

## Eksperymentalna metoda wyznaczania temperatury taśmy nadprzewodnikowej w stanie rezystywnym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę wyznaczania temperatury taśmy nadprzewodnikowej na podstawie zmierzonych przebiegów prądu i napięcia. Metoda ta została zaimplementowana w programie NI Diadem i służyła do wyznaczenia temperatury taśmy HTS 2G w stanie rezystywnym po przekroczeniu temperatury krytycznej. Przedstawiono zarejestrowane przebiegi prądu i napięcia zmierzone na powierzchni taśmy nadprzewodnikowej oraz obliczoną średnią wartość temperatury taśmy nadprzewodnikowej.

**Abstract.** The article presents a method for determining the temperature of a superconducting tape based on measured current and voltage waveforms. This method was implemented in the NI Diadem software and was used to determine the temperature of the HTS 2G tape in the resistive state after exceeding the critical temperature. Recorded current and voltage waveforms measured on the surface of the superconducting tape and the calculated average temperature value of the superconducting tape are presented. (**Experimental method of determining the temperature of the superconducting tape in resistive state.**)

**Słowa kluczowe:** taśma nadprzewodnikowa, pomiar temperatury, nadprzewodnik, stan rezystywny.

**Keywords:** superconducting tape, temperature measurement, superconductor, resistive state.

### Wstęp

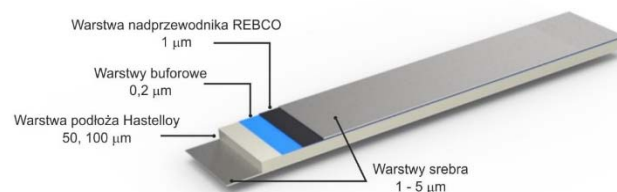
Materiały nadprzewodnikowe wykazują całkowity zanik rezystywności w warunkach, gdy punkt ich pracy określony przez temperaturę, gęstość prądu i gęstość strumienia magnetycznego leży poniżej powierzchni krytycznej charakterystycznej dla każdego z nadprzewodników. Przekroczenie powierzchni krytycznej powoduje natychmiastowe przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego (ang. quench). Przebieg procesu przejściowego zależy od budowy taśmy nadprzewodnikowej i nie jest jednoczesny na całej długości taśmy. Przekroczenie jednego z parametrów krytycznych powoduje lokalne przejście nadprzewodnika do stanu rezystywnego, czego następstwem jest powstanie strefy rezystywnej i lokalny wzrost temperatury. Silne nagrzewanie się taśmy nadprzewodnikowej na niewielkim obszarze może spowodować jej miejscowe termiczne zniszczenie. Badania taśm nadprzewodnikowych w stanie przejściowym są niezbędne do pełniejszego zrozumienia dynamiki zmian cieplnych zachodzących w taśmach i umożliwią łatwiejsze projektowanie urządzeń nadprzewodnikowych pracujących w stanie nadprzewodzenia [1-3].

Wszystkie urządzenia nadprzewodnikowe muszą być schłodzone do temperatury kriogenicznej. W każdym urządzeniu nadprzewodnikowym – elektromagnesie [10], transformatorze, czy nadprzewodnikowym ograniczniku prądu [4-6], konieczne jest monitorowanie temperatury uzwojeń nadprzewodnikowych. Szczególnie ważne jest monitorowanie temperatury taśmy nadprzewodnikowej w uzwojeniach nadprzewodnikowych ograniczników prądu, które bardzo szybko nagrzewają się w stanie rezystywnym. Obecnie w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarcia stosowane są najczęściej taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji (taśmy HTS 2G).

### Taśma nadprzewodnikowa SuperPower SF4050

Taśmy HTS 2G produkowane są przez kilku producentów między innymi firmę SuperPower wchodzącą w skład Furukawa Electric Group. Strukturę wewnętrzną taśmy typu SF (ang. Stabilizer Free) firmy SuperPower przedstawiano na rysunku 1. Taśmy typu SF firmy SuperPower produkowane są w pięciu szerokościach 2 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm i 12 mm, z minimalnym gwarantowanym prądem krytycznym  $I_c$  odpowiednio 50 A, 75 A, 100 A, 150 A i 300 A. Podłoże taśm wykonane jest z

rezystywnego niemagnetycznego stopu Hastelloy C276 (Ni-57%, Mo-6%, Cr-15,50%, Fe-5,50%, W-4,00%, Co-2,50%). Do produkcji taśm HTS 2G stosowane są podłoża o grubościach 30  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  i 100  $\mu\text{m}$ . Od grubości zastosowanego podłoża taśmy HTS zależy wytrzymałość mechaniczna taśmy i jej pojemność cieplna.



Rys. 1. Struktura taśmy nadprzewodnikowej HTS 2G firmy SuperPower typu SF bez stabilizatora miedzanego

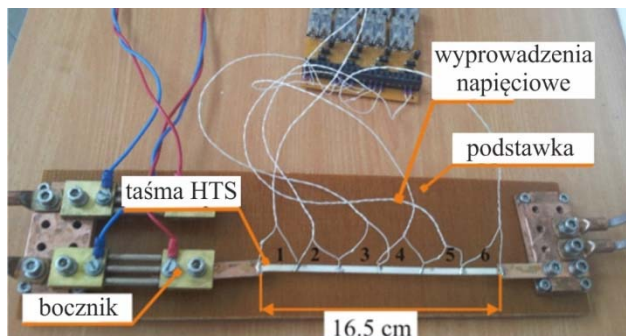
Tabela 1. Parametry taśmy nadprzewodnikowej firmy SuperPower HTS 2G typu SF4050

Parametr	Wartość
Szerokość taśmy	4 mm
Całkowita grubość taśmy	0,055 mm
Grubość warstwy srebra	2,0 $\mu\text{m}$
Grubość podłoża	50 $\mu\text{m}$
Grubość warstwy HTS	1 $\mu\text{m}$
Grubość warstwy buforowej	0,2 $\mu\text{m}$
Materiał podłoża	Hastelloy C276
Prąd krytyczny $I_c$	118 A
Temperatura krytyczna $T_c$	90 K
Rezystywność podłoża	125 $\mu\Omega\text{cm}$

Taśmy typu SF są specjalnie zaprojektowane do zastosowania w urządzeniach przemiennoprądowych, mają warstwę podłoża wykonaną z niemagnetycznego materiału o dużej rezystywności, dzięki czemu charakteryzują się małymi stratami przy przepływie przemiennego prądu roboczego. Warstwa nadprzewodnika ReBCO (ang. rare-earth barium copper oxide), najczęściej itr lub gadolin, ma grubość 1  $\mu\text{m}$ . Grubość warstwy srebra, od której w głównej mierze zależy rezystancja taśmy w stanie rezystywnym, może być zamówiona w dość szerokim zakresie od 1  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$ , standardowa grubość warstwy srebra wynosi 2  $\mu\text{m}$ . W tabeli 1 zamieszczono podstawowe parametry taśmy nadprzewodnikowej SF4050 użytej w badaniach eksperymentalnych.

## Badanie eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono na próbce taśmy nadprzewodnikowej HTS 2G typu SF4050 firmy SuperPower. Układ pomiarowy składał się z systemu zasilania, uchwytu z badaną taśmą nadprzewodnikową, systemu akwizycji danych pomiarowych. Do sterowania układem pomiarowym służy komputer wyposażony w oprogramowanie NI LabView i kartę pomiarową.



Rys. 2. Uchwyt z taśmą nadprzewodnikową z przyłutowanymi wyprowadzeniami napięciowymi

Uchwyt do przeprowadzania badań taśmy nadprzewodnikowej w stanach przejściowych przedstawia rys. 2. Do taśmy nadprzewodnikowej o długości 16,5 cm zostały przyłutowane miedziane końcówki oraz siedem wyprowadzeń napięciowych przyłutowanych do taśmy nadprzewodnikowej w odległościach co 2,5 cm. Pomiar napięcia zostały wykonane na każdym segmencie taśmy nadprzewodnikowej. Poszczególne odcinki wraz z numeracją zostały przedstawione na rysunku 2. Taśma nadprzewodnikowa z miedzianymi końcówkami została zamontowana do uchwytu pomiarowego. Wyprowadzenia napięciowe zostały podłączone do karty pomiarowej komputera pomiarowego. Do pomiaru prądu w obwodzie został użyty bocznik 250 A 60 mV. Pomiaru zostały przeprowadzone po schłodzeniu taśmy nadprzewodnikowej w kriostacie z ciekłym azotem pod ciśnieniem atmosferycznym. Testy zostały przeprowadzone dla różnych wartości prądu przepływającego przez taśmę nadprzewodnikową. Prąd płynący przez taśmę nadprzewodnikową miał wartość kilkukrotnie przekraczającą prąd krytyczny taśmy nadprzewodnikowej. Przykładowe zarejestrowane przebiegi prądu i napięcia zostały przedstawione na rys. 8.

## Metoda wyznaczania temperatury taśmy HTS na podstawie pomiarów elektrycznych

W praktyce przeprowadzenie dokładnych, bezpośrednich pomiarów temperatury taśm nadprzewodnikowych chłodzonych w kąpeli ciekłego azotu przy użyciu czujników temperatury jest niemożliwe. Wyniki przeprowadzonych pomiarów obarczone są błędami wynikającymi między innymi ze zbyt dużych rozmiarów czujników w stosunku do grubości taśm nadprzewodnikowych i ich pojemności cieplnych [7-9]. Alternatywą dla czujników temperatury są pomiary pośrednie temperatury poprzez pomiar prądu i napięcia na określonym odcinku taśmy nadprzewodnikowej. Na podstawie otrzymanych wartości można określić uśrednioną wartość temperatury taśmy nadprzewodnikowej.

Przy założeniu braku wymiany ciepła z otoczeniem temperaturę taśmy HTS można wyznaczyć z równania:

$$(1) \quad u(t) i(t) dt = s l c_p^{sr}(T) dT$$

gdzie:  $u(t)$  i  $i(t)$  - przebiegi napięcia i prądu,  $s$  - pole przekroju poprzecznego taśmy HTS,  $l$  - długość badanego

odcinka taśmy HTS,  $c_p^{sr}(T)$  - średnia wartość ciepła właściwego w funkcji temperatury,  $T$  - temperatura.

Równanie (1) po uwzględnieniu wymiany ciepła z cieczą chłodzącą może być zapisane w postaci:

$$(2) \quad u(t) i(t) dt = s l c_p^{sr}(T) dT + P_{ch}(T)$$

gdzie:  $P_{ch}(T)$  - moc cieplna oddawana do cieczy kriogenicznej przez chłodzoną powierzchnię taśmy nadprzewodnikowej. Moc oddawana przez powierzchnię chłodzącą jest wyznaczona z równania:

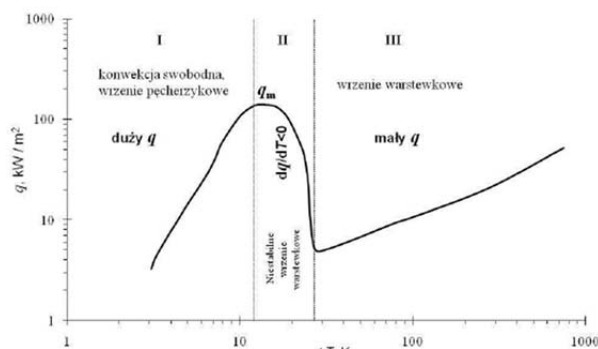
$$(3) \quad P_{ch} = h(T)(T - T_0) \cdot S_{ch} = \dot{q} \cdot S_{ch}$$

gdzie:  $h(T)$  - współczynnik konwekcji cieplnej,  $T_0$  - temperatura ciekłego azotu,  $S_{ch}$  - powierzchnia wymiany ciepła taśmy HTS,  $\dot{q}$  - gęstość strumienia ciepła przepływająca między powierzchnią chłodzącą i ciekłym azotem.

## Gęstość strumienia ciepła pomiędzy powierzchnią chłodzoną a ciekłym azotem

Określenie gęstości strumienia ciepła pomiędzy powierzchnią chłodzoną a ciekłym azotem jest niezbędne do obliczenia temperatury taśmy na podstawie pomiarów elektrycznych.

Zdolność ciekłego azotu do odprowadzania ciepła zależy od różnicy temperatur między cieczą kriogeniczną, a powierzchnią chłodzoną. Rysunek 3 przedstawia zależność gęstości strumienia ciepła przepływającego z chłodzonej powierzchni do cieczy chłodzącej od różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią a ciekłym azotem.

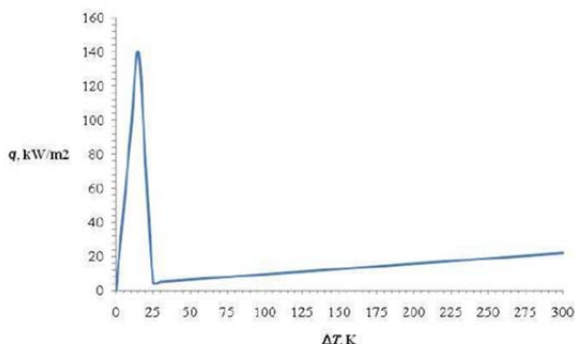


Rys.3. Przebieg gęstości strumienia ciepła  $\dot{q}$  przepływającego pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem o temperaturze 77 K w funkcji różnicy temperatury  $\Delta T$  pomiędzy powierzchnią a ciekłym azotem

Przy nieznacznym nagrzaniu ciała występuje oddawanie ciepła przez przewodzenie: różnica temperatur  $\Delta T$  jest wtedy minimalna. Przy wzroście nagrzania powstaje konwekcja swobodna: nagrzane przy powierzchni ciała warstwy ciekłego azotu unoszą się ku górze i oddają ciepło na powierzchni cieczy przez parowanie. Dla większej różnicy temperatur następuje tzw. wrzenie pęcherzykowe. W mikroskopijnych zagłębieniach na powierzchni ogrzewanego ciała powstają pęcherzyki pary. Pęcherzyki stopniowo zwiększają swoją objętość i odrywają się od powierzchni, ale nie docierają do powierzchni cieczy, ponieważ ulegają kondensacji wewnątrz masy azotu. Przy dalszym zwiększaniu nagrzewania na powierzchni tworzy się coraz więcej pęcherzyków, stają się one coraz większe i odrywając się od powierzchni chłodzonej docierają już do powierzchni cieczy. Wrzenie pęcherzykowe osiąga swój szczyt: z powierzchni chłodzonej odpyływa strumień ciepła o największej gęstości -  $q_m$ .

Nieznaczne przekroczenie nagrzewania ciała powoduje powstanie na powierzchni warstewki pary azotu i wskutek tego znaczne pogorszenie odprowadzania ciepła. Wrzenie to w przedziale II jest niestabilne. Najczęściej po osiągnięciu punktu  $q_m$  następuje przeskok do punktu na krzywej w przedziale III z jednoczesnym gwałtownym wzrostem temperatury chłodzonej powierzchni. W przedziale III wrzenie warstewkowe jest już stabilne. Tu pęcherzyki pary tworzą się na zewnętrznej powierzchni warstwy pary otaczającej chłodzoną powierzchnię, wobec czego powierzchnia ta nie ma już wpływu na proces chłodzenia.

Wartości gęstości strumienia ciepła  $q$  przepływającego pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatury  $\Delta T$  (pomiędzy powierzchnią chłodzoną a ciekłym azotem) znacznie różnią się w zależności od szybkości nagrzewania się powierzchni chłodzonej, w związku z tym w modelach numerycznych przedstawionych w dalszej części pracy przyjęto uproszczoną zależność  $q(\Delta T)$  przedstawioną na rys. 4. Do napisania skryptu służącego do wyznaczenia temperatury taśmy nadprzewodnikowej na podstawie wielkości elektrycznych (równania 2 i 3) przyjęto uproszczoną zależność przedstawioną na rysunku 4.



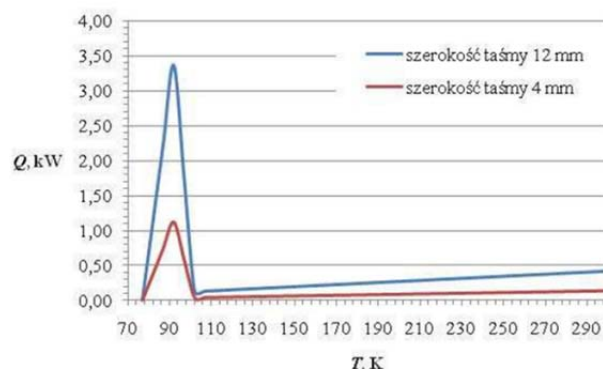
Rys. 4. Uproszczona zależność gęstości strumienia ciepła przepływającego pomiędzy chłodzoną powierzchnią a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatur pomiędzy ciekłym azotem a chłodzoną powierzchnią

W zależności od różnicy temperatur  $\Delta T$  gęstość strumienia ciepła ma różne wartości. Przykładowo, szybki wzrost temperatury elementu nadprzewodnikowego ogranicznika podczas przepływu prądu zwarciovego powoduje wzrost różnicy temperatur  $\Delta T$  w przybliżeniu od 100 do 200 K, następuje wrzenie warstewkowe ciekłego azotu, czego rezultatem jest niewielka wartość gęstości strumienia ciepła wynosząca od 13 do 26  $\text{kW/m}^2$ . Jeżeli chłodzony element ogranicznika zostanie schłodzony, to wartość gęstości strumienia ciepła spada nawet do około 6  $\text{kW/m}^2$  dla  $\Delta T \sim 35$  K. Największe wartości gęstości strumienia ciepła występuje przy  $\Delta T$  około 15 K, kiedy  $q$  ma największą wartość około 140  $\text{kW/m}^2$ .

Strumień ciepła przekazywany z powierzchni taśmy nadprzewodnikowej, o długości 1 metra i czterech różnych szerokościach 4 mm i 12 mm, do ciekłego azotu w funkcji temperatury powierzchni taśmy nadprzewodnikowej przedstawiono na rys. 5. Strumień ciepła został wyznaczony przy założeniu, że ciepło odprowadzane jest z obu stron taśmy nadprzewodnikowej.

Strumienia ciepła przekazywany z powierzchni taśmy nadprzewodnikowej do azotu rośnie osiągając maksymalną wartość dla temperatury taśmy  $T \approx 92$  K. Dla większych wartości temperatury powierzchni chłodzonej strumień ciepła osiąga znacznie mniejsze wartości. Ma to bardzo duże znaczenie dla taśmy HTS 2G dla której temperatura krytyczna  $T_c$  warstwy nadprzewodnikowej wynosi 90 K,

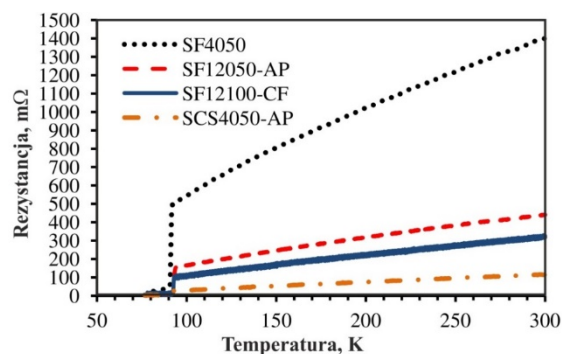
oznacza to, że po przekroczeniu temperatury krytycznej następuje nagłe pogorszenie warunków chłodzenia, a proces nagrzewania się taśmy jest w przybliżeniu adiabatyczny. Obliczone maksymalne wartości strumienia ciepła wynoszą: 3,36 kW dla taśmy o szerokości 12 mm i 1,12 kW dla taśmy 4 mm.



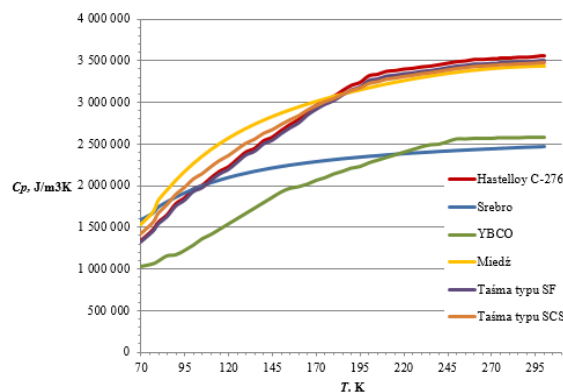
Rys. 5. Przebieg strumienia ciepła przepływającego z powierzchni taśmy nadprzewodnikowej do ciekłego azotu w funkcji temperatury taśmy

### Parametry taśm nadprzewodnikowych w funkcji temperatury

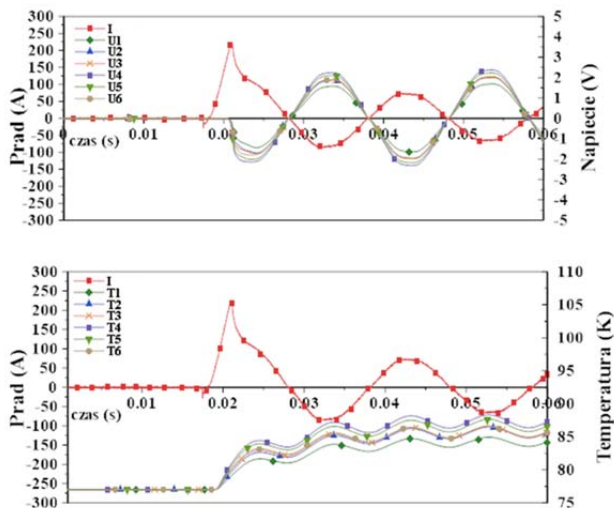
Eksperymentalnie wyznaczone zależności rezystancji taśm HTS 2G SF firmy SuperPower w funkcji temperatury przedstawiono na rys. 6. Rezystancja taśmy zmierzona w temperaturze 77 K jest bliska zeru. Na wykresach widoczne jest charakterystyczne przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego po ogrzaniu próbki powyżej temperatury krytycznej  $T_c$ .



Rys. 6. Eksperymentalnie wyznaczone zależności rezystancji taśm HTS 2G SF firmy SuperPower w funkcji temperatury (długość taśmy – 1 m, grubość warstwy srebra – 2  $\mu\text{m}$ )



Rys. 7. Zależność ciepła właściwego objętościowego materiałów wchodzących w skład taśm nadprzewodnikowych typu SF i SCS od temperatury oraz średnia wartość ciepła właściwego dla taśm typu SF oraz SCS



Rys. 8. Przebiegi prądu i napięcia oraz prądu i temperatury na poszczególnych odcinkach taśmy SF4050 dla napięcia skutecznego  $U_{rms}$  równego 9,1 V i prądu skutecznego  $I_{rms}$  równego 65 A.

Zależność średniej wartości ciepła właściwego objętościowego taśmy nadprzewodnikowej w funkcji temperatury  $c_p^{sr}(T)$ , rys. 7, wyznaczono z równania:

$$(4) \quad c_p^{sr}(T) = \frac{1}{s} \sum_i (s_i(T) c_i)$$

gdzie:  $s$  – całkowite pole powierzchni przekroju poprzecznego taśmy nadprzewodnikowej,  $s_i(T)$  – pole powierzchni poprzecznej  $i$  – tej warstwy taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji.

#### Skrypt w programie NI Diadem do obliczania temperatury taśmy nadprzewodnikowej podczas przepływu prądu

Skrypt do analizy zmian temperatury taśmy nadprzewodnikowej na podstawie pomiarów elektrycznych został opracowany w programie NI Diadem przy użyciu wieloparametrowych procedur. Obliczenia zostały wykonane na podstawie pomiarów prądu i napięcia pochodzących z badań eksperymentalnych. Obliczenia wykonano na podstawie równania bilansu energetycznego (2) przy założeniu przepływu ciepła pomiędzy taśmą HTS a ciekłym azotem. Aktualna temperatura  $T_2$  taśmy nadprzewodnikowej po upływie czasu  $dt$  wyznaczona była z równania (4):

$$(4) \quad T_2 = T_1 + \frac{1}{v \cdot c_p^{sr}(T) \cdot \rho} (P_e - P_{ch}) \cdot dt$$

gdzie:

$T_1$  – temperatura taśmy nadprzewodnikowej w poprzednim kroku obliczeniowym,  $P_e$  – straty mocy Joule'a w taśmie HTS. W obliczeniach przyjęto uproszczoną zależność gęstości strumienia ciepła od temperatury pomiędzy powierzchnią chłodzoną a ciekłym azotem (rys. 4). Przykładowe przebiegi prądu i napięcia oraz uzyskane zmiany temperatury na poszczególnych odcinkach taśmy SF4050 dla napięcia skutecznego  $U_{rms}$  równego 9,1 V i prądu skutecznego  $I_{rms}$  równego 65 A przedstawia rys. 8.

#### Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania średniej wartości temperatury taśmy nadprzewodnikowej w stanie rezystywnym na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądu i napięcia. Przedstawiona metoda może mieć zastosowanie również do wyznaczania średniej wartości temperatury uzwojeń elektromagnesów lub innych urządzeń nadprzewodnikowych. Analiza danych uzyskanych w badaniach eksperymentalnych pozwala stwierdzić, że przejście taśmy nadprzewodnikowej ze stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego zaczyna się w różnych punktach taśmy nadprzewodnikowej. Przekroczenie prądu krytycznego powoduje lokalne przejście do stanu rezystywnego.

**Autorzy:** dr hab. inż. Michał Majka, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: [m.majka@pollub.pl](mailto:m.majka@pollub.pl); dr hab. inż. Janusz Kozak, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: [j.kozak@pollub.pl](mailto:j.kozak@pollub.pl); prof. dr hab. inż. Sławomir Kozak, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: [s.kozak@pollub.pl](mailto:s.kozak@pollub.pl).

#### LITERATURA

- [1] M. Majka, "HTS tapes selection for superconducting current limiters," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, issue: 4, article number: 5601405, 2017, DOI: 10.1109/TASC.2017.2669191
- [2] M. Majka, S. Kozak, "The application of the first and second generation superconducting wires for superconducting fault current limiter construction", *Przeгляд Elektrotechniczny*, vol. 85, issue: 5, pp. 183-185, 2009
- [3] D. Czerwiński, L. Jaroszyński, M. Majka, J. Kozak, B. Charnas, "Comparison of overcurrent responses of 2G HTS tapes", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 26, issue: 3, article number: 5602904, April 2016, DOI: 10.1109/TASC.2016.2520080
- [4] G. Wojtasiewicz, T. Janowski, S. Kozak, et al. "Experimental Investigation of a Model of a Transformer-Type Superconducting Fault Current Limiter With a Superconducting Coil Made of a 2G HTS Tape", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 24, article number 5601005, 2014, DOI: 10.1109/TASC.2013.2295117
- [5] T. Janowski, G. Wojtasiewicz, B. Kondratowicz-Kucewicz, et al., "Superconducting Winding for Inductive Type SFCL Made of HTS Tape With Increased Resistivity", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 19, issue: 3, pp: 1884-1887, 2009, DOI: 10.1109/TASC.2009.2018068
- [6] J. Kozak, S. Kozak, T. Janowski, et al. "Design and Performance Results of First Polish SMES", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 19, issue: 3, pp. 1981-1984, 2009, DOI: 10.1109/TASC.2009.2018753
- [7] M. Lebioda, J. Rymaszewski, E. Korzeniewska, "Simulation of Thermal Processes in Superconducting Pancake Coils Cooled by GM Cryocooler", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 494, article number: 012018, 2014, DOI: 10.1088/1742-6596/494/1/012018
- [8] M. Lebioda, J. Rymaszewski, "Analysis of normal zone propagation in superconducting tapes initiated by thermal disturbance", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 709, article number: UNSP 012011, 2016, DOI: 10.1088/1742-6596/709/1/012011
- [9] R. Pawlak, M. Lebioda, J. Rymaszewski, W. Szymański, L. Kołodziejczyk, P. Kula, "A Fully Transparent Flexible Sensor for Cryogenic Temperatures Based on High Strength Metallurgical Graphene", *Sensors*, vol. 17, issue: 1, article number: 51, 2017, DOI: 10.3390/s17010051