

## Dynamika zmian ciepłych w cienkowarstwowych taśmach HTS w stanach przejściowych

**Streszczenie.** artykuł przedstawia problematykę dynamiki zmian ciepłych w cienkowarstwowych taśmach nadprzewodnikowych wykonanych na bazie nadprzewodników wysokotemperaturowych w stanach nieustalonych. Przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych dla taśmy SF12050 produkcji SuperPower. Taśma zasilana była prądem przemienny, którego amplituda znacznie przekraczała wartość krytyczną prądu taśmy równą 270 A. Wyniki pomiarów posłużyły do weryfikacji modeli obliczeniowych. W obliczeniach zostały uwzględnione nieliniowe zmiany w funkcji temperatury takich właściwości nadprzewodnika jak: rezystywność, przewodność cieplna, współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem i wartość prądu krytycznego.

**Abstract.** The article presents problems related to the thermal dynamics in thin layer high temperature superconducting tapes. The measurements and analysis of SF12050 tape produced by SuperPower were presented. The results of calculations were compared with measurements and good agreement was achieved. (*Thermal Dynamics in Thin Layer HTS Tapes in Transient States*).

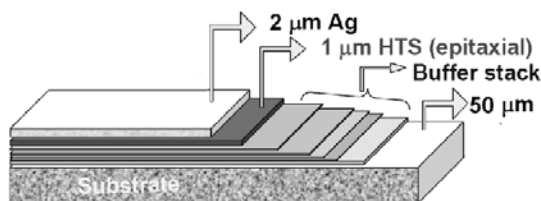
**Słowa kluczowe:** cienkowarstwowe taśmy HTS, stany przejściowe, modelowanie pola temperatury z użyciem MES.

**Keywords:** thin layer HTS tapes, transient states, FEM temperature field modelling.

doi:10.12915/pe.2014.02.07

### Wstęp

W nowoczesnych urządzeniach nadprzewodnikowych do budowy wykorzystywane są cienkowarstwowe taśmy nadprzewodnikowe HTS (wykonane z nadprzewodników wysokotemperaturowych). Taśmy te ze względu na swoje parametry oraz strukturę nazywane są taśmami drugiej generacji (rys.1). Właściwości fizyczne materiałów użytych do budowy taśm nadprzewodnikowych silnie zależą od temperatury, natężenia pola magnetycznego oraz prądu przepływającego przez nadprzewodnik.



Rys.1. Struktura cienkowarstwowej taśmy HTS [1]

Przekroczenie którejkolwiek z tych wartości powoduje powstanie strefy rezystywnej w nadprzewodniku i w efekcie końcowym wyjście ze stanu nadprzewodzenia. Skutkuje to miejscowym nagrzewaniem się taśmy często do temperatur przekraczających dopuszczalne wartości dla materiałów z jakich jest zbudowana taśma. Analiza pola cieplnego w stanach nieustalonych pozwoli na pełniejsze zrozumienie w jaki sposób zaburzenie rozwija się w taśmie HTS

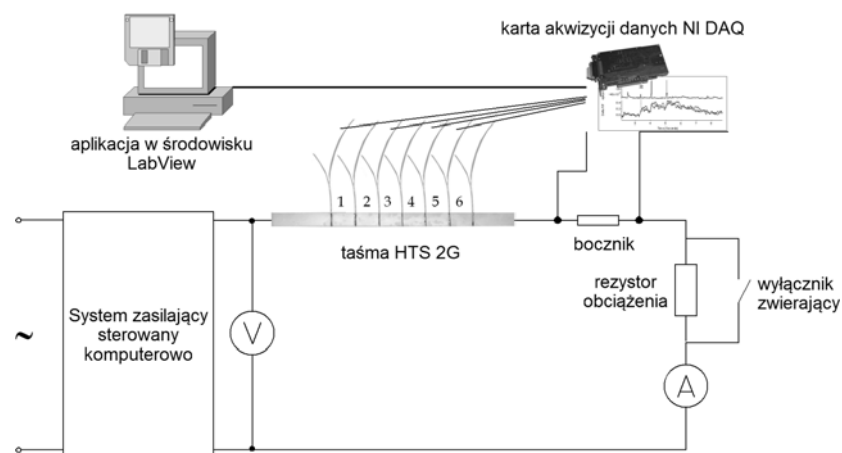
i umożliwi łatwiejsze projektowanie urządzeń nadprzewodnikowych wykorzystujących taśmy.

Taśma nadprzewodnikowa SF12050 zbudowana jest z następujących warstw: warstwy stopu Hastelloy C276 stanowiącego substrat o grubości 50 µm na powierzchni którego napylana jest warstwa buforowa grubości 0,2 µm, warstwy nadprzewodnika wysokotemperaturowego typu YBCO lub ReBCO o grubości 1 µm oraz warstwy srebra o grubości 2 µm. Prąd krytyczny badanego odcinka taśmy podany przez producenta jest równy 270 A.

### Pomiary dynamiki zmian ciepłych w taśmie SF12050

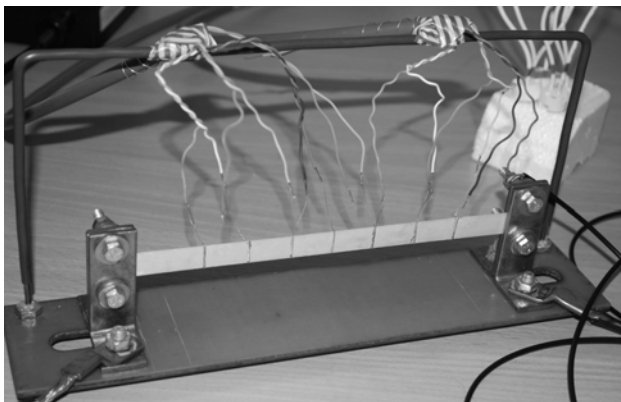
Pomiar temperatury w nadprzewodnikowej taśmie drugiej generacji jest skomplikowany ze względu na grubość taśmy oraz trudność w dotarciu sondą pomiarową bezpośrednio do warstwy nadprzewodnika. Dodatkowo w stanach przejściowych pojawiają się nierównomierność rozkładu temperatury w badanym odcinku. W tym celu został opracowany układ pomiarowy wykorzystujący sondy napięciowe umieszczone na taśmie.

Układ pomiarowy składa się z następujących elementów: taśmy nadprzewodnikowej SF12050, z przyłutowanymi co 2 cm sondami napięciowymi, chłodzonej w kąpeli ciekłego azotu; komputerowo sterowanego układu zasilania oraz systemu akwizycji danych (rys. 2). Układ zasilania pozwala na przeprowadzenie kontrolowanego zwarcia przy zasilaniu prądem przemiennym o zadanej wartości.



Rys.2. Układ pomiarowy do wyznaczania dynamiki zmian temperatury taśmy

W oprogramowaniu sterującym układem zasilania zadawane są cztery wartości czasów: czasu bezczynności  $t_0$ , czasu stanu ustalonego  $t_u$ , czasu zwarcia  $t_z$  oraz czasu po zwarcia  $t_p$ . Rezystor obciążenia jest włączony podczas stanu ustalonego i stanu po zwarcia, natomiast na czas zwarcia  $t_z$  jest zwierany wyłącznikiem sterowanym przez komputerowy system zasilania.



Rys.3. Taśma HTS SF12050 z przyłutowanymi sondami napięciowymi

Podczas jednego cyklu pomiarów rejestrowane są poprzez system akwizycji danych napięcia pochodzące z sond napięciowych taśmy SF12050 (rys. 3), napięcie zasilania oraz prąd zasilania. Zarejestrowane przebiegi prądu  $i(t)$  i napięć chwilowych  $u_n(t)$  (gdzie  $n$  to numer segmentu taśmy z rys. 2) pozwalają na wyznaczenie mocy chwilowych w poszczególnych odcinkach taśmy według zależności (1), a w dalszej kolejności w pośredni sposób zmian temperatury w mierzonych odcinkach cienkowarstwowej taśmy nadprzewodnikowej HTS.

$$(1) \quad p_n(t) = u_n(t) \cdot i(t)$$

Ciepło generowane może zostać wyznaczone z zależności (2) na podstawie przebiegu zarejestrowanej mocy chwilowej.

$$(2) \quad Q = PT_s = \int_0^{T_s} p(t) dt$$

gdzie:  $Q$  – generowane ciepło (J),  $p(t)$  – moc chwilowa (W),  $T_s$  – okres czasu (s),  $P$  – moc czynna (W).

Zakładając nagrzewanie segmentu taśmy w okresie dla prądu sinusoidalnego, wartość temperatury może zostać wyznaczona z zależności (3).

$$(3) \quad Q = m \cdot c(T) \cdot \Delta T$$

gdzie:  $c(T)$  – ciepło właściwe, zależne od temperatury (J/(kg·K)),  $m$  – masa obiektu (kg),  $\Delta T = T_1 - T_0$  – różnica temperatur (K).

Wyprowadzając z zależności (3) temperaturę segmentu taśmy finalnie otrzymujemy:

$$(4) \quad T_1 = \frac{Q}{m \cdot c(T)} + T_0$$

Masa  $m$  segmentu może zostać obliczona z poniższych zależności:

$$(5) \quad m = \rho \cdot V$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość właściwa,  $V$  – objętość segmentu.

Według Alferova i innych w [2], średnia gęstość i ciepło właściwe dla taśmy SF12050 są odpowiednio równe:

$$(6) \quad \rho = 8600 \text{ kg/m}^3$$

$$(7) \quad c(T) = 369,7 + 0,19 \cdot T \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

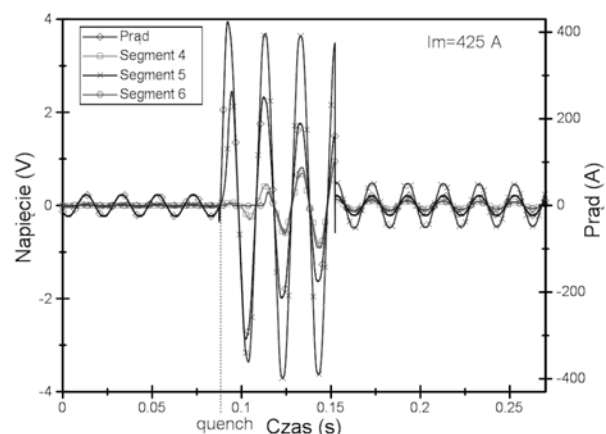
gdzie:  $T$  – temperatura (K).

Sondy napięciowe w niewielkim stopniu wpływają na zmianę mierzonych parametrów segmentów taśmy z tego względu, iż szerokość połączenia sonda-taśma wynosi około 0,2 mm a szerokość badanych segmentów 20 mm. Zmierzone wartości rezystancji całej taśmy przed i po umocowaniu sond napięciowych w temperaturze pokojowej były takie same. Pomiary w kąpeli ciekłego azotu zostały przeprowadzone dla kilku różnych wartości prądu zasilającego przekraczających wartość krytyczną prądu taśmy SF12050. Dla amplitudy prądu zasilającego zawierającej się w granicach od  $1,04 \cdot I_c$  do  $1,57 \cdot I_c$  tylko niektóre segmenty taśmy wychodzą ze stanu nadprzewodzenia głęboko do stanu rezystywnego, co można zaobserwować na przebiegach napięcia chwilowego jako gwałtowne skoki amplitudy napięcia (tabela 1).

Tabela 1. Zestawienie niejednorodności przejścia taśmy do stanu rezystywnego dla różnych amplitud prądu zasilającego

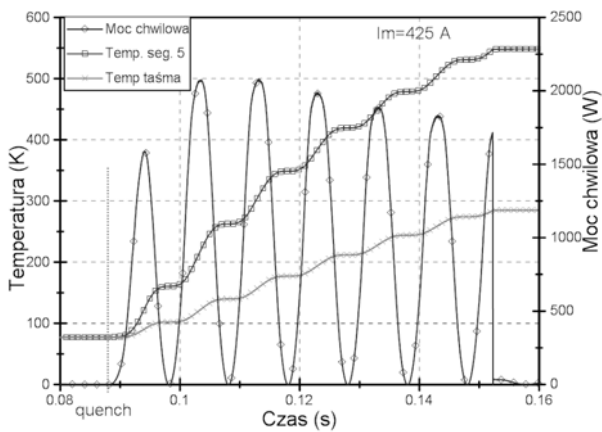
Amplituda prądu zasilania $I_m$ (A)	Stosunek $I_m/I_c$	Gwałtowna utrata nadprzewodnictwa w segmentach taśmy
280	1,04	2
378	1,40	4, 5, 6
380	1,41	1, 2, 3
400	1,48	2
422	1,56	1, 2
425	1,57	4, 5, 6

Przykładowe przebiegi prądu i napięć dla  $I_m=425$  A zostały przedstawione na rysunku 4. Można zauważyć, że segmenty taśmy nie wychodzą jednocześnie ze stanu nadprzewodzenia w ten sam sposób. W pierwszym półokresie od zaistnienia zaburzenia tylko segment 5 przechodzi do stanu rezystywnego. To, aby wszystkie segmenty taśmy wyszły gwałtownie i w miarę równomiernie do stanu rezystywnego, jest bardzo istotne dla poprawnego działania nadprzewodnikowych ograniczników prądowych [5].



Rys.4. Przebiegi prądu zasilającego oraz napięć na wybranych sondach dla  $I_m=425$  A

Na podstawie przebiegów chwilowych prądu i napięcia wyznaczona została moc chwilowa i temperatura poszczególnych segmentów taśmy SF12050 (rys. 5). Wartość temperatury określono za pomocą zależności (4).



Rys.5. Przebiegi mocy chwilowej oraz temperatury segmentu 5 i uśrednionej temperatury dla badanego odcinka taśmy SF12050 ( $I_m=425$  A)

### Model obliczeniowy

Wyniki przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych posłużyły do weryfikacji modelu obliczeniowego cienkowarstwowej taśmy SF12050. Model odzwierciedla strukturę taśmy przedstawioną na rys. 1 z pominięciem warstwy buforowej. Podobnie jak w układzie pomiarowym pokazanym na rys. 2 taśma została podzielona na osiem dwucentymetrowych odcinków.

Warunki chłodzenia w kąpeli cieczi kriogenicznej jaką jest ciekły azot  $LN_2$  zostały odwzorowane w postaci zmiennej wartości strumienia ciepła odbieranego z powierzchni taśmy. Nieliniowa zależność wartości strumienia od różnicy temperatur (rys. 6) została zaimplementowana w modelu z użyciem zewnętrznej metody oprogramowanej w języku LUA.

Nowe warunki brzegowe ustalone są dla każdego kroku obliczeń. W miejscu mocowań taśmy do zacisków miedzianych założono stałą wartość temperatury równą 77 K ze względu na masowność zacisków mocujących (górna i dolna krawędź modelu). W modelu powiązane zostało zagadnienie przepływu prądu z zagadnieniem rozkładu pola temperatur [4]. Właściwości fizyczne poszczególnych warstw modelu taśmy takie jak: konduktywności cieplne i rezystywności były nieliniowymi funkcjami temperatury. Dodatkowo uwzględniono zmieniającą się przenikalność magnetyczną nadprzewodnika, która zależy zarówno od temperatury jak i gęstości prądu przepływającego przez nadprzewodnik. Geometria modelu taśmy SF12050 z zaznaczonymi warunkami brzegowymi dla zagadnienia pola temperatur została przedstawiona na rys. 7.

Sprężenie zagadnień rozplywu pola temperatur i źródeł ciepła pochodzących od strat zmiennoprądowych i rezystancyjnych zostało wykonane w zewnętrznej aplikacji napisanej w języku LUA, natomiast do rozwiązania metodą elementów skończonych wykorzystano aplikację FEMM.

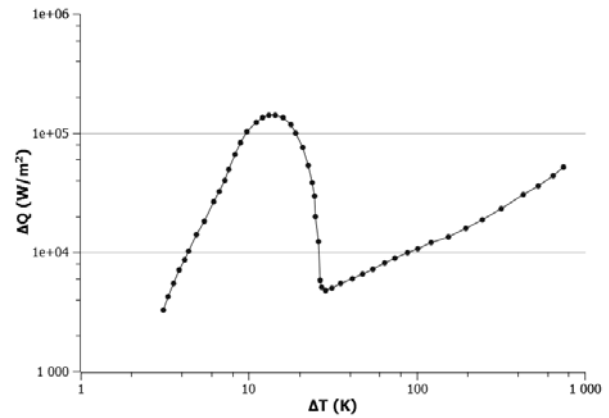
Równanie rozwiązywane dla zagadnień cieplnych przedstawiono poniżej:

$$(8) \quad \text{div}(-\lambda \text{grad}T) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = q_v$$

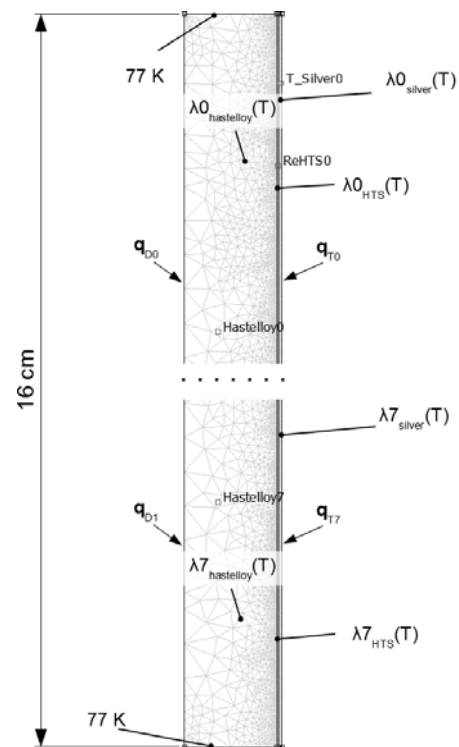
gdzie:  $q_v$  – gęstość mocy w jednostce objętości ( $W/m^3$ ),  $c_p$  – ciepło właściwe ( $J/(kg \cdot K)$ ).

Opracowany model pozwolił na wyznaczenie rozkładu temperatury w taśmie w stanach przejściowych. Rysunek 8 przedstawia rozkład temperatury w segmencie nr 5 taśmy, który to wyszedł ze stanu nadprzewodzenia, dla chłodzenia

w kąpeli cieczi kriogenicznej, w wybranych chwilach czasowych od momentu powstania zaburzenia (quench-u).

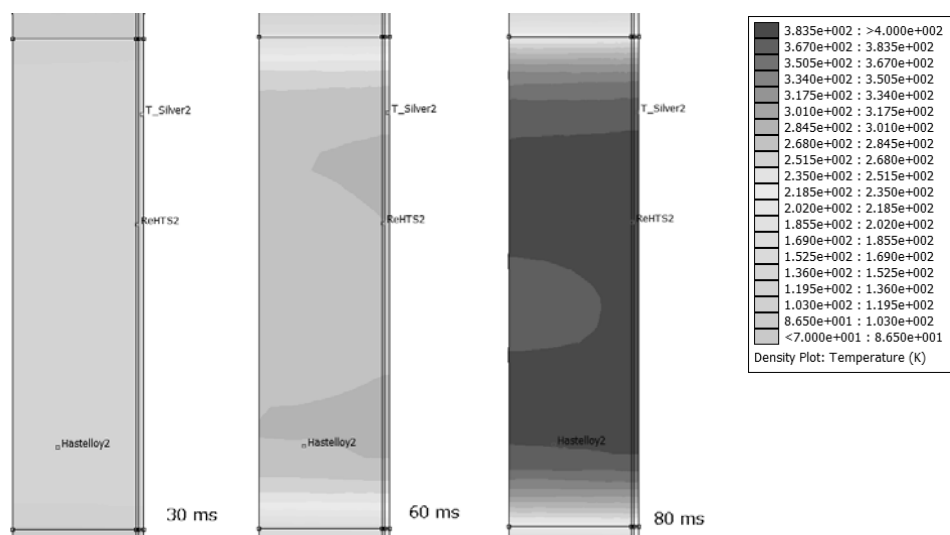


Rys.6. Strumień ciepła przepływający pomiędzy powierzchnią chłodzoną a ciekłym azotem dla zadanej różnicy temperatur  $\Delta T$  pomiędzy ciekłą kriogeniczną  $LN_2$  a powierzchnią [3]

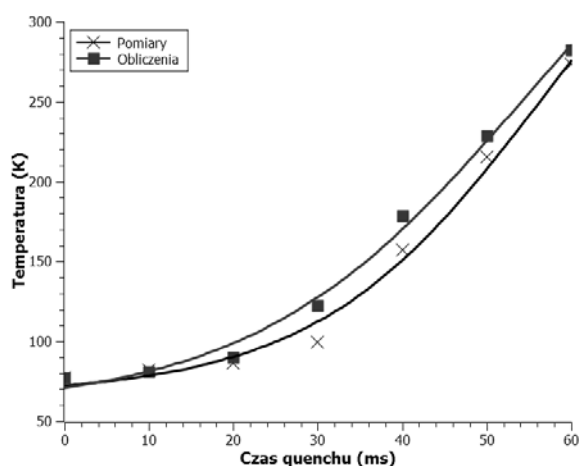


Rys.7. Model FEM taśmy z zaznaczonymi warstwami i warunkami brzegowymi

Wierzchnia warstwa srebra nagrzewa się do temperatury około 390 K po czasie 80 ms. Temperatura w całej szerokości taśmy rośnie raczej równomiernie. Przyrost temperatury taśmy w miejscu zaburzenia jest na tyle szybki, że pomimo chłodzenia w kąpeli ciekłego azotu, temperatura w pierwszym półokresie sinusoidy prądu przekracza wartość 110 K. Skutkuje to pogorszeniem się warunków chłodzenia, uwzględniając krzywą z rysunku 6 można zauważyć, że odbierany strumień ciepła z powierzchni taśmy maleje ponad dziesięciokrotnie. Powoduje to dalszy gwałtowny wzrost temperatury taśmy w miejscu zaburzenia.



Rys.8. Rozkład temperatury w miejscu zaburzenia w modelu cienkowarstwowej taśmy SF12050 dla wybranych czasów



Rys.9. Porównanie wartości temperatur obliczonych i zmierzonych w funkcji czasu w środku segmentu nr 5 taśmy SF12050

Wyniki przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych posłużyły do weryfikacji opracowanego modelu obliczeniowego (rys. 9). Porównanie zostało wykonane dla punktu znajdującego się na wierzchniej warstwie srebra w środku segmentu nr 5 taśmy, tam gdzie zaobserwowano najwyższy wzrost temperatury.

### Wnioski

Temperatura cienkowarstwowych taśm nadprzewodnikowych HTS w stanach nieustalonych zmienia się bardzo dynamicznie, przy przepływie prądu o wartości wyższej od krytycznej. Koniecznym jest dodatkowe ograniczenie tego prądu po pewnym czasie tak by zapobiec ewentualnym skutkom cieplnym. Na podstawie otrzymanych krzywych pomiarowych i obliczeniowych można stwierdzić, iż opracowany model dobrze odzwierciedla zmiany temperatury w cienkowarstwowej taśmie HTS w stanach nieustalonych.

### LITERATURA

- [1] SuperPower® 2G HTS Wire Specifications, <http://www.superpower-inc.com>, (2011)
- [2] Alferov D. et al: Study of superconducting fault current limiter model with AC circuit-breaker, *IEEE/CSC & ESAS (ESNF)*, January (2010), nr.11, 1-8
- [3] Kozak S.: Numerical model of superconducting fault current limiter, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2004), nr.11, 1101-1105
- [4] Czerwiński D., Wpływ rozchodzenia się strefy rezystywnej na stabilność pracy przepustów prądowych wykonanych z nadprzewodników wysokotemperaturowych HTS, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2013), nr.2b, vol. 89, 319-322
- [5] Łanczont M., Rezystancyjny nadprzewodnikowy ogranicznik prądu – analiza numeryczna w środowisku SciLab, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2013), nr.2b, vol. 89, 315-318

**Autorzy:** dr inż. Dariusz Czerwiński, Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, e-mail: [d.czerwinski@pollub.pl](mailto:d.czerwinski@pollub.pl)