

## Analiza parametrów zanikania nadprzewodzenia w przewodach nadprzewodnikowych YBCO i MgB<sub>2</sub>

**Streszczenie.** W pracy wykorzystano model komputerowy dynamicznego procesu zanikania nadprzewodzenia do obliczenia parametrów stabilności termicznej przewodów nadprzewodnikowych YBCO. Zbadano wpływ prądu i temperatury pracy przewodów na te parametry. Otrzymane wyniki umożliwiły porównanie parametrów stabilności przewodów YBCO i MgB<sub>2</sub>.

**Abstract.** In this paper, the computational model of the superconductivity loss (quench) dynamic process has been used to evaluate the thermal stability parameters of superconducting YBCO wires. Influence of working current and temperature on the above parameters has been investigated. The obtained results have made it possible to compare the stability parameters of YBCO and MgB<sub>2</sub> wires. (The quench parameter analysis of the YBCO and MgB<sub>2</sub> superconducting wires).

**Słowa kluczowe:** przewody nadprzewodnikowe YBCO i MgB<sub>2</sub>, parametry zanikania nadprzewodzenia, stabilność termiczna.  
**Keywords:** superconducting YBCO and MgB<sub>2</sub> wires, quench parameters, thermal stability.

doi:10.12915/pe.2014.02.05

### Wstęp

Przewody warstwowe 2. generacji YBCO (YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>) weszły w fazę produkcji przemysłowej i stają się bardzo obiecującym składnikiem nadprzewodnikowych urządzeń elektroenergetycznych. Przewody te wykazują znaczne wartości gęstości prądu krytycznego w obecności silnych pól magnetycznych przy wysokim poziomie temperatur ok. 77 K, które zapewnione są poprzez chłodzenie ciekłym azotem. Taki sposób chłodzenia eliminuje znaczne rozmiary całego układu i koszty chłodzenia kriochłodziarką mechaniczną. W zakresie temperatur 60 – 80 K właściwości cieplne przewodów YBCO powodują jednak bardzo powolną dyfuzję ciepła wzdłuż przewodu. Prowadzi to do nadmiernego lokalnego nagrzewania się przewodu w przypadku wystąpienia zaburzenia nadprzewodzenia. W rezultacie zarówno prędkość propagacji strefy rezystywnej w przewodzie jak i przyrost napięcia są niewielkie, co utrudnia działanie układu zabezpieczającego przed niekontrolowaną utratą nadprzewodzenia.

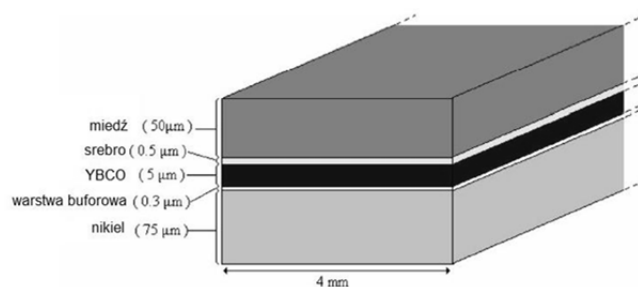
Mimo prowadzonych ostatnich badań eksperymentalnych nad zanikaniem nadprzewodzenia w taśmach warstwowych YBCO [1,2], wciąż trudny jest do opracowania jego model matematyczny, który uwzględniałby złożone procesy fizyczne, takie jak wpływ rezystancji styków, zjawisko Halla, efekty pojemnościowe oraz szybkie oddziaływania elektrotermiczne pomiędzy warstwami [2,3].

Do badania procesu zanikania nadprzewodzenia w przewodzie warstwowym YBCO wykorzystano w pracy makroskopowy komputerowy model zanikania nadprzewodzenia opracowany w [4,5]. Model ten uwzględnia silnie nieliniową zależność temperaturową pojemności i przewodności cieplnej oraz rezystywności przewodu. Przy jego użyciu dokonano określenia wpływu temperatury  $T_0$  przewodu oraz prądu roboczego  $I_r$  na wybrane parametry dynamicznego procesu zanikania nadprzewodzenia w przewodzie warstwowym YBCO. Otrzymane wyniki porównano z odpowiednimi parametrami stabilności dla przewodu włóknistego MgB<sub>2</sub>.

### Parametry przewodu nadprzewodnikowego YBCO

Przewód nadprzewodnikowy YBCO w kształcie cienkiej taśmy warstwowej 2 generacji (rys. 1) [6] ma szerokość 4 mm i grubość zaledwie 130,8 μm, na którą składa się pięć warstw. Podłoże taśmy wykonane ze stopu niklu (grubość 75 μm) oddzielone jest od warstwy nadprzewodnika YBCO (5 μm) warstwą buforową (0,3 μm). Nadprzewodnik jest z kolei oddzielony od warstwy miedzi (50 μm), pełniącej funkcję stabilizatora cieplnego i elektrycznego, cienką

warstwą srebra (0,5 μm). Parametry przewodu warstwowego YBCO zamieszczono w tab. 1. W modelu założono liniowość charakterystyki prądu krytycznego  $I_c(T)$  przewodu nadprzewodnikowego YBCO przy braku zewnętrznego pola magnetycznego.



Rys. 1. Przekrój przewodu nadprzewodnikowego YBCO 2 generacji [6]

Tabela 1. Parametry materiałowe przewodu YBCO [6]

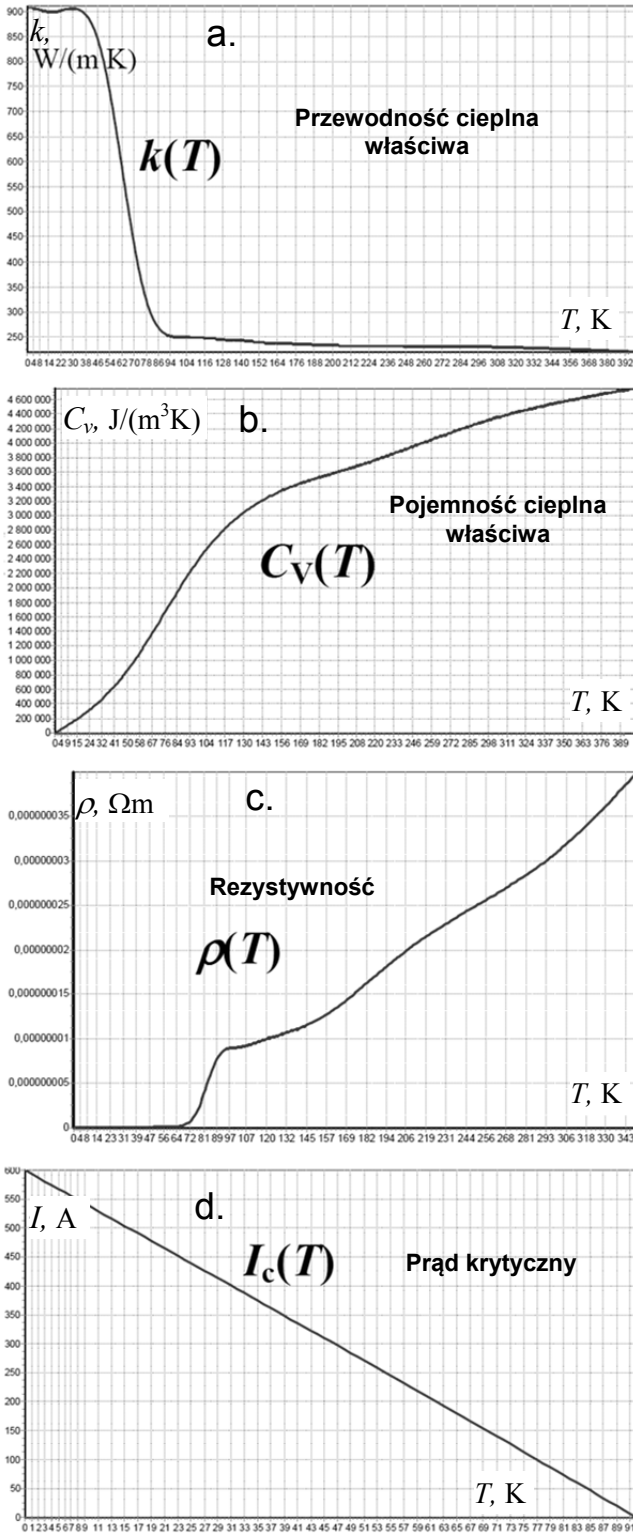
Wykładnik potęgowy $n$	15
Temperatura krytyczna $T_c$	92 K
Współczynnik wypełnienia $\eta$	3,8 %
Pole przekroju poprzecznego $A$	0,52 mm <sup>2</sup>
Średnia gęstość przewodu $\gamma$	8650 kg/m <sup>3</sup>
Prąd krytyczny (przy 77 K)	100 A

Do obliczenia zastępczej pojemności cieplnej właściwej  $C_v(T)$  [J/(m<sup>3</sup> K)] na podstawie ciepła właściwego  $c$  [J/(kg K)] wyznaczono uśrednioną gęstość analizowanego przewodu (tab. 2). Ze względu na bardzo niewielki udział w przekroju poprzecznym warstwy srebra oraz buforową pominięto przy obliczaniu średniej gęstości. Na podstawie danych z rys. 1 wyznaczono procentową zawartość składników w przewodzie (tab. 2).

Tabela 2. Procentowa zawartość składników przewodu YBCO wraz z ich gęstością [5]

Materiał	Zawartość	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
Ni	57,7%	8350-8900 (8700)
Cu	38,5%	8933
YBCO	3,8%	4400-5300 (5000)

Na podstawie parametrów wejściowych w programie *TapeStab* [5] otrzymano aproksymowane charakterystyki temperaturowe przewodu YBCO (analogicznie jak dla przewodu włóknistego MgB<sub>2</sub>/Cu): przewodności cieplnej właściwej  $k(T)$ , pojemności cieplnej właściwej  $C_v(T)$ , rezystywności taśmy  $\rho(T)$  i prądu krytycznego  $I_c(T)$  przewodu warstwowego YBCO (rys. 2).



Rys. 2. Charakterystyki temperaturowe taśmy YBCO: a) przewodności cieplnej właściwej  $k(T)$ , b) pojemności cieplnej właściwej  $C_v(T)$ , c) rezystywności  $\rho(T)$  i d) prądu krytycznego  $I_c(T)$

### Wpływ prądu i temperatury pracy na parametry zanikania nadprzewodzenia w przewodzie YBCO

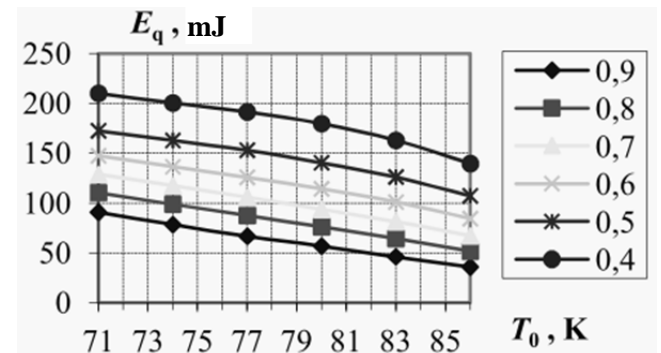
Obliczenia stanów dynamicznych zanikania nadprzewodzenia przeprowadzono dla przewodu YBCO o prądzie roboczym  $I_r = 90 A$  chłodzonego ciekłym azotem o temperaturze wrzenia  $T_0 = 77 K$ , będącym czynnikiem chłodzącym w wielu zastosowaniach energetycznych (kable, ograniczniki prądu), jak też w zakresie temperatur roboczych  $T_0 \in \langle 71 K; 86 K \rangle$ , uzyskiwanych na drodze

chłodzenia kontaktowego przy użyciu kriochłodziarki mechanicznej. Do analizy przyjęto odcinek przewodu o długości  $l = 200 mm$  oraz zaburzenie cieplne o czasie trwania  $t_z = 10 ms$  przy długości  $x_z = 4 mm$ . Prąd roboczy zmieniano w zakresie  $I_r \in \langle 16 A; 126 A \rangle$  co odpowiada względnemu prądowi roboczymu  $i_r = I_r/I_c(T)$  odniesionemu do prądu krytycznego w danej temperaturze  $i_r \in \langle 0,3; 0,9 \rangle$ .

Na podstawie przebiegów czasowych temperatury w obszarze zaburzenia cieplnego w przewodzie YBCO wyznaczono wpływ prądu i temperatury pracy na podstawowe parametry określające dynamikę procesu zanikania nadprzewodzenia.

### Minimalna energia utraty nadprzewodzenia

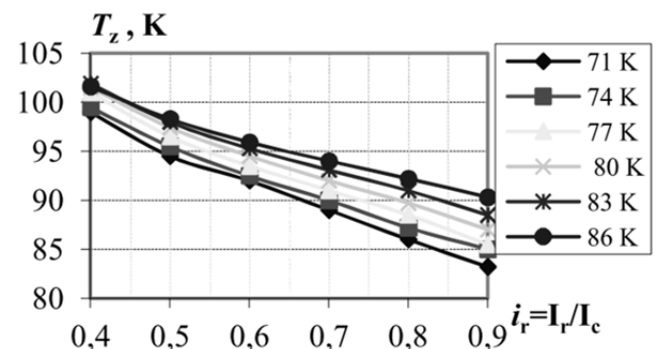
Minimalna energia utraty nadprzewodzenia  $E_q = f(T_0, I_r)$  (rys. 3) rośnie wraz ze spadkiem wartości prądu roboczego  $I_r$  w przewodzie, natomiast maleje wraz ze wzrostem temperatury pracy  $T_0$ . Zatem wraz ze zmniejszaniem się marginesu temperatury zmniejsza się minimalna energia utraty nadprzewodzenia  $E_q$ , pogarszając stabilność nadprzewodzenia taśmy.



Rys. 3. Zależność minimalnej energii utraty nadprzewodzenia  $E_q(T_0, i_r)$  od temperatury  $T_0$  i prądu roboczego  $i_r$

### Temperatura zaburzenia

Dzięki analizie stanu dynamicznego zanikania nadprzewodzenia można uzyskać wartość temperatury zaburzenia  $T_z$ , do jakiej nagrzewa się przewód w wyniku wystąpienia zaburzenia cieplnego o energii  $E_z$ . Obliczenia wartości temperatury zaburzenia przeprowadzono dla zaburzeń o energii równej minimalnej energii utraty nadprzewodzenia  $E_q$ .



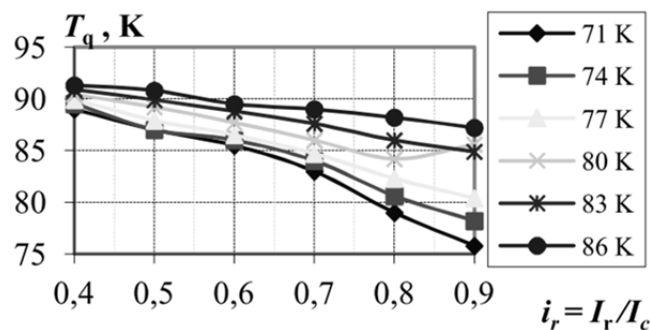
Rys. 4. Zależność temperatury zaburzenia  $T_z=f(i_r, T_0)$  od prądu  $i_r$  i temperatury  $T_0$

Z zależności  $E_q = f(I_r, T_z)$  (rys. 4) wynika, że im niższa jest wartość prądu roboczego w przewodzie, tym większy musi być lokalny wzrost temperatury, aby wystąpiła nieodwracalna utrata stanu nadprzewodzenia. Jednocześnie przy dużych wartościach prądu roboczego

temperatury zaburzenia przyjmują wartości znacznie mniej zbliżone do siebie, niż ma to miejsce w przypadku małych wartości prądu roboczego. Wskazuje to na znacznie większą dynamikę procesu utraty nadprzewodzenia przy prądach bliższych prądowi krytycznemu.

### Temperatura utraty nadprzewodzenia

W warunkach niestabilnej pracy przewodu w stanie dynamicznym po osiągnięciu przez temperaturę wartości równej temperaturze utraty nadprzewodzenia  $T_q$  rozpoczyna się gwałtowny wzrost temperatury przewodu nadprzewodnikowego, prowadzący do nieodwracalnej utraty stanu nadprzewodzenia.

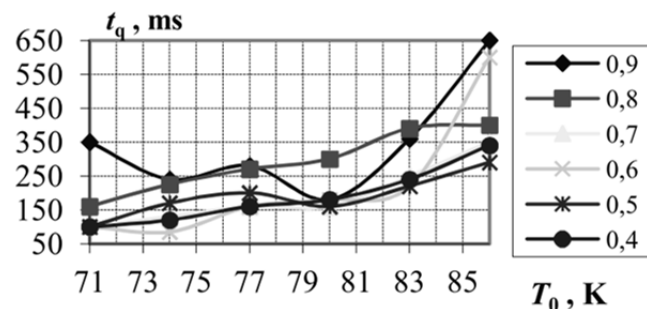


Rys. 5. Zależność temperatury utraty nadprzewodzenia  $T_q = f(i_r, T_0)$  od prądu  $i_r$  dla różnych wartości temperatury pracy  $T_0$

Z zależności  $T_q = f(i_r, T_0)$  (rys. 5) uzyskanej z obliczeń stanów dynamicznych wynika, że wartość tej temperatury wzrasta wraz ze spadkiem wartości prądu roboczego w przewodzie oraz że wartości temperatury utraty nadprzewodzenia dla różnych temperatur początkowych zbliżają się do siebie. Przy dużym prądzie roboczym gwałtowny wzrost temperatury przewodu rozpoczyna się od znacznie niższych wartości niż przy małym prądzie  $I_r$ .

### Czas utraty nadprzewodzenia

Parametrem określającym dynamikę procesu utraty nadprzewodzenia w przewodzie nadprzewodnikowym jest czas utraty nadprzewodzenia  $t_q$ . Określa on długość czasu jaki upływa od początku impulsu zaburzającego nadprzewodzenie do chwili, gdy temperatura przewodu zaczyna gwałtownie rosnąć, powodując nieodwracalną utratę stanu nadprzewodzenia w przewodzie.



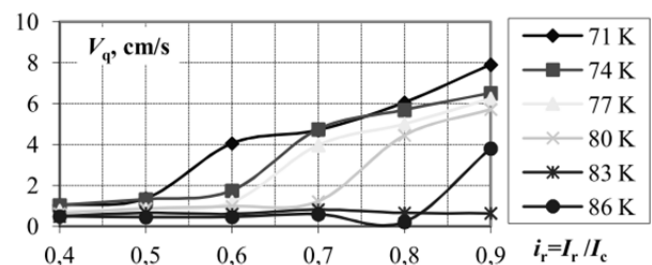
Rys. 6. Zależność czasu utraty nadprzewodzenia od temperatury  $t_q = f(T_0, i_r)$  dla różnych wartości prądu roboczego  $i_r$

Z otrzymanej zależności czasu utraty nadprzewodzenia  $t_q = f(i_r, T_0)$  (rys. 6) dla taśmy nadprzewodnikowej YBCO wynika, że dynamika procesu utraty nadprzewodzenia zależy przede wszystkim od wartości prądu roboczego  $I_r$ . W niższych temperaturach względny prąd roboczy (odniesiony do prądu krytycznego w danej temperaturze)  $I_c(T)$  ma większe wartości, a jednocześnie czas utraty

nadprzewodzenia  $t_q$  ma niższe wartości niż w temperaturach bliższych temperaturze krytycznej  $T_c$ .

### Prędkość propagacji strefy rezystywnej

Z charakterystyk prędkości propagacji strefy rezystywnej  $V_q = f(i_r, T_0)$  (rys. 7) otrzymanych z obliczeń procesu zanikania nadprzewodzenia wynika, że parametrem mającym największe znaczenie dla prędkości  $V_q$  jest wartość prądu roboczego w przewodzie. Prąd ten został dobrany w odniesieniu do prądu krytycznego  $I_c(T_0)$  w danej temperaturze pracy, tzn. że w niższych temperaturach wartość prądu roboczego dla np.  $0,9 I_c$  jest większa niż w wyższych.



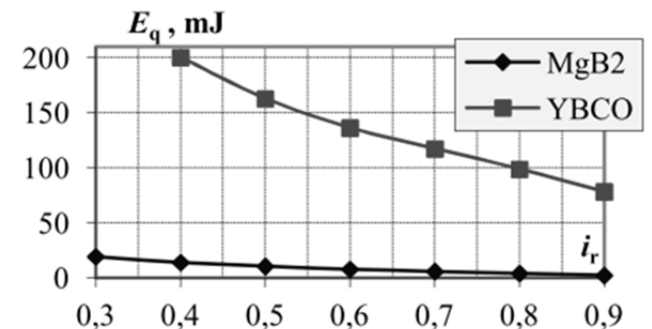
Rys. 7. Zależność prędkości propagacji strefy rezystywnej od prądu roboczego  $V_q = f(i_r)$ , dla wybranych temperatur pracy  $T_0$  przewodu YBCO

Wartość prądu w przewodzie określa maksymalną możliwą do osiągnięcia gęstość mocy cieplnej w przewodzie, a to z kolei określa maksymalną szybkość wydzielenia w nim ciepła, co z kolei wpływa na prędkość propagacji strefy rezystywnej. Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na szybkość z jaką ciepło przepływa wewnątrz taśmy na drodze przewodzenia, są parametry materiałowe takie jak pojemność cieplna właściwa  $C_v$  i przewodność cieplna właściwa  $k$ .

### Porównanie parametrów stabilności przewodów YBCO i MgB<sub>2</sub>

Na podstawie komputerowych badań przewodów warstwowych YBCO i przewodów włóknistych MgB<sub>2</sub> [4,5] porównano charakterystyki wybranych parametrów stabilności: minimalnej energii utraty nadprzewodzenia  $E_q(i_r)$  (rys. 8) i prędkości propagacji strefy rezystywnej  $V_q(i_r)$  (rys. 9) w zależności od prądu roboczego.

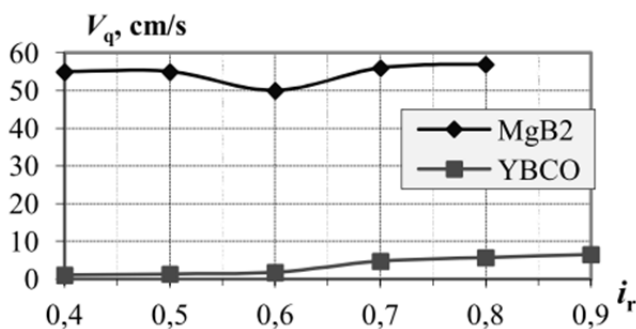
Dla szacunkowego porównania charakterystyk obu przewodów mających zupełnie inne temperatury pracy założono, że oba przewody pracują w temperaturze stanowiącej 80% wartości temperatury krytycznej  $T_c$  każdego z tych przewodów ( $T_{c, MgB_2} = 39 K$ ,  $T_{c, YBCO} = 92 K$ ). Zależności  $E_q(i_r, T_0)$  (rys. 8) obliczono zatem odpowiednio dla temperatur roboczych  $I_{r, MgB_2} = 31 K$  oraz  $I_{r, YBCO} = 74 K$ .



Rys. 8. Zależność minimalnej energii utraty nadprzewodzenia  $E_q(i_r)$  dla przewodów MgB<sub>2</sub> oraz YBCO w temperaturze  $T_0 = 0,8 T_c$

Otrzymane wartości minimalnej energii utraty nadprzewodzenia  $E_q$  dla przewodu  $MgB_2$  są w całym analizowanym zakresie prądu roboczego o rząd wielkości mniejsze niż dla przewodu warstwowego YBCO. Zatem przewód ten ma znacznie większą odporność na zaburzenia termiczne niż przewód  $MgB_2$ .

Dla porównania charakterystyk prędkości propagacji strefy rezystywnej  $V_q(i_r)$ , podobnie jak dla energii  $E_q(i_r)$ , wyznaczono te charakterystyki dla odpowiednich temperatur roboczych  $T_0 = 0,8 T_c$  obu przewodów (rys. 9).



Rys. 9. Zależność prędkości propagacji strefy rezystywnej  $V_q(i_r)$  dla przewodów wykonanych z nadprzewodników  $MgB_2$  oraz YBCO w temperaturze  $T_0 = 0,8 T_c$

Prędkości  $V_q$  w przewodzie  $MgB_2$  są o rząd wielkości większe niż dla taśmy YBCO, co wskazuje na znacznie większą dynamikę zanikania nadprzewodzenia w tym przewodzie. Na prędkość  $V_q$  wpływ ma także prąd roboczy  $i_r$  oraz parametry cieplne: pojemność  $C_v$  i przewodność  $k$  przewodu.

### Wnioski

Wraz ze wzrostem temperatury roboczej spada margines stabilności analizowanych przewodów. W przypadku taśmy YBCO jak i przewodu  $MgB_2$  uzyskane minimalne wartości energii utraty nadprzewodzenia  $E_q$  maleją w miarę zbliżania się temperatury początkowej do temperatury krytycznej  $T_c$ .

Różnicę między temperaturą zaburzenia a temperaturą utraty nadprzewodzenia  $\Delta T = T_z - T_q$  można również interpretować jako temperaturowy margines stabilności. W przypadku analizowanych przewodów wraz ze wzrostem temperatury początkowej różnica ta zmniejsza się.

Wraz ze wzrostem prądu roboczego (zbliżaniem się wartości prądu roboczego  $I_r$  do wartości prądu krytycznego  $I_c(T_0)$  w danej temperaturze roboczej) zmniejsza się prądowy margines stabilności oraz wartość minimalnej energii utraty nadprzewodzenia.

Czas utraty nadprzewodzenia  $t_q$  jest parametrem niejednoznaczny a interpretacja zależności  $t_q = f(T_0, i_r)$  jest trudna. Na parametr ten wpływają poniższe czynniki.

- Prąd roboczy; Im większy jest prąd w przewodzie (niezależnie od temperatury roboczej, ważna jest jego wartość), tym krótszy jest czas utraty nadprzewodzenia, a tym samym proces utraty nadprzewodzenia jest bardziej dynamiczny. Wydłużenie wartości czasu utraty nadprzewodzenia jest spowodowane tym, że prądy robocze są uzależnione od temperatury pracy  $T_0$ .

Przykładowo  $0,8 I_c(T_0 = 30 K) > 0,8 I_c(T_0 = 31 K)$ , co potwierdza, że czas utraty nadprzewodzenia zależy od wartości bezwzględnej prądu.

- Energia zaburzenia; Im wartość energii zaburzenia  $E_z$  jest bliższa minimalnej energii utraty nadprzewodzenia  $E_q$ , tym większy jest czas utraty nadprzewodzenia  $t_q$ . Gdy przewód jest w stanie równowagi termicznej, wystąpi stacjonarna strefa rezystywna. Wówczas czas  $t_q$  dąży do nieskończoności.

Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego N510 038 32/3678 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autor dziękuje Ośrodkowi ds. Wydawnictw Politechniki Lubelskiej za zgodę na wykorzystanie w artykule fragmentu monografii [5].

### LITERATURA

- [1] Kim H.R., Park C.R., Yim S. Yu S.D., Hyun O.B., Recovery characteristics of coated conductors, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 20 (2010) 3, 2194-2198
- [2] Watanabe K., Romanovskii V., R., Ishihara R., Nishijima G., et al., Thermal stability properties of  $YBa_2Cu_3O_7$  coated conductor tape under the cryocooling condition, *Trans. Applied Supercond.*, 21 (2011), 3, 2449-2452
- [3] Young E. A., Chappell S., et al., Quench characteristics of a Cu-stabilized 2G HTS conductor, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21 (2011) 3, 3062-3065
- [4] Surdacki P., Termiczne stany dynamiczne wysokotemperaturowych przewodów nadprzewodnikowych z dwuborku magnezu, *Przegląd Elektrotechniczny* 86 (2010) no. 12, 149-152
- [5] Surdacki P., *Stabilność termiczna silnoprądowych urządzeń nadprzewodnikowych*, Monografie, Politechnika Lubelska, Lublin 2012
- [6] Masson P. J., Rouault V. R., Hoffmann G., Luongo C. A., Development of quench propagation models for coated conductors. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 18 (2008) (2), 1321-4

**Autor:** dr hab. inż. Paweł Surdacki, Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: [p.surdacki@pollub.pl](mailto:p.surdacki@pollub.pl).