

DOI: 10.5604/01.3001.0010.8658

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK $R = f(T)$ TAŚM NADPRZEWODNIKOWYCH PIERWSZEJ I DRUGIEJ GENERACJI

Rafał Kwoka¹, Janusz Kozak², Michał Majka¹¹Politechnika Lubelska, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ²Instytut Elektrotechniki, Zakład Wielkich Mocy, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono eksperymentalnie wyznaczone charakterystyki $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych pierwszej (1G) i drugiej generacji (2G). W pracy opisano sposób przygotowania próbek taśm nadprzewodnikowych 1G i 2G do badań, opisano metodę pomiarową oraz przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, taśmy nadprzewodnikowe HTS pierwszej i drugiej generacji, nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego

DETERMINATION OF $R = f(T)$ CHARACTERISTICS OF THE FIRST AND SECOND GENERATION SUPERCONDUCTING TAPES

Abstract. The experimental characteristics $R = f(T)$ of the first (1G) and the second (2G) generation HTS tapes are presented in this paper. The paper describes samples preparation of 1G and 2G superconducting tapes, describes the measurement method and the results of experimental studies.

Keywords: superconductivity, 1st and 2nd generation HTS tape, superconducting fault current limiter

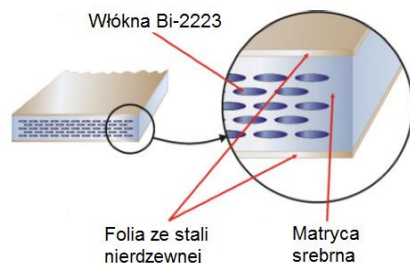
Wstęp

Obecnie produkowane taśmy nadprzewodnikowe pierwszej (1G) i drugiej generacji (2G) wytwarzane są w odcinkach o długości kilkuset metrów, a koszt ich wytwarzania jest coraz niższy. Taśmy nadprzewodnikowe znajdują zastosowanie w elektromagnesach, transformatorach nadprzewodnikowych, ogranicznikach prądów zwarciovych, silnikach elektrycznych czy też generatorach [2, 3, 4, 5, 8, 9]. Taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji bez stabilizatora miedzanego mają rezystancję w stanie rezystywnym wystarczająco dużą do budowy skutecznie działających ograniczników prądów zwarciovych.

Producenci taśm nadprzewodnikowych podają podstawowe parametry taśm nadprzewodnikowych takie jak szerokość taśmy, minimalną średnicę gięcia czy też wartość prądu krytycznego [4, 5, 8], nie podają jednak wartości rezystancji taśm mierzonych w różnych temperaturach. Charakterystyka $R = f(T)$ taśmy nadprzewodnikowej jest niezbędna do projektowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego i obliczeń modeli ograniczników metodą elementów skończonych.

1. Taśmy nadprzewodnikowe I i II generacji

Podział taśm nadprzewodnikowych na pierwszą i drugą generację wynika z różnicy w ich budowie wewnętrznej i technologii ich wytwarzania. Taśmy nadprzewodnikowe pierwszej generacji (1G) wytwarzane są metodą rurowo-proszkową [5]. Taśmy te mają budowę kompozytową i składają się z kilkudziesięciu włókien nadprzewodnika (Bi-2212 lub Bi-2223) umieszczonych wewnątrz srebrnej matrycy, rysunek 1 [5].



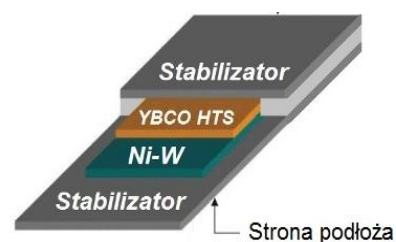
Rys. 1. Budowa taśmy nadprzewodnikowej pierwszej generacji [7]

Matrycą może być czyste srebro, stopy srebra ze złotem lub stopy innych metali [1]. Materiał matrycy ma decydujący wpływ na wytrzymałość mechaniczną taśmy. Obecnie głównym producentem taśm nadprzewodnikowych pierwszej generacji jest

firma Sumitomo Electric. Parametry taśmy DI-BSCCO produkowanej przez Sumitomo zamieszczono w tabeli 1. Taśmy HTS 1G typu HT (HT-SS, HT-CA, HT-NX) charakteryzują się wzmocnioną mechaniczną konstrukcją, dzięki dwustronnemu pokryciu warstwą stali nierdzewnej, miedzi lub niklu. Dodatkowo taśma jest uszczelniona obustronnie lutem w celu ograniczenia wnikania cieczy kriogenicznej do wnętrza taśmy [11].

Tabela 1. Parametry taśm HTS pierwszej generacji DI-BSCCO produkcji Sumitomo Electric [11]

| Taśmy pierwszej generacji DI-BSCCO firmy Sumitomo Electric | |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Szerokość | 2,8÷4,5 mm |
| Długość odcinkowa, | 500÷1500 m |
| Grubość | 0,23÷0,34 mm |
| Granica plastyczności | 130÷400 MPa |
| Minimalna średnica gięcia | 40÷80 mm |
| Materiał powłoki zewnętrznej | stal nierdzewna – 20 μm miedź – 50 μm nikiel – 30 μm |
| Prąd krytyczny I_C (77 K) | 60÷200 A |

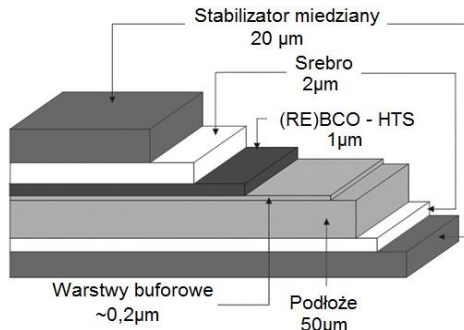


Rys. 2. Struktura taśmy HTS 2G firmy American Superconductor [10]

Tabela 2. Parametry taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji produkowanych przez firmę American Superconductor [10]

| Taśmy HTS drugiej generacji firmy American Superconductor | |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Szerokość | 4,24 ÷ 12,3 mm |
| Długość odcinkowa | 300 ÷ 800 m |
| Grubość | 0,18 ÷ 0,44 mm |
| Granica plastyczności, MPa | 150 ÷ 200 MPa |
| Minimalna średnica gięcia, mm | 40 ÷ 250 mm |
| Materiał powłoki zewnętrznej | stal nierdzewna – 25 μm miedź – 50 μm |
| Prąd krytyczny I_C w temp. 77 K | 60 ÷ 200 A |

Taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji (taśmy HTS 2G) składają się z szeregu warstw, z których wyróżniamy: warstwę podłoża odpowiadającą za parametry mechaniczne taśmy, kilku warstw buforowych, warstwy nadprzewodnika, warstwy srebra i warstwy stabilizatora miedzianego [2, 6, 12]. Strukturę taśm nadprzewodnikowych HTS drugiej generacji, której parametry zamieszczono w tabeli 2 i tabeli 3 przedstawiają rysunki 2 i 3.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny taśmy HTS 2G firmy SuperPower

Tabela 3. Parametry taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji produkowanych przez firmę SuperPower [12]

| Taśmy HTS drugiej generacji firmy SuperPower | |
|----------------------------------------------|----------------|
| Szerokość | 3÷12 |
| Długość odcinkowa | 300÷600 m |
| Grubość | 0,055÷0,105 mm |
| Granica plastyczności | 650÷1200 MPa |
| Minimalna średnica gięcia | 11÷25 mm |
| Materiał powłoki zewnętrznej | miedź – 50 µm |
| Prąd krytyczny I_c w temp. 77 K | 75÷300 A |

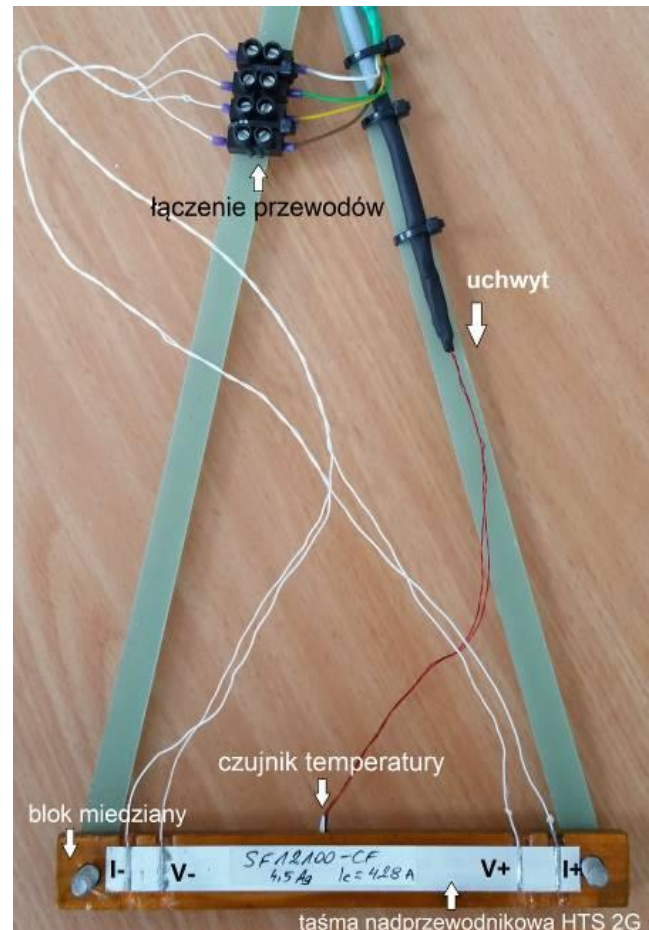
2. Przygotowanie próbek taśm HTS 1G i 2G do wyznaczania charakterystyk $R = f(T)$

Próbka taśmy nadprzewodnikowej przygotowana do wyznaczenia charakterystyki $R = f(T)$ metodą czteroprzewodową ma przylutowane dwa doprowadzenia prądowe (I-, I+) i dwa napięciowe (V-, V+) (rys. 4). Rozstaw przewodów pomiarowych wynosi 100 mm. Lutowanie przewodów pomiarowych do taśmy nadprzewodnikowej wykonano lutownicą na gorące powietrze w temperaturze zgodnie z zaleceniami producenta taśm nadprzewodnikowych (tabela 4). Do lutowania zastosowano pastę lutowniczą Sn62Pb36Ag2 o temperaturze topnienia 179°C.

Tabela 4. Zalecenia firmy SuperPower dotyczące lutowania taśm HTS [12]

| | SCS | SF |
|---------------------------|-----|-----|
| Temperatura lutowania, °C | 200 | 195 |
| Max. temp. lutowania, °C | 240 | 240 |

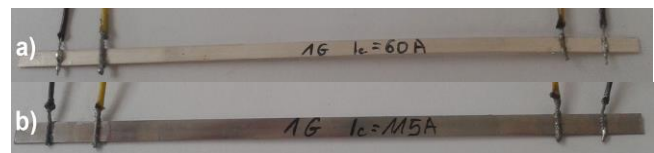
W celu wyznaczenia charakterystyki $R = f(T)$ został wykonany uchwyt dla próbek taśm nadprzewodnikowych. Uchwyt próbki taśmy wykonany z kompozytu szklano – epoksydowego do którego zamocowane są dwa płaskowniki miedziane izolowane folią poliamidową o grubości 50 µm. W płaskownikach wykonane są rowki w miejscach, w których do próbki przylutowane są przewody pomiarowe. Po skręceniu uchwytu taśma nadprzewodnikowa przylega z obu stron do płaskowników, próbka jest izolowana elektrycznie. Temperatura taśmy nadprzewodnikowej mierzona była kriogenicznym czujnikiem temperatury Cernox umieszczonym w otworze bloku miedzianego.



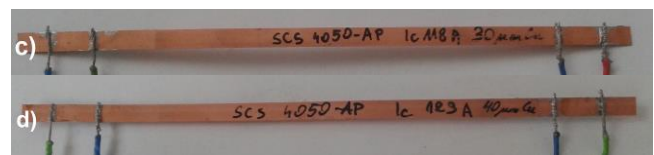
Rys. 4. Próbkę taśmy HTS 2G w uchwycie

Charakterystyki wyznaczone dla kilku próbek taśm nadprzewodnikowych pierwszej i drugiej generacji. Wybrane próbki przedstawiono na rysunkach:

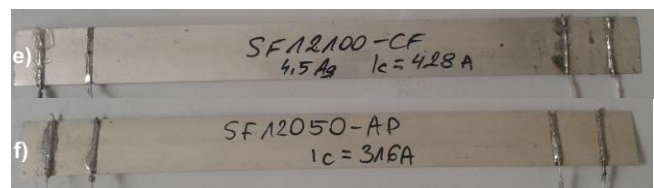
- 5a, 5b – taśmy 1G,
- 6c, 6d – taśmy 2G typu SCS ze stabilizatorem miedzianym,
- 7e, 7f – taśmy 2G typu SF bez stabilizatora miedzianego.



Rys. 5. Próbkę taśm HTS pierwszej generacji: a) taśma typu AMSC HSW ($I_c = 60$ A), b) taśma typu AMSC HSPW ($I_c = 115$ A)



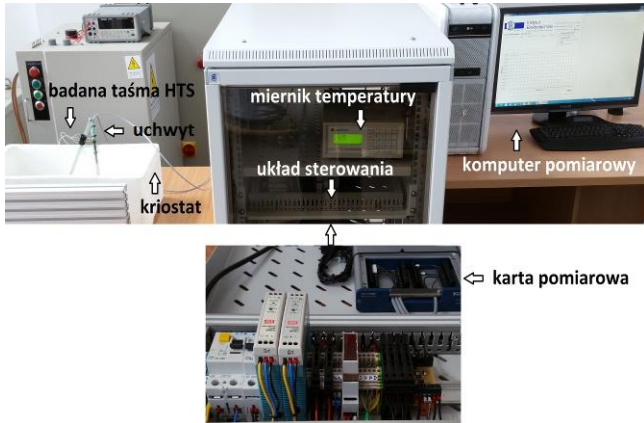
Rys. 6. Próbkę taśm HTS drugiej generacji: c) taśma typu SCS ($I_c = 118$ A), d) taśma typu SCS ($I_c = 123$ A)



Rys. 7. Próbkę taśm HTS 2G: e) typu SF12100-CF ($I_c = 428$ A) i f) typu SF12050-AP ($I_c = 316$ A)

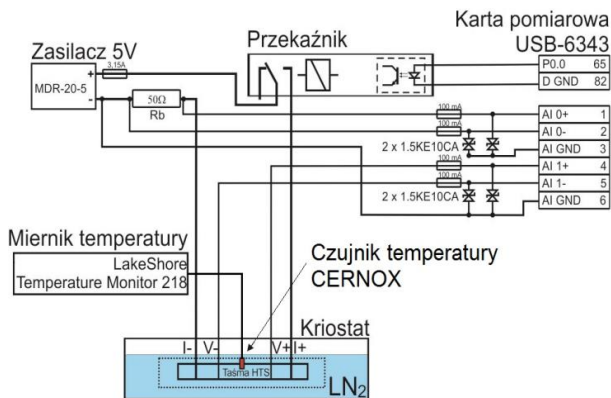
3. Układ pomiarowy

Do wyznaczenia charakterystyk $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych zaprojektowano i wykonano układ pomiarowy składający się z miernika temperatury LakeShore Model 218, układu sterowania, komputera pomiarowego z oprogramowaniem NI LabView, karty pomiarowej USB-6343 oraz kriostatu z ciekłym azotem do schłodzenia próbki (rysunek 8). Uproszczony schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 9.



Rys. 8. Laboracyjny układ pomiarowy

Wszystkie urządzenia laboratoryjnego układu pomiarowego są skomunikowane z komputerem. Oprogramowanie napisane w środowisku LabView umożliwia wykonanie pomiarów, wykreślenie charakterystyki oraz zapisanie rezultatów.



Rys. 9. Schemat układu pomiarowego

4. Wyznaczanie charakterystyk $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych 1G i 2G

Wykonano serie pomiarów taśm nadprzewodnikowych, których najważniejsze parametry zestawiono w tabeli 6.

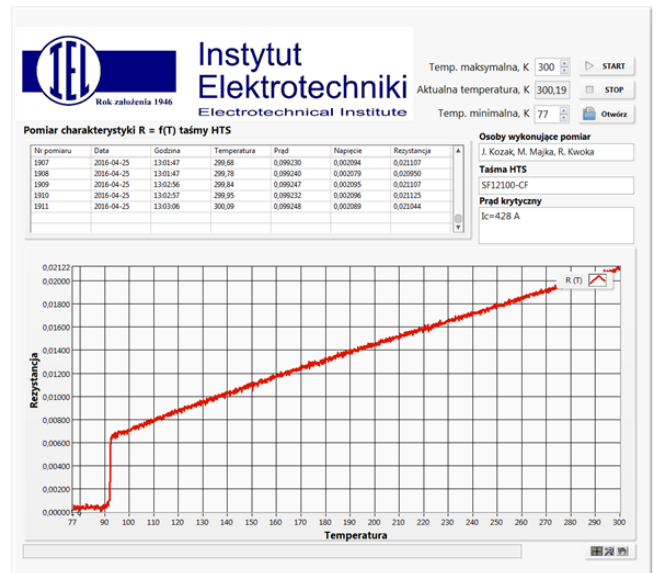
Tabela 6. Parametry zastosowanych taśm nadprzewodnikowych HTS [10, 12]

| Taśma HTS | SF 12050 AP | SF 12100 CF | SCS 4050 AP | SCS 4050 AP | AMSC HSW | AMSC HSPW |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|-----------|
| | 2G | 2G | 2G | 2G | 1G | 1G |
| Szerokość taśmy, mm | 12 | 12 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Grubość warstwy srebra, μm | 2 | 4,5 | 2 | 2 | - | - |
| Grubość warstwy miedzi, μm | - | - | 30 | 40 | - | - |
| Prąd krytyczny, A | 316 | 428 | 118 | 123 | 60 | 118 |

Po schłodzeniu uchwytu z próbką taśmy nadprzewodnikowej w kąpeli ciekłym azotem do temperatury 77 K (rysunek 10) uchwyt został wyjęty z kriostatu w celu powolnego ogrzania. Schłodzoną próbkę ogrzewano do temperatury pokojowej. Podczas jej ogrzewania mierzona była jej rezystancja i temperatura w zakresie od 77 do 300 K. Wyniki pomiarów rejestrowano przy użyciu programu napisanego w środowisku LabView (rysunek 11). Program umożliwia odczyt temperatury z miernika LakeShore Temperature Monitor 218 przez port GPIB, pomiar rezystancji próbki taśmy metodą czteroprzewodową oraz zapis wyników do pliku *.xls.



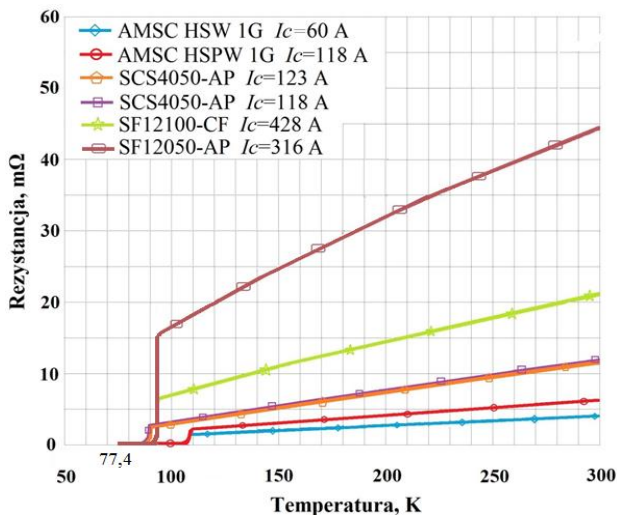
Rys. 10. Chłodzenie próbki w ciekłym azocie



Rys. 11. Program napisany w środowisku LabView do pomiaru charakterystyki $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych

Otrzymane wyniki wyznaczonych charakterystyk $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych zaprezentowano na rysunku 12. Rezystancja taśm zmierzona w temperaturze 77 K jest bliska zeru. Na charakterystyce widoczne jest przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego po przekroczeniu temperatury krytycznej. Najmniejszą rezystancję w stanie rezystywnym uzyskały taśmy 1G AMSC HSW i HSPW, taśma SF12100 ma około dwukrotnie mniejszą rezystancję od taśmy SF12050-AP, wynika to z różnicy w grubości warstwy srebra.

W obliczeniach uzwojeń w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarciovego uwzględnia się zarówno rezystancję taśmy jak i jej pojemność cieplną. Parametry te umożliwiają obliczenie temperatury taśmy podczas zwarcia [3, 4]. Taśma SF12100-CF ma dwukrotnie grubszą warstwę podłoża w porównaniu do taśmy SF12050-AP, dzięki czemu charakteryzuje się większą pojemnością cieplną i umożliwia zaprojektowanie nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego na dłuższy czas zwarcia.



Rys. 12. Wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych pierwszej i drugiej generacji (długość próbki 100 mm)

5. Wnioski

W artykule przedstawiono sposób przygotowania próbek taśm nadprzewodnikowych do badań, opisano metodę pomiarową i sposób wyznaczania charakterystyki $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych. Przedstawiono unikatowe wyniki nowej, niedostępnej na rynku komercyjnym próbce taśmy nadprzewodnikowej SF 12100-CF o grubości warstwy srebra 4,5 μm .

Taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji bez stabilizatora miedzianego SF12050-AP oraz SF12100-CF są specjalnie zaprojektowane do zastosowania w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarciowego. Przy prądach roboczych prąd płynący w taśmie nadprzewodnikowej jest mniejszy od prądu krytycznego taśmy I_C . W stanie nadprzewodzącym prąd płynie w warstwie nadprzewodnika REBCO z pominięciem innych warstw. Podczas zwarcia wartość prądu w taśmie kilkukrotnie przekracza wartość prądu krytycznego I_C , nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego i prąd w taśmie płynie głównie przez warstwę srebra oraz podłoże. Podczas zwarcia zarówno temperatura jak i rezystancja taśmy szybko rośnie, dlatego do prawidłowego projektowania ogranicznika konieczne jest eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki $R = f(T)$.

Literatura

- [1] 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 Transactions on Applied Superconductivity 3(19)/2009, 2831–2834 [DOI: 10.1109/TASC.2009.2017701].
- [2] Kozak J., Majka M.: Technologia łączenia taśm HTS 2G w uzwojeniach nadprzewodnikowych urządzeń elektrycznych. Przegląd Elektrotechniczny 3(90)/2014, 157–160 [DOI: 10.12915/pe.2014.03.34].
- [3] 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 Transactions on Applied Superconductivity 3(12)/2011, 1303–1306 [DOI: 10.1109/TASC.2010.2101033].
- [4] Kozak S., Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Wojtasiewicz G.: Experimental and numerical analysis of energy losses in resistive SFCL. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2(15)/2005, 2098–2101 [DOI: 10.1109/TASC.2005.849461].
- [5] Majka M., Kozak S.: Zastosowanie taśm I i II generacji do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu. Przegląd Elektrotechniczny 5(89)/2009, 183–185.
- [6] Nguyen N. T., Tixador P.: A YBCO-coated conductor for a fault current limiter: architecture influences and optical study. Superconductor Science and Technology 2(23)/2010 [DOI: 10.1088/0953-2048/23/2/025008].
- [7] Salazar A., Pastor J. Y., Lorca J.: Fatigue behavior of multifilamentary BSCCO 2223/Ag superconducting tapes. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 3(14)/2004, 1841–1847, [DOI: 10.1109/TASC.2004.830606].
- [8] Suarez P., Alvarez A., Ceballos J. M., Perez B.: Loss and transition studies of shunted free-stabilized YBCO tape for SFCL applications. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2(21)/2011, 1267–1270, [DOI:10.1109/TASC.2010.2102991].
- [9] Woźniak L., Wojtasiewicz G., Surdacki P., Komarzyniec G., Kwoka R.: Wpływ parametrów transformatora nadprzewodnikowego na ograniczenie prądu w stanach przejściowych. Przegląd Elektrotechniczny 7(92)/2016, 61–64, [DOI:10.15199/48.2016.07.12].
- [10] American Superconductor, HTS Wire [17.05.2016].
- [11] Sumitomo Electric, HTS Wire, www.global-sei.com [30.05.2016].
- [12] SuperPower 2G HTS Wire Specifications, www.superpower-inc.com [10.05.2016].

Mgr inż. Rafał Kwoka
e-mail: rafal_kwoka@wp.pl

Ukończył studia magisterskie w 2012 roku na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Obecnie doktorant w Instytucie Elektrotechniki i Elektrotechnologii na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Zajmując się badaniami taśm nadprzewodnikowych HTS stosowanych do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciowego.



Dr hab. inż. Janusz Kozak, prof. IEL
e-mail: j.kozak@iel.waw.pl

Profesor nadzwyczajny w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki. 2005–2007 pracował w CERN, gdzie zajmował się badaniem elektromagnesów nadprzewodnikowych dla LHC. W 2009 roku pracował w CERN przy uruchomieniu akceleratora LHC. Otrzymał Nagrodę Główną w Konkursie ABB w 2010 r. Jest współautorem ponad 50 publikacji w tym 31 z listy filadelfijskiej. Jest współtwórcą 6 patentów.



Dr inż. Michał Majka
e-mail: m.majka@pollub.pl

Adiunkt w Instytucie Elektrotechniki i Elektrotechnologii Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, gdzie zajmuje się projektowaniem i badaniami urządzeń nadprzewodnikowych: ograniczników prądu, elektromagnesów nadprzewodnikowych, zasobników energii oraz transformatorów. Współautor dwóch monografii, kilkudziesięciu publikacji naukowych i dwóch patentów. Brał udział w realizacji kilku projektów badawczych.



otrzymano/received: 15.06.2015

przyjęto do druku/accepted: 15.02.2018