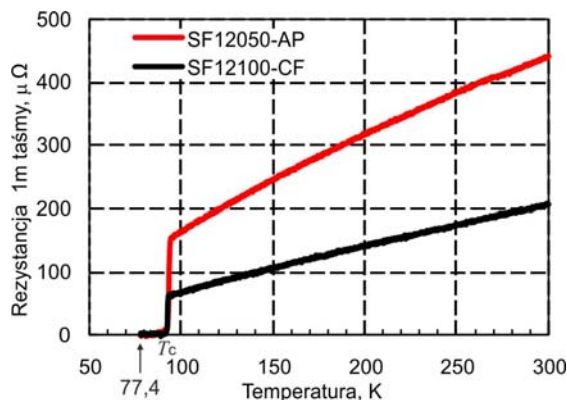
Taśma HTS 2G	SF12050-AP	SF12100-CF
Nr próbki	M3-1072-3	M4-91-1
Szerokość taśmy	12 mm	12 mm
Warstwa srebra	2 μm	4,5 μm
Grubość podłoża	50 μm	100 μm
Prąd krytyczny	316 A	428 A



Rys. 9. Program napisany w środowisku LabView do pomiaru charakterystyki $R=f(T)$.

Na wykresie (rys. 10) przedstawione zostały otrzymane charakterystyki $R=f(T)$ badanych taśm nadprzewodnikowych. Rezystancja obu taśm zmierzona w temperaturze 77 K jest bliska zeru. Na wykresie widoczne jest charakterystyczne przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego przy temperaturze krytycznej T_C . Taśma SF12100 ma około dwukrotnie mniejszą rezystancję od taśmy SF12050 po przekroczeniu T_C , wynika to z ponad dwukrotnie grubszej warstwy srebra. Grubsze podłoża taśmy SF12100 decyduje o większej pojemności cieplnej. W obliczeniach uzwojeń w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarciovego uwzględnia się zarówno rezystancję taśmy jak i pojemność

cieplną. Parametry te umożliwiają obliczenie temperatury taśmy podczas zwarcia.



Rys. 10. Zestawienie wyników badania charakterystyki $R=f(T)$

Wnioski

W artykule przedstawiono eksperymentalnie wyznaczone charakterystyki $R=f(T)$ taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji (SF12050 i SF12100) o szerokości 12 mm bez stabilizatora miedzanego. Badania wykonano w zakresie temperatur od 77,4 do 300 K. Badane taśmy nadprzewodnikowe różnią się grubością podłoża i grubością warstwy srebra. W pracy zaprezentowano sposób przygotowania próbek taśm nadprzewodnikowych do badań, opisano metodę pomiarową i sposób wykonywania pomiarów. Wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki $R=f(T)$ są niezbędne do projektowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu oraz analizy ich modeli numerycznych.

Artykuł powstał w wyniku prac prowadzonych w projekcie pt. „Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego (NOPZ) jako element zwiększający zdolności przyłączeniowe odnawialnych źródeł energii elektrycznej do elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej” w ramach Programu GEKON – Generator Konceptji Ekologicznych, wspólnej inicjatywy Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). Umowa Nr GEKON2/O2/267193/13/2015 o wykonanie i finansowanie.

Autorzy: dr hab. inż. Janusz Kozak, E-mail: j.kozak@iel.waw.pl; dr inż. Michał Majka, E-mail: m.majka@iel.waw.pl; Instytut Elektrotechniki, Zakład Wielkich Mocy, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa. mgr inż. Rafał Kwoka, E-mail: rafal.kwoka@wp.pl; Politechnika Lubelska, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin.

LITERATURA

- [1] Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., "Tests and Performance Analysis of Coreless Inductive HTS Fault Current Limiters", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21 (2011), No. 3, 1303 – 1306
- [2] Naeckel O., Noe M., "Design and Test of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter Demonstrator", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014), No. 3, 5601605
- [3] Czerwinski D., Jaroszynski L., Majka M., Kozak J., "Analysis of Alternating Overcurrent Response of 2G HTS Tape for SFCL", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014), No. 3, 5600104
- [4] Kozak J., Majka M., Kozak S., Janowski T., "Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 22 (2012), No. 3, 5601804

- [5] Kozak J., Majka M., Kozak S., Janowski T., „Comparison of Inductive and Resistive SFCL”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23 (2013), No. 3, 5600604
- [6] Heydari H., Sharifi R., “Three-Dimensional Pareto-Optimal Design of Inductive Superconducting Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 20 (2010), No. 5, 2301 - 2311
- [7] Jingye Z., Shaotao D., Zikai W., Dong Z., Zhifeng Z., Fengyuan Z., Zhenling X., Zhiqin Z., Guomin Z., Xi X., Naihao S., Zhiyuan G., Liangzhen L., Liye X., “Design, Fabrication, and Tests of Three HTS Coils for a Model Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 20 (2010), No. 3, 1135 - 1138
- [8] Naeckel O., Noe M., “Conceptual Design Study of an Air Coil Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23 (2013), No. 3, 5602404
- [9] de Sousa W.T.B., Naeckel O., Noe M., “Transient Simulations of an Air-Coil SFCL”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014), article nr 5601807
- [10] Janowski T., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Kozak J., Majka M., „Superconducting Winding for Inductive Type SFCL Made of HTS Tape With Increased Resistivity”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, issue: 3, pp. 1884 - 1887, 2009
- [11] Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Test and performance analysis of coreless inductive HTS fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 21, (2011), No. 3, 1303-1306
- [12] Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 22, (2012), No. 3, 5601804
- [13] Shin H.S., Dizon J.R., Oh S.S., Bonifacio R.F.: Bending Strain characteristics of the transport property in the lap-joined coated conductors tapes. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19 (2009), 2991-2994
- [14] SuperPower®2G HTS Wire Specifications, www.superpower-inc.com.
- [15] Maguire J.F., Yuan J.: Status of high temperature superconductor cable and fault current limiter projects at American Superconductors. *Physica C*, Vol.469 (2009), 874-880
- [16] Baldan C.A., Oliveira U.R., Shigue C.Y., Filho E.R.: Evaluation of Electrical Properties of Lap Joints for BSCCO and YBCO Tapes. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19 (2009) no. 3, 2831-2834.
- [17] Kozak J., Majka M.: Technologia łączenia taśm HTS 2G w uzwojeniach nadprzewodnikowych urządzeń elektrycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), no. 3, 157-160