

Jacek SOSNOWSKI
Roman HORYŃ
Ewa BUKOWSKA
Michael R. KOBLISCHKA
Y. XU
Bożenna BORETA

ZASTOSOWANIA NADPRZEWODNIKÓW WYSOKOTEMPERATUROWYCH DO OGRANICZANIA PRĄDU

STRESZCZENIE *W pracy przedyskutowano zastosowania nadprzewodników wysokotemperaturowych w ogranicznikach prądowych. Przedstawiono konstrukcję modelu rezystywnego, nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarcia, przeznaczonego do ograniczania prądu o natężeniu rzędu kilkudziesięciu amperów oraz przygotowania do konstrukcji indukcyjnego ogranicznika. Przedstawiono model matematyczny działania ogranicznika. W rezystywnej konstrukcji wykorzystano taśmy nadprzewodnikowe z nadprzewodnika typu Bi:2223 pracujące w otoczeniu ciekłego azotu, podczas gdy przewiduje się wykonać prototyp indukcyjnego ogranicznika w oparciu o ekrany nadprzewodnikowe również z nadprzewodnika opartego na bizmucie. Przedstawiono rezultaty prac technologicznych nad uzyskaniem tych ekranów i analizę dyfraktograficzną*

doc. dr hab. Jacek SOSNOWSKI, dr inż. Bożenna BORETA

Instytut Elektrotechniki,
04-703 Warszawa, Pożaryskiego 28

prof. dr hab. Roman HORYŃ, mgr Ewa BUKOWSKA

INTiBS PAN,
50-950 Wrocław, ul. Okólna 2

dr Michael R. KOBLISCHKA, dr Y. XU

Instytut Fizyki Eksperymentalnej, Uniwersytet w Saarbruecken,
P.O. Box 151150, D-66041 Saarbruecken, Niemcy

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 226, 2006

otrzymanych proszków bizmutowych typu Bi:2212, spieczonych z polskich surowców. Jakkolwiek uzyskano jednorodny rentgenograficznie materiał typu Bi:2212, to jednak przejście nadprzewodzące zmierzone metodami magnetycznymi było dość rozmyte. Wymaga to kontynuacji prac nad uzyskaniem materiałów o odpowiednich parametrach nadprzewodnikowych.

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe, ograniczniki prądu, ekrany nadprzewodnikowe

1. WSTĘP

Zainteresowanie nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi wynika nie tylko z ich niezwykłych fizycznych własności, ale także i to chyba przede wszystkim z możliwości wykorzystania tych materiałów w urządzeniach elektrycznych, w tym w ogranicznikach prądów zwarciovych. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe stwarzają możliwość konstrukcji prawie idealnego ogranicznika o zerowej rezystancji w warunkach pracy i wysokiej podczas wystąpienia zwarcia. Analizie tych zagadnień poświęcony jest niniejszy artykuł. Przedstawiono w nim zarówno prace modelowo-konstrukcyjne nad ogranicznikami nadprzewodnikowymi, jak też prowadzone prace technologiczne nad materiałami nadprzewodnikowymi, w celu wykorzystania ich następnie w ekranach magnetycznych przeznaczonych do indukcyjnego ogranicznika nadprzewodnikowego. Zastosowanie ekranów nadprzewodnikowych jest szersze i mogą one być użyte w medycynie, czułych przyrządach pomiarowych i in.

2. ZASTOSOWANIE NADPRZEWODNIKÓW WYSOKOTEMPERATUROWYCH W OGRANICZNIKACH PRĄDOWYCH

Odkrycie nadprzewodników wysokotemperaturowych spowodowało wyraźny wzrost zainteresowania możliwościami zastosowań tych nowych materiałów w elektroenergetyce, co związane jest ze stałym rozwojem sieci energetycznych. Ważną przyszłościową aplikacją ceramicznych nadprzewodników wysokotemperaturowych jest wykorzystanie tych materiałów w ogranicznikach prądu zwarcia [1-7]. Zabezpieczają one sieć energetyczną przed prze-

ciążeniami i umożliwiają w ten sposób uniknięcia dodatkowych kosztów związanych ze zwykle praktykowanym „przewymiarowywaniem” urządzeń elektrycznych. Według ocen amerykańskiego ministerstwa energii US DOE potencjalny rynek na nadprzewodnikowe ograniczniki prądu wyniesie tylko w samych Stanach Zjednoczonych kilka miliardów dolarów, w ciągu najbliższych piętnastu lat. Uważa się, że nadprzewodnikowe ograniczniki prądu będą komercyjnie stosowane w najbliższych 3-5 latach. Wykorzystuje się w tych układach specjalne właściwości nadprzewodników, polegające zarówno na gwałtownej zmianie indukcji magnetycznej, jak też rezystywności materiałów nadprzewodnikowych podczas wyjścia ze stanu nadprzewodzącego, gdy natężenie prądu przewyższa wartość krytyczną. Taśmy nadprzewodnikowe mogą więc zostać zaliczone do materiałów inteligentnych, ponieważ posiadają one unikalne możliwości natychmiastowej odpowiedzi na impulsy prądowe: pozwalają przesyłać prąd bez strat w znamionowych warunkach pracy oraz rozpoznawać i odpowiednio reagować na impulsy prądu przekraczające te warunki. Właściwości tych nie posiadają klasyczne materiały, jak na przykład miedziane przewody. Podstawowa zaleta użycia nadprzewodników w ogranicznikach prądu zwarcia polega na niemal natychmiastowej odpowiedzi układu na wystąpienie przetężenia, a więc nieprzekraczającej wartości czasowej jednej czwartej cyklu napięcia, czyli poniżej 5 ms. Inną zaletą jest ekologiczność takiego rozwiązania, gdyż nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarcia jakkolwiek będą pracować w warunkach chłodzenia cieciami kriogenicznymi, to cieczą tą będzie przede wszystkim azot, który jest gazem obojętnym i występującym w sposób powszechny w powietrzu. Problemem konstrukcji i eksploatacji sieciowych ograniczników jest to, że muszą one pracować w warunkach wysokiego napięcia sieci przesyłowej i przy wysokim natężeniu prądu. Po drugie wielkie energie i siły generowane podczas procesu wyłączenia powodować mogą stworzenie niebezpieczeństwa nie tylko dla czułego elementu nadprzewodnikowego, ale również dla aparatury kriogenicznej oraz personelu. Problemem materiałowym, który musi być rozwiązany w przypadku rezystywnych ograniczników jest jednorodny rozkład prądu w elemencie nadprzewodnikowym na odległości równej długości dyfuzji cieplnej, ponieważ w przeciwnym razie moc cieplna wydzielona lokalnie spowoduje zniszczenie delikatnego materiału nadprzewodnikowego. Warunek ten osiągnięto już w szeregu materiałów, w tym litych materiałach i taśmach opartych na bizmucie [8] i cienkich warstwach oraz taśmach typu YBaCuO [9].

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądowe są przedmiotem intensywnych prac zarówno w Europie, jak też w Stanach Zjednoczonych i w Japonii. W porównaniu do Stanów Zjednoczonych, gdzie główny nacisk jest położony na współpracę ograniczników z maszynami i generatorami dużej mocy, w Japonii stymulatorem tych projektów jest wykorzystanie ograniczników nadprzewodnikowych w wielkich aglomeracjach miejskich o stale rosnącym zużyciu energii

elektrycznej. Coraz bardziej powszechne przemysłowe wykorzystanie komputerów oraz innego specjalistycznego sprzętu wymaga wytwarzania energii elektrycznej o odpowiednio wysokiej jakości, co łatwiej zrealizować poprzez skoncentrowanie wytwarzania energii elektrycznej w dużych jednostkach. Wymagają one wówczas szczególnie starannego zabezpieczenia przed awariami sieci energetycznych i stąd zainteresowanie rozwojem konstrukcji urządzeń zabezpieczających, w tym ograniczników nadprzewodnikowych, o gabarytach znacznie mniejszych od konwencjonalnych urządzeń i dużej szybkości działania. Ma to w warunkach aglomeracji miejskich takich jak Tokio szczególne znaczenie.

Z wielu doniesień dotyczących konstrukcji ograniczników nadprzewodnikowych przytoczmy ostatnią informację o pierwszym w Chinach zastosowaniu w końcu grudnia 2005 r. w sieciach energetycznych wysokotemperaturowego ogranicznika nadprzewodnikowego. Jest on wspólną konstrukcją Chińskiego Instytutu Elektrotechniki, Technicznego Instytutu Fizyki i Chemii oraz Zakładów Energetycznych w Junan. Wykorzystano w tej prototypowej konstrukcji „inteligentną” taśmę nadprzewodnikową produkcji American Superconductor Corporation (NASDAQ-AMSC), wiodącej organizacji z zakresu wykorzystania nadprzewodników wysokotemperaturowych. Od sierpnia 2005 r. urządzenie to skutecznie tłumiło liczne impulsy prądowe w sieci energetycznej, przekraczające nawet pięciokrotnie poziom znamionowej pracy. Do konstrukcji tego ogranicznika najprostszego typu użyto uzwojenia z wysokotemperaturowej taśmy nadprzewodnikowej przyłączonej do sieci energetycznej. Przejście do stanu rezystywnego tej taśmy pod wpływem prądu zwarcia przekraczającego prąd krytyczny umożliwiało utrzymanie warunków normalnej pracy sieci energetycznej. Omawiany ogranicznik został zainstalowany w podstacji energetycznej w pobliżu Szanghaju, stolicy prowincji Junan. Pracuje on pod napięciem 10.5 kV przy prądzie znamionowym 400 A. Od czasu zainstalowania go w sieci przechodził on proces zwarcia sieci trójfazowej redukując prąd z poziomu 3500 A do wartości poniżej 635 A, zabezpieczając w ten sposób kosztowną aparaturę energetyczną. Przewiduje się użytkować ten ogranicznik w sieci przez sześć miesięcy, a następnie przeprowadzić badania kontrolne jego elementów w celu usprawnienia konstrukcji przed powtórny zainstalowaniem do sieci energetycznej

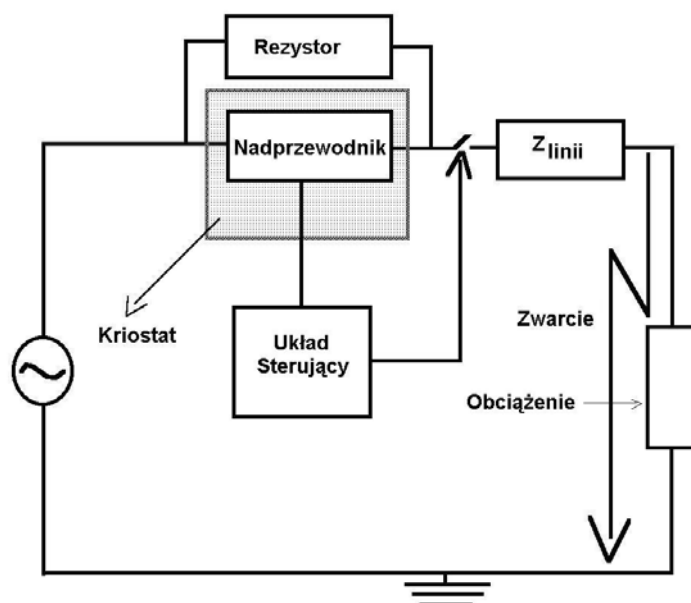
Zagadnienie wykorzystania nadprzewodników wysokotemperaturowych w sieciach energetycznych, w tym ograniczników nadprzewodnikowych, jest obecnie przedmiotem badań odpowiedniej komisji CIGRE (International Council of Large Electric Systems), międzynarodowej organizacji z siedzibą w Paryżu zajmującej się dużymi systemami elektro-energetycznymi.

3. ZBADANIE WARUNKÓW PRACY REZYSTYWNYCH NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU ZWARCIA

Zasada działania rezystywnych ograniczników prądu zwarcia oparta jest na zmianie rezystancji elementu nadprzewodnikowego podczas przejścia od stanu nadprzewodzącego do rezystywnego pod wpływem przepływu prądu. W prosty sposób określimy długość materiału nadprzewodnikowego zapewniającą wymaganą rezystancję R_n :

$$L_S = \frac{SR_n}{\rho_n} = \frac{I_c R_n}{\rho_n j_c} \quad (1)$$

gdzie S jest przekrojem nadprzewodnika, natomiast j_c gęstością prądu krytycznego nadprzewodnika, ρ_n rezystywnością po wyjściu ze stanu nadprzewodnictwa. Schemat ideowy skonstruowanego rezystywnego ogranicznika prądu zwarcia przedstawiony jest na rys. 1. Przy konstrukcji nadprzewodnikowego ogranicznika rezystywnego należy mieć także na uwadze wysoką



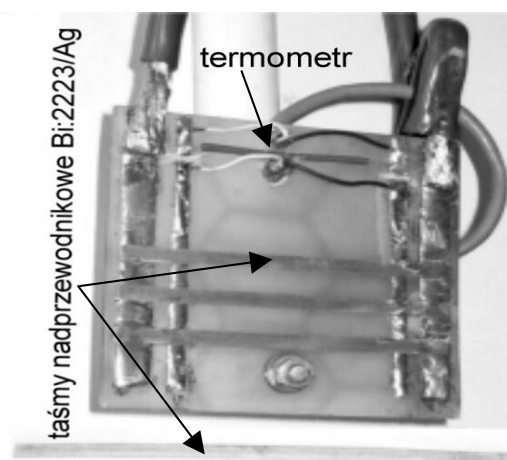
Rys. 1. Schemat ideowy konstrukcji modelu rezystywnego ogranicznika prądu, z elementem nadprzewodnikowym pełniącym funkcję czujnika

generację ciepła podczas wystąpienia zwarcia. Generacja ciepła spowodować może wręcz spalanie delikatnego elementu nadprzewodnikowego oraz opóźnienie procesu powrotu ogranicznika do stanu nadprzewodzącego. Zabezpieczenie przed tym efektem można zrealizować boczniując element nadprzewodnikowy równoległym rezystorem, co pokazane jest na rys. 1. Element nadprzewodnikowy traktowany może być także jako czujnik, który wstępnie tłumi wystąpienie impulsu prądowego w pierwszym momencie i następnie uruchamia klasyczne już urządzenie wyłączające. Widok ogólny skonstruowanego modelu ogranicznika pokazuje rys. 2. Przedstawiono tutaj kriostat metalowy z przepustem wysokonapięciowym, na którym położony jest uchwyt z zamocowanym na końcu elementem czujnikowym ogranicznika, zbudowanym z taśm nadprzewodnikowych, zbiornik transportowy na ciekły azot oraz układ elektroniczny wzmacniający sygnał z taśmy nadprzewodnikowej i podający go



Rys. 2. Fotografia rezystywnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądowego: od lewej - kriostat z przepustem wysokonapięciowym, elektroniczny układ sterujący i rozłączający, zbiornik transportowy. Położony jest uchwyt z nadprzewodnikowym elementem czujnikowym

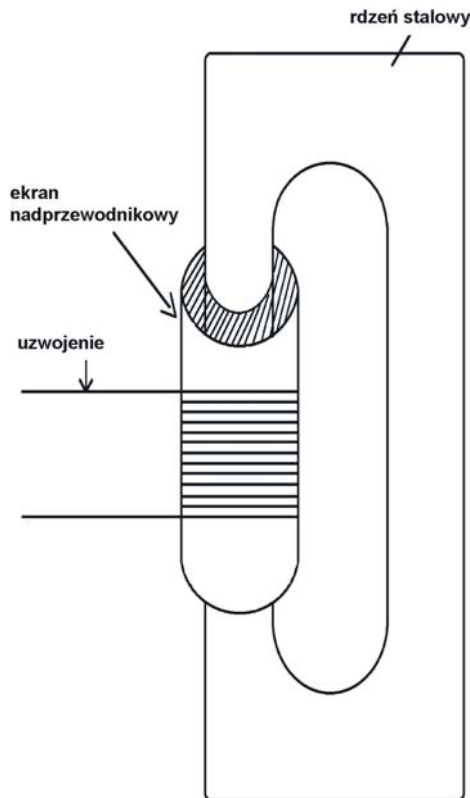
na cewkę sterującą stycznika. Po przekroczeniu nastawnej wartości progowej równej $10 \mu\text{V}$ sygnał napięciowy po wzmocnieniu wytwarzał impuls na cewce stycznika otwierający obwód elektryczny. Przeprowadzono wstępne badania testujące tego ogranicznika, włączając w to próby czasowe w warunkach znamionowych, jak również próby przetężeniowe. W obydwu przypadkach osiągnięto pozytywne rezultaty. Zbudowany model ogranicznika z użyciem jako element czujnikowy połączonych równolegle wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych typu Bi:2223 ograniczał prąd zwarcia na poziomie kilkudziesięciu amperów, w zależności od konstrukcji elementu czujnikowego – ilości użytych taśm pokazanych na rys. 3. Nieliniowość charakterystyk prądowo-napięciowych tych taśm umożliwia wykorzystanie ich w ogranicznikach prądowych. Przed osiągnięciem natężenia prądu krytycznego rzędu kilkudziesięciu amperów na taśmie pojawia się sygnał napięciowy, który powoduje rozłączenie obwodu elektrycznego ogranicznika. Taśmy nadprzewodnikowe w tym rozwiązaniu pełnią głównie rolę czujnika elektronicznego, z którego sygnał po wzmocnieniu podany na cewkę stycznika steruje działaniem mechanicznego układu rozłączającego, natomiast w początkowym momencie czasowym po wystąpieniu zwarcia w sieci powinny również zapewnić pewien wzrost rezystancji układu. Rysunek 3 przedstawia widok elementu czujnikowego rezystywnego ogranicznika nadprzewodnikowego, termometr kriogeniczny oraz fotografię użytej taśmy nadprzewodnikowej.



Rys. 3. Widok elementu czujnikowego rezystywnego ogranicznika nadprzewodnikowego oraz fragment użytej taśmy Bi:2223

4. ZBADANIE WARUNKÓW PRACY INDUKCYJNYCH NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU ZWARCIA

Dużą uwagę przywiązuje się do indukcyjnych ograniczników prądu zwarcia, w których element nadprzewodnikowy pełni funkcję ekranu magnetycznego. Schemat takiego ogranicznika przedstawiony jest na rys. 4. Wygodnie



Rys. 4. Schemat indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarcia

jest wprowadzić schemat zastępczy, w którym opisuje się nadprzewodnikowy ogranicznik indukcyjny układem transformatora, którego uzwojenie wtórne stanowi pojedynczy zwój zwarty rezystancją o zmiennej wielkości – od wartości zerowej do rezystancji ekranu nadprzewodnikowego w stanie rezystywnym R_n . Wówczas analiza obwodu przedstawionego na rys. 4 prowadzi do zależności między ograniczanym prądem I_{lim} oraz napięciem sieci V :

$$\frac{I_{lim}}{V} = \sqrt{\frac{1}{(N^2 R_n)^2} + \frac{1}{(\omega L)^2}} \quad (2)$$

ωL oznacza indukcyjność ogranicznika, określoną następującym wzorem:

$$\omega L = 2\pi\nu k\mu\mu_0 N^2 S / l \quad (3)$$

We wzorze 3 wprowadzone zostały oznaczenia: $\nu = \omega / 2\pi$ częstotliwość, k współczynnik sprzężenia, L indukcyjność, S przekrój rdzenia stalowego, l jest długością efektywną rdzenia, N liczbą zwojów, $\mu\mu_0$ przenikalnością magnetyczną, natomiast parametr k występujący we wzorze 3 jest miarą sprzężenia

magnetycznego układu, którą przyjmuje się jako mniejszą lub równą jedności. Równanie 2 opisuje przypadek transformatora, na uzwojeniu wtórnym którego znajduje się tylko jeden zwój. Zależności (1...3) uzupełnić jeszcze należy równaniami materiałowymi, które określają parametry, w tym rozmiary ekranu nadprzewodnikowego. Zasadniczym z tych równań jest zależność określająca indukcję pełnego wnikania do wnętrza nadprzewodnikowego pierścienia. Równanie to przyjmuje postać:

$$B_p = \mu_0 j_c d + B_{c1} + \mu_0 \Delta H \quad (4)$$

gdzie d jest grubością ekranu nadprzewodnikowego, B_{c1} pierwszą indukcją krytyczną, ΔH barierą powierzchniową. Równanie 4 określa maksymalną wartość ekranowanej indukcji magnetycznej i wiąże parametry ekranu nadprzewodnikowego z natężeniem ograniczanego prądu poprzez następującą zależność:

$$B_p = \frac{\mu_0 N I_{\text{lim}}}{l} \quad (5)$$

Wzór 5 opisuje w przybliżony sposób indukcję magnetyczną w środku długiego solenoidu o skończonej długości l , dla uproszczenia równej długości rdzenia. Dla uzyskania optymalnych warunków pracy zależności (2...5) powinny jeszcze zostać uzupełnione relacją wiążącą parametry stalowego rdzenia z napięciem w uzwojeniu pierwotnym transformatora:

$$V = B_s SN \omega k \quad (6)$$

B_s oznacza indukcję nasycenia rdzenia. Zależność prądu ograniczanego I_{lim} od napięcia sieci V wyrażona będzie na podstawie wzorów (2...6) równaniem:

$$I_{\text{lim}} = \sqrt{(kSv/R_n l)^2 + 1/(2\pi\mu\mu_0)^2} * IV / (kSN^2v) \quad (7)$$

Powyższe wzory umożliwiają również powiązanie parametrów ekranu nadprzewodnikowego z rozmiarami rdzenia ferromagnetycznego – przekrojem S i długością l następującą relacją:

$$\frac{Sk\mu_0\omega}{R_n l} = \sqrt{(\mu_0 j_c d + B_{c1} + \mu_0 \Delta H)^2 / B_s^2 - \mu^{-2}} \quad (8)$$

5. GENERACJA STRAT I ROZCHODZENIE SIĘ STREFY REZYSTYWNEJ

Z procesem przejścia do stanu rezystywnego ekranu nadprzewodnikowego indukcyjnego ogranicznika oraz elementu czujnikowego w rezystywnym ograniczniku nadprzewodnikowym, związane są generowane straty, które mają wpływ na lokalne podwyższenie temperatury i wyłączenie ogranicznika z dalszej pracy. W przypadku niepełnej penetracji strumienia indukcji magnetycznej do wnętrza nadprzewodnikowego ekranu straty na histerezę opisane modelem Beana, zakładającym stałą wartość prądu krytycznego, wyrażone są następującym wzorem na jednostkę objętości nadprzewodnikowej płyty o grubości d :

$$Q_v = \frac{2\mu_0 H_{\max}^3}{3j_c d} \quad (9)$$

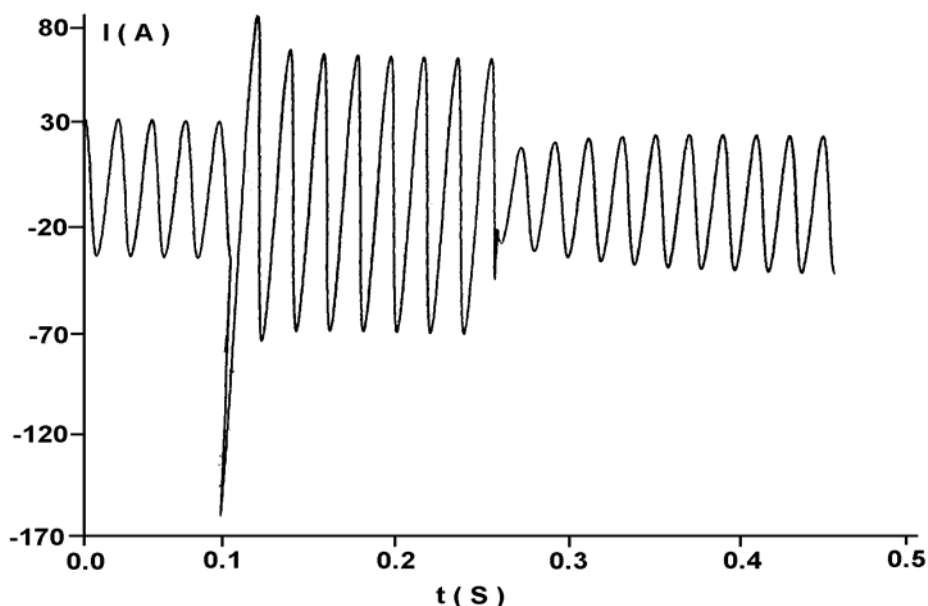
gdzie H_{\max} oznacza maksymalną wartość pola magnetycznego na powierzchni nadprzewodnikowego ekranu, generowanego podczas cyklu prądu płynącego przez uzwojenie ogranicznika.

Straty wywołane efektami histerezy magnetycznej powodują przejście elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego, z czym związany jest efekt wzrostu temperatury nadprzewodnika ΔT , który prowadzi w konsekwencji do czasowego wyłączenia ogranicznika prądu zwarcia. Dlatego też bardzo ważne jest rozpoznanie mechanizmu powrotu ogranicznika do stanu nadprzewodzącego, czyli do stanu pracy po ustąpieniu zwarcia. W tym celu rozpatrzony został proces relaksacji termicznej elementu nadprzewodzącego, prowadzący do następującego empirycznego wzoru opisującego zależność od czasu temperatury nadprzewodnika:

$$T(t) - T_c = \frac{1}{\sqrt{\frac{4\beta t}{c_v d} + \frac{1}{[T(0) - T_c]^2}}} \quad (10)$$

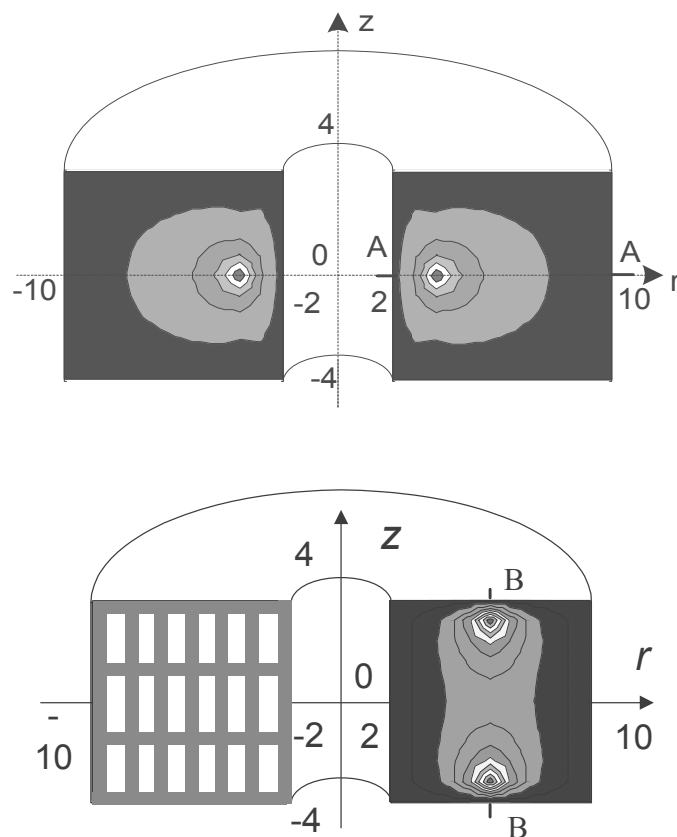
gdzie t jest czasem, d szerokością elementu nadprzewodnikowego. c_v oznacza ciepło właściwe równe około $1 \text{ [Jcm}^{-3} \text{ K}^{-1}]$, natomiast $\beta = 0.0137 \text{ [Wcm}^{-2} \text{ K}^{-3}]$ jest parametrem empirycznym określającym zależność wzrostu temperatury chł-

dzącego gazu azotowego od wartości wytworzonych strat na jednostkę powierzchni nadprzewodnika. Zależność 10 została wykorzystana przy analizie przebiegu czasowego powrotu do stanu nadprzewodzącego elementu ceramicznego po zaniku zwarcia, co pokazane jest na rys. 5. Na rysunku tym przedstawiona jest ilustracja komputerowa przebiegu prądu w obwodzie elektrycznym z ogranicznikiem nadprzewodnikowym podczas chwilowego zwarcia, prowadzącego do przejścia elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego. Związany z tym jest wzrost w czasie temperatury i rezystywności tego elementu oraz spadek prądu w obwodzie. Po ustąpieniu zwarcia zachodzi stopniowy powrót elementu nadprzewodnikowego ze stanu rezystywnego do nadprzewodzącego w warunkach chłodzenia azotowego elementu nadprzewodnikowego, opisanego równaniem 10, co przedstawia narastająca obwiednia przebiegu prądu pokazana na rys. 5. Jak wynika tego rysunku, w cyklu pracy ogranicznika prądowego przedstawionym na rys. 5 wyróżnić należy następujące etapy: praca znamionowa sieci elektrycznej, pojawienie się impulsu prądowego wywołanego wystąpieniem chwilowego zwarcia, załączenie ogranicznika – – przejście elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego i proces ograniczania prądu, zanik przetężenia, stopniowe schładzanie elementu nadprzewodnikowego i powrót do stanu pracy linii przesyłowej.

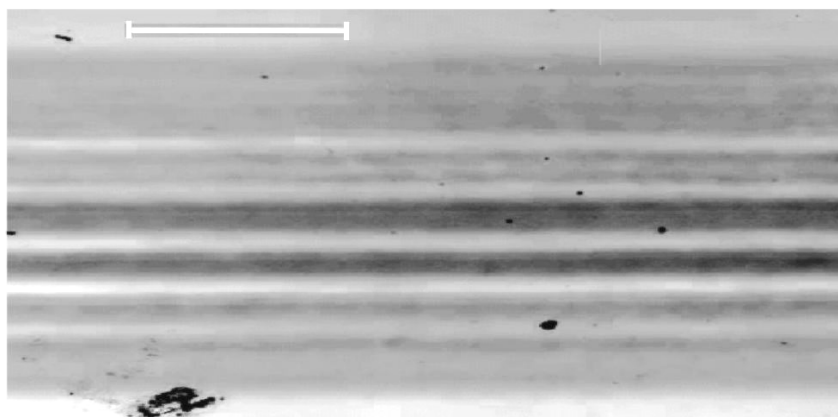


Rys. 5. Ilustracja numeryczna przebiegu prądu w obwodzie elektrycznym z ogranicznikiem nadprzewodnikowym podczas chwilowego zwarcia. Wzrost obwiedni przebiegu pokazuje zmianę natężenia prądu związaną ze stopniowym wyjściem ze stanu rezystywnego chłodzonego elementu nadprzewodnikowego po ustąpieniu zwarcia

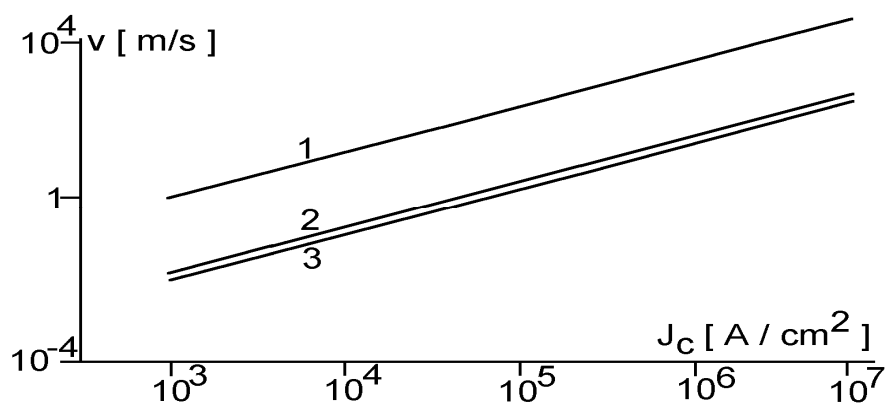
Dyskutowana powyżej generacja ciepła podczas przejścia do stanu rezystywnego elementu nadprzewodnikowego ogranicznika prowadzi więc do powstania strefy rezystywnej obejmującej cały element nadprzewodnikowy. Zagadnienie rozchodzenia się strefy rezystywnej badano numerycznie na podstawie rozwiązania równania dyfuzji dla przypadku przekroju uzwojenia nawiniętego z taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych [10], a niektóre wyniki pokazane są na rys. 6. Istotny jest tutaj kształt strefy rezystywnej, odmienny niż dla uzwojeń wykonanych z klasycznych, izotropowych nadprzewodników. Na rysunku 7 pokazano mikroskopowe zdjęcie magneto-optyczne taśmy nadprzewodnikowej Bi:2223 (na podstawie [11]), obrazujące występowanie defektów strukturalnych w tych taśmach, które właśnie mogą służyć za słabe punkty inicjujące generację strefy rezystywnej, w przypadku ich odpowiednio dużych rozmiarów. Nanorozmiarowe defekty z kolei podwyższają prąd krytyczny zakotwiczając nici wirowe. Rysunek 8 pokazuje porównanie prędkości rozchodzenia się strefy rezystywnej dla uzwojeń z nadprzewodników klasycznych i wysokotemperaturowych podczas quenchu.



Rys. 6. Porównanie kształtu rozkładów temperatury w strefie rezystywnej w przekroju uzwojenia nawiniętego z nadprzewodników izotropowych – niskotemperaturowych (góra) oraz wysokotemperaturowych (dół) podczas procesu quenchu



Rys. 7. Zdjęcie z pomocą analizy magneto-optycznej wielowłóknowej taśmy nadprzewodnikowej typu Bi:2223. Widoczne są włókna nadprzewodnikowe oraz występowanie defektów struktury (czarne nieregularne punkty). Beleczka w lewym górnym rogu oznacza skalę 200 μm (na podstawie [11])



Rys. 8. Porównanie prędkości rozchodzenia się strefy rezystywnej w nadprzewodnikach klasycznych (1) Nb_3Sn oraz wysokotemperaturowych (2) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (3) $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$

6. PRACE TECHNOLOGICZNE NAD EKRAMAMI NADPRZEWODNIKOWYMI Z CERAMIK Bi:2212

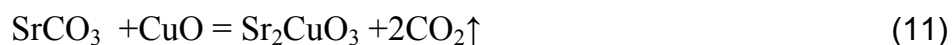
We współpracy autorów artykułu prowadzono prace technologiczne i doświadczalne nad otrzymaniem ceramiek Bi-Sr-Ca-Cu-O o składzie Bi:2212 z polskich surowców, które następnie zostały użyte do wykonania ekranów nadprzewodnikowych pokazanych na rys. 9. Stechiometryczne naważki odpo-



Rys. 9. Widok wypalonych ekranów z ceramiki bizmutowych typu Bi:2212. Najdłuższy ekran ma 5 cm

Wiednich tlenków i węglanów wymieszano dokładnie w moździerzu, prasowano w tabletkę i wygrzewano w piecu muflowym w temperaturze 750⁰ C przez jeden dzień. Następnie po przetarceniu próbki i sprasowaniu ponownie w tabletkę wygrzewano próbkę w temperaturze 830⁰ C przez 26 dni. W przeciągu tego czasu procedurę przecierania i prasowania powtarzano czterokrotnie oraz na bieżąco sprawdzano skład próbki rentgenograficznie. Po 26 dniach syntezy w 830⁰ C wygrzewano jeszcze próbkę w 800⁰ C przez 5 dni.

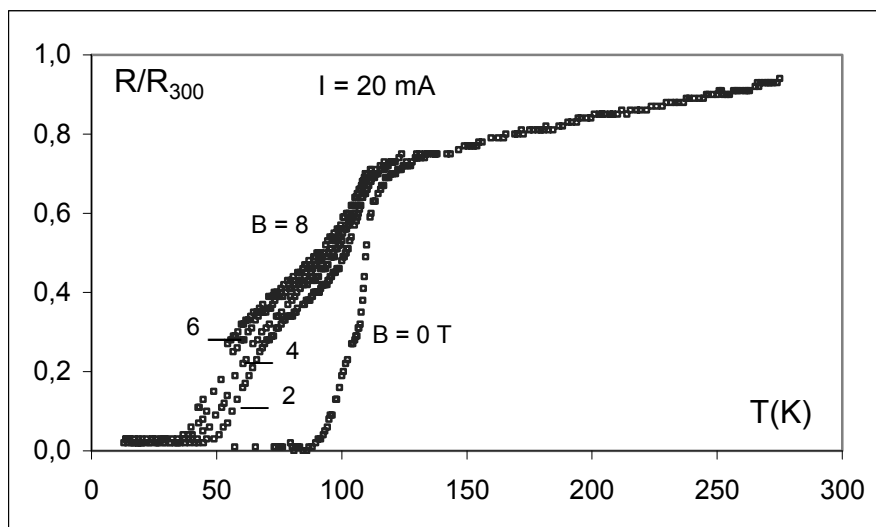
W przypadku ceramiki bizmutowej, również domieszkowanej ołowiem stosowano także metodę przereagowania pierwotnie węglanów SrCO₃ i CaCO₃, w celu uwolnienia z nich dwutlenku węgla, zgodnie ze wzorami:



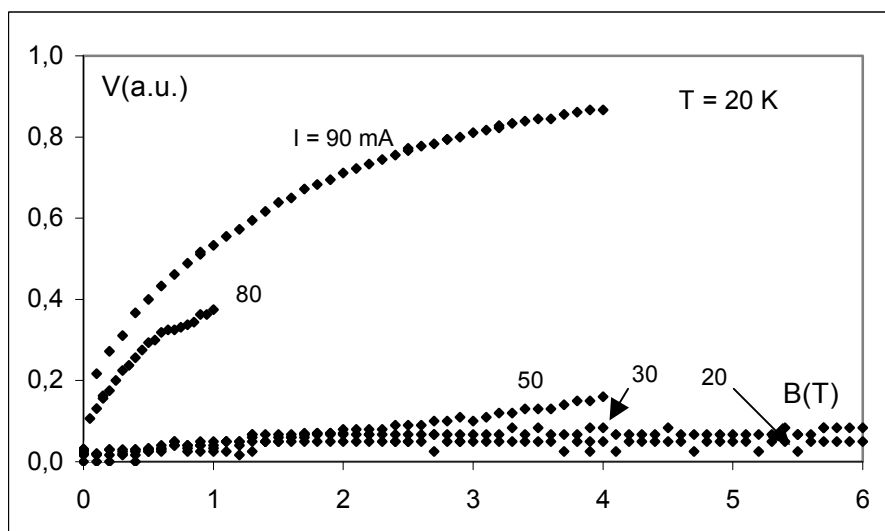
Następnie otrzymane związki użyto do reakcji syntezy nadprzewodzących faz już tlenkowo-bizmutowych:



Ze względu na powolny rozpad węglanu strontu metoda ta wymaga długotrwałego wygrzewania w wysokich temperaturach. Na rysunku 10 pokazane są temperaturowe przejścia do stanu nadprzewodzącego w polu magnetycznym otrzymanej próbki ceramiki bizmutowej. Natomiast rysunek 11 przedstawia przejścia w narastającym polu magnetycznym w temperaturze 20 K. Jak widać na tych rysunkach zaobserwowano szerokie przejścia do stanu nadprzewodnictwa, co wskazuje na niejednorodności materiałowe, potwierdzone rezultatem pomiaru temperaturowego przejścia magnetycznego przedstawionego na rys. 12 zsyntetyzowanej próbki Bi:2212. Tylko część próbek wykazywała pełne

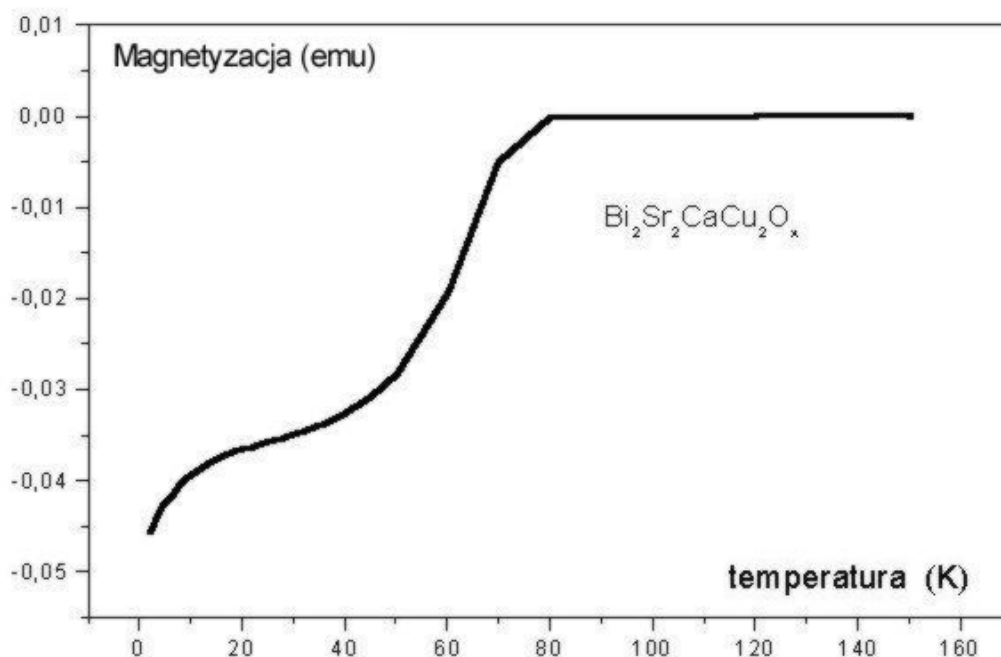


Rys. 10. Temperaturowe przejścia do stanu nadprzewodnictwa otrzymanej próbki ceramiki nadprzewodnikowej w stałym polu magnetycznym



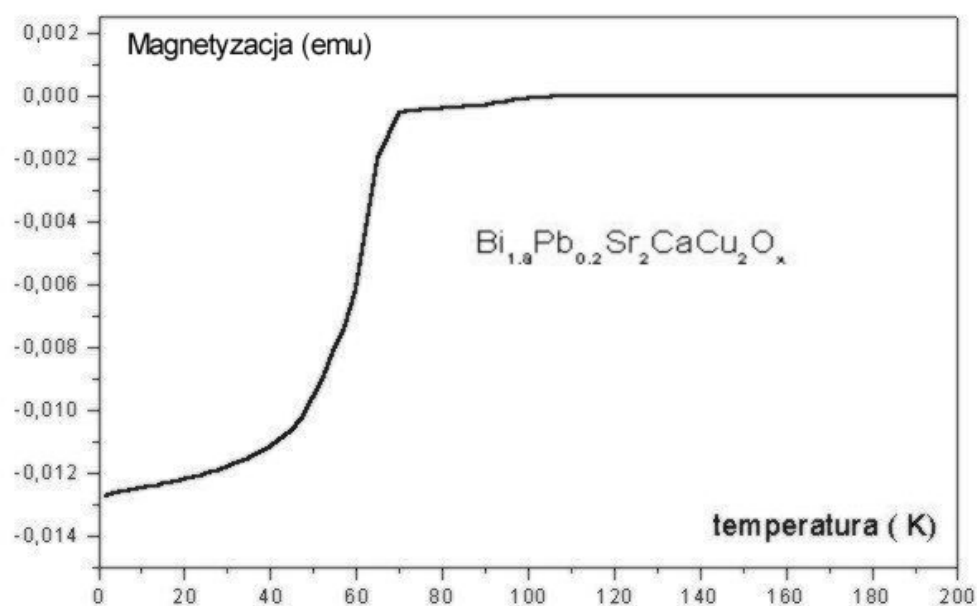
Rys. 11. Przejścia w narastającym polu magnetycznym do stanu rezystywnego otrzymanej ceramiki bizmutowej dla różnych prądów pomiaru

właściwości nadprzewodnikowe w temperaturze azotowej. Dla większości próbek początek przejścia przypada na temperaturę przewyższającą temperaturę wrzenia ciekłego azotu, jak widać na rys. 13 wynoszącą nawet 108 K w tym przypadku, a więc zgodną z danymi literaturowymi, jednak główne przejście zachodzi w temperaturach niższych.

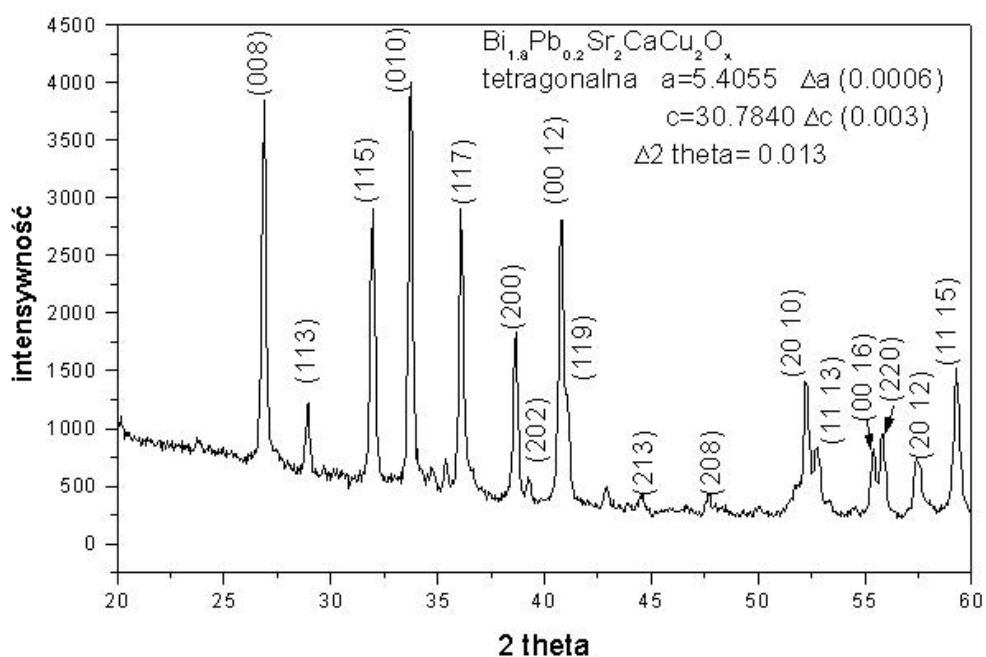


Rys. 12. Magnetyczne przejście temperaturowe do stanu nadprzewodnictwa sproszkowanej ceramiki bizmutowej typu Bi:2212 o składzie $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$

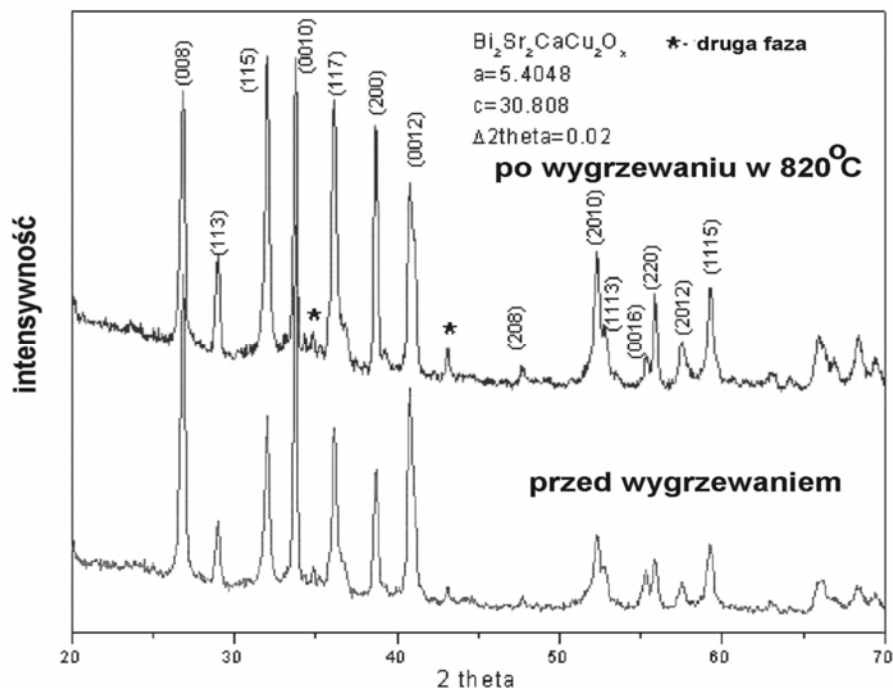
Rysunek 13 przedstawia przejście magnetyczne do stanu nadprzewodnictwa ceramiki bizmutowej typu Bi:2212 z domieszką ołowiu. Jakkolwiek uzyskano w tym przypadku wzrost temperatury początku przejścia do stanu nadprzewodnictwa w porównaniu z analogiczną temperaturą równą 80 K dla próbki niedomieszkowanej, jak wynika z rys. 12, to jednak szerokość przejścia nie uległa zmniejszeniu. Przeprowadzona analiza rentgenograficzna dla tej próbki pokazana na rys. 14 wykazała dobrze wykształconą fazę Bi:2212 o stałej sieci 5.4 Å oraz 30.8 Å. Rysunek 15 pokazuje natomiast porównanie zdjęć analizy dyfraktograficznej ceramiki Bi:2212 sproszkowanej (dół) oraz po sprasowaniu do formy ekranu nadprzewodnikowego i wygrzaniu w temperaturze 820⁰ C przez 7 godzin. Jak wynika z tego rysunku procedura termiczna spiekania ekranów nadprzewodnikowych nie wpłynęła na zmianę struktury ceramiki Bi:2212, co jest pozytywnym wnioskiem dotyczącym zastosowanej metodyki preparatyki ekranów nadprzewodnikowych. Przedstawione rentgenogramy wykonane zostały na dyfraktometrze proszkowym DRON-3 przy użyciu lampy emitującej promieniowanie Co-K α o długości 1,788892 Å. Parametry sieciowe udoładniano przy użyciu programu LATCO. Rezultaty badań wskazują jednak, że wymagane są dalsze prace technologiczne nad uzyskaniem materiałów nadprzewodnikowych o podwyższonych parametrach. W tym celu należałoby skoncentrować się nad otrzymaniem fazy Bi:2223 oraz użyć proszki o wyższej czys-



Rys. 13. Magnetyczne przejście temperaturowe do stanu nadprzewodnictwa sproszkowanej ceramiki bizmutowej typu Bi:2212 z domieszką ołowiu o składzie $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$



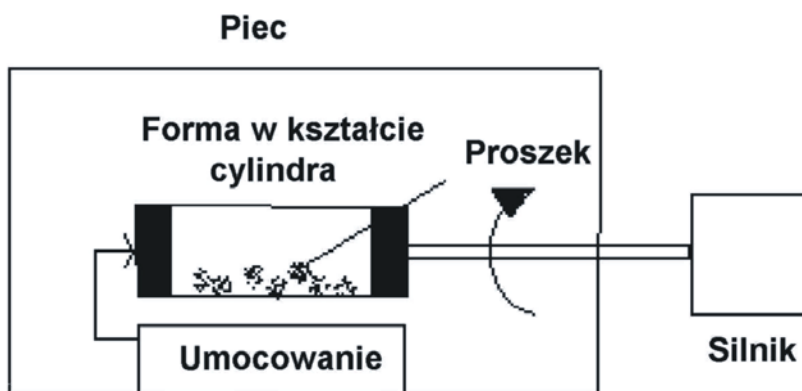
Rys. 14. Analiza dyfraktograficzna sproszkowanej próbki Bi:2212 z domieszką ołowiu



Rys. 15. Porównanie zdjęć analizy dyfraktograficznej próbki Bi:2212 sproszkowanej (dół) oraz po sprasowaniu do formy ekranu nadprzewodnikowego i wygrzaniu w temperaturze 820°C przez 7 godzin

tości, co związane jest z dodatkowymi kosztami. Ekranu nadprzewodnikowe znajdują zastosowanie głównie w ogranicznikach nadprzewodnikowych, ale należy pamiętać także, że stosowane one mogą być również w medycynie oraz w czułych przyrządach pomiarowych, jak SQUID-y (nadprzewodnikowe interferometry kwantowe) ekranując zewnętrzne pole magnetyczne. Jak było to przedstawione w jednym z wcześniejszych punktów zasadniczym problemem optymalnego działania ekranów nadprzewodnikowych jest uzyskanie jak największego prądu krytycznego materiałów, z których wykonany jest ekran. Prowadzi to bezpośrednio do zwiększenia ekranowanego pola magnetycznego. Podwyższenie wartości prądu krytycznego osiągnąć można poprzez wprowadzenie defektów nanorozmiarowych do ceramiki nadprzewodnikowych – tak zwanych centrów zakotwiczenia. Centra te stabilizując strukturę wirów magnetycznych umożliwiają wzrost prądu krytycznego. Przykład ten wskazuje na istotną rolę podstawowych problemów fizycznych przy analizie pracy urządzeń nadprzewodnikowych. Drugim wnioskiem, który wynika z powyższego rozumowania jest to, że w celu uzyskania maksymalnych wartości natężenia prądu ekranującego można użyć profesjonalne materiały do transportu prądu – wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe w postaci uzwojeń. Generowany w takim uzwojeniu prąd ekranować będzie zewnętrzne pole magnetyczne prądu

znamionowego, podobnie jak ma to miejsce w litym ekranie ceramicznym. Rozwiązanie takie znacznie uprości konstrukcję ogranicznika, gdyż unika się w ten sposób problemów z wytworzeniem ekranów nadprzewodnikowych, które dodatkowo często ulegają uszkodzeniu w wyniku występujących naprężeń mechanicznych spowodowanych wielokrotnymi procesami termicznymi – schładzania i ogrzewania ogranicznika oraz powstałymi podczas procesu zwarcia siłami elektrodynamicznymi. Ekranry nadprzewodnikowe pokazane na rys. 9 wykonano metodą prasowania oraz także stosując metodę odwirowywania przedstawioną schematycznie na rys. 16. Ta druga metoda wydaje się szczególnie obiecująca, gdyż umożliwi ona uzyskać cienkie ekrany o dużej średnicy.



Rys. 16. Schemat metody odwirowywania w piecu i spiekania ekranów nadprzewodnikowych

Jak widać jest szereg możliwości konstrukcji ograniczników nadprzewodnikowych i ta tematyka ulega stałemu rozwojowi. W konstrukcjach rezystywnych ograniczników nadprzewodnikowych coraz częściej stosuje się jako elementy czynne warstwy nadprzewodnikowe lub całe uzwojenia nadprzewodnikowe, które w warunkach przejścia wykazują odpowiednio wysoką rezystancję. Natomiast w przypadku indukcyjnych ograniczników interesujące wydają się być pomysły nie ekranowania rdzenia ferromagnetycznego, lecz odwrotnie utrzymywania rdzenia w warunkach nasycenia, poprzez zastosowanie stałoprądowego nadprzewodnikowego uzwojenia magnesującego. Wówczas normalny prąd sieciowy nie wyprowadza rdzenia ferromagnetycznego ze stanu nasycenia, nie powodując generacji dodatkowych strat mocy. Natomiast prąd zwarcia w tym przypadku przemagnesowując rdzeń generuje straty mocy i redukuje prąd zwarcia.

7. WNIOSKI

W pracy przedstawione zostały prowadzone badania nad wykorzystaniem materiałów nadprzewodnikowych do konstrukcji ograniczników prądu zwarciovego. Omówione zostały ograniczniki rezystywne oraz zasada działania ograniczników indukcyjnego typu. Przedstawiony został przykład zbudowanego modelu rezystywnego ogranicznika nadprzewodnikowego, w którym funkcję elementu czujnikowego pełnią wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe. Omówione zostały prowadzone badania nad konstrukcją ekranów nadprzewodnikowych przeznaczonych do indukcyjnego ogranicznika nadprzewodnikowego.

LITERATURA

1. J. Sosnowski, Analysis of the current-voltage characteristics of the high temperature oxide superconductors and its applications in the current-limiters, *Molecular Physics Reports*, vol. 15/16, str. 221-224 (1996).
2. J. Sosnowski, *Nadprzewodnictwo i zastosowania*, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa (2003).
3. T. Janowski, S. Kozak, H. Malinowski, G. Wojtasiewicz, B. Kondratowicz-Kucewicz, J. Kozak, Properties Comparison of Superconducting Fault Current limiters with Closed and Open Core, *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. 13, nr 2, str. 2072-2075 (2003).
4. T. Janowski, H.D. Stryczewska, S. Kozak, B. Kondratowicz-Kucewicz, G. Wojtasiewicz, J. Kozak, P. Surdacki, H. Malinowski, Bi-2223 and Bi-2212 Tubes for Small Fault Current Limiter, *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. 14, nr 2, ITASE 9, str. 851-854 (2004).
5. J. Kozak, T. Janowski, S. Kozak, H. Malinowski, G. Wojtasiewicz, B. Kondratowicz-Kucewicz, J. P. Surdacki, The Influence of Superconducting Fault Current Limiter Structure on the V-I characteristics, *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. 14, nr 2, ITASE 9, str. 811-814 (2004).
6. S. Kozak, Numerical model of superconducting fault current limiter, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr. 11, str. 1101-1105 (2004).
7. J. Kozak, T. Janowski, S. Kozak, H. Malinowski, G. Wojtasiewicz, B. Kondratowicz-Kucewicz, Design and Testing of 230 V Inductive Type of Superconducting Fault Current Limiter with an Open Core, *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. 15, nr 2, str. 2031-2034 (2005).
8. R. C. Diehl, S. Fleshler, R. Mason, C. Christopherson, K. DeMoranville, R. Harnois, A. Otto, G. N. Riley, Jr., E. Serres, J. O. Willis, H. J. Boenig, J. B. Schillig, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 11 (2001) 3265.
9. A. Usoskin, J. Dzick, A. Issaev, J. Knoke, F. García-Moreno, K. Sturm, H. C. Freyhardt, *Supercond. Sci. Technol.* 14 (2001) 676.

10. J. Sosnowski, B. Boreta, Nadprzewodniki wysokotemperaturowe i ich zastosowanie w elektrotechnice, Wystawa Elektrotechnika – Prezentacje 2002 (Instytut Elektrotechniki), maj 2002, str. 139-144 (2002).
11. M. R. Koblichka, U. Hartmann, Auf dem Weg zu Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleiter– Optimierung auf Nanometerskala, Magazin Forschung, nr 2, str. 11-17 (2001).

Rękopis dostarczono, dnia 08.11.2004 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski

APPLICATIONS OF HTc SUPERCONDUCTORS FOR CURRENT LIMITATION

J. SOSNOWSKI, R. HORYŃ, E. BUKOWSKA,
M.R. KOBLISCHKA, Y. XU, B. BORETA

ABSTRACT *Applications of HTc superconductors in the fault current limiters has been discussed. A model of the constructed resistive type superconducting fault current limiter has been presented, which is devoted to current limitation at the level of several dozen of amperes, as well as the preparation for construction of the inductive type superconducting current limiter. The mathematical model of limiters has been discussed. In the resistive model the HTc superconducting Bi:2223 tapes have been used, working in liquid nitrogen environment. It is expected too built a model of inductive fault current limiter in which the active element would be the superconducting shields. Results of the technological work on the design of these superconducting shields, using the commercially available powders are presented. The diffractographic analysis of prepared materials was presented too. Although a homogeneous (from the crystallographic point of view) material of the type Bi:2212 was obtained, the superconducting transition curves were relatively wide. Continuation of the work on the superconducting materials technology process is necessary.*



Doc. dr hab. Jacek Sosnowski. Absolwent Wydziału Fizyki UW z 1971 r. Doktorat (1975 r.) poświęcony był badaniom własności nadprzewodnikowych półmetalicznego selenku lantanu, natomiast habilitacja (1982 r.) badaniom interesujących od strony aplikacyjnej również obecnie, materiałów nadprzewodnikowych o strukturze typu $A_{15} Nb_3 Ga$ z domieszkami magnetycznymi. Pracuje w Instytucie Elektrotechniki od 1980 r. obecnie na stanowisku docenta, w latach 1998...2003 profesora kontraktowego, nad zagadnieniami nadprzewodnictwa stosowanego. Zajmuje się modelowaniem zagadnień elektromagnetycznych w nadprzewodnictwie – prąd krytyczny, siły zakotwiczenia oraz zastosowaniami nadprzewodników wysokotemperaturowych np. w ogranicznikach prądowych. Odbił staże naukowe w Japonii, Francji, Rosji, Niemczech. Opublikował ponad 200 prac. w czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych.

Prof. dr hab. Roman Horyń. Absolwent Wydziału Chemii Politechniki Wrocławskiej z 1961 r. ze specjalnością technologia materiałów reaktorowych. Pracę doktorską obejmującą rozpoznanie równowag fazowych zachodzących w binarnych układach tlenkowych zawierających trójtlenki skandiu wykonał w 1967 r. pod kierownictwem Prof. dr W. Trzebiatowskiego. Następnie podejmuje pracę naukową w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. W 1979 r. habilituje się w zakresie krystalochemii rozprawą nt. równowag fazowych oraz struktur krystalicznych szeregu międzymetalicznych faz zawierających niob. Jako kierownik Zakładu Materiałów Specjalnych prowadzi szeroko zakrojone badania nad otrzymywaniem i krystalochemiczną identyfikacją materiałów o interesujących własnościach fizycznych takich jak nadprzewodnictwo, magnetyzm czy też transport jonowy. W latach 1978...1995 utrzymuje ścisłą współpracę z ośrodkami naukowymi we Francji (Laboratorium Dyfrakcji Neutronowej CEN w Grenoble, Laboratorium Chemii Nieorganicznej na Uniwersytecie w Rennes, Laboratorium Leona Brillouina CEA w Saclay), gdzie odbywa staże poświęcone opracowaniu technologii monokryształizacji wybranych połączeń uranu oraz nadprzewodzących połączeń typu faz Chevrela. W roku 1990 uzyskuje tytuł profesora w INTiBStr. PAN. Dorobek naukowy obejmuje blisko 150 publikacji. Aktualne zainteresowania badawcze zdominowane są poszukiwaniem materiałów wykazujących wysokie przewodnictwo jonowe.

Dr Michael R. Koblichka. Uzyskał stopień doktora w 1992 r. w Max-Planck Institut for Metal Research w Sztutgarcie pod kierunkiem prof. Kronmüllera, przedstawiając rozprawę pod tytułem "Obrazowanie magnetoptyczne struktury strumienia magnetycznego w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych". Odbýwał staże naukowe na Uniwersytecie w Amsterdamie (1993/94), na Uniwersytecie w Genewie (1994/95), w Oslo/Trondheim (1996/97) oraz SRL/ISTEC (1996 i 1998/99) w Tokio. W latach 1999...2001 pracował w Nordic Superconductor Technologies (NST) w Danii jako pracownik badawczy i inżynier ds. jakości. Dr. Koblichka jest autorem więcej niż 180 publikacji naukowych w dziedzinie nadprzewodnictwa i magnetyzmu, w tym artykułów przeglądowych na temat obrazowania magnetoptycznego i mechanizmów zakotwiczenia strumienia. W 1998 r. uzyskał nagrodę naukową ISTEC za pracę nad zakotwiczeniem strumienia.



Dr inż. Bożenna Boreta. Ukończyła studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w 1968 r. specjalizując się w technologii półprzewodników. Stopień naukowy doktora uzyskała w Instytucie Elektrotechniki w 2003 r., przedstawiając rozprawę pod tytułem "Wpływ anizotropii magnetycznej na właściwości wybranych urządzeń elektrycznych" wykonaną pod kierunkiem doc. dr hab. J. Sosnowskiego. Pracę zawodową rozpoczęła w 1967 r. w Biurze Badawczo-Rozwojowym Półprzewodników przy FP "Tewa", następnie znalazła zatrudnienie w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. W latach 1971...1994, pracując w Zakładzie Miernictwa i Sterowania Elektrycznego IEI brała udział w konstruowaniu laboratoryjnych i przemysłowych urządzeń pomiarowo-kontrolnych do badania elementów półprzewodnikowych i silników elektrycznych. Obecnie pracuje w Dziale Informatyki. Jest autorem lub współautorem wielu prac naukowo-badawczych, patentów i ponad 30 publikacji.