

Jacek SOSNOWSKI  
Daniel GAJDA

## ANALIZA ZAMROŻONEGO STRUMIENIA W NADPRZEWODNIKACH WYSOKOTEMPERATUROWYCH

**STRESZCZENIE** *Liczne zastosowania materiałów nadprzewodnikowych oparte są na wykorzystaniu ich podstawowej właściwości, jaką jest zerowa rezystancja. Materiały nadprzewodnikowe są scharakteryzowane również przez unikalne magnetyczne parametry, w tym zamrożony strumień indukcji magnetycznej – remanencję, której maksymalna obecnie wartość sięga nawet 17 T. Stwarza to całkiem nowe, dotychczas niewyobrażalne możliwości konstrukcji aparatów elektrycznych, w porównaniu z konwencjonalnymi przyrządami opartymi na magnesach trwałych o indukcjach rzędu 2 T. W pracy przeprowadzona zostanie analiza mechanizmu generacji zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych. Uwzględniona zostanie ziarnista struktura nadprzewodników ceramicznych oraz przeprowadzone będą obliczenia wpływu parametrów materiałowych takich jak wewnętrzny i międzyziarnowy prąd krytyczny, niższe pole krytyczne, rozmiary i koncentracja ziaren na zamrożony strumień. Przedstawione zostaną również wyniki badań doświadczalnych w polach magnetycznych o indukcji do 15 T i niskich temperaturach, krzywych histerezy magnetycznej otrzymanych ceramicznych nadprzewodnikowych na bazie itru i bizmutu. Na podstawie tych pomiarów wyznacza się wartość zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej.*

**Słowa kluczowe:** *nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe, zamrożony strumień, materiały ceramiczne*

---

**doc. dr hab. Jacek SOSNOWSKI**

e-mail: sosnow@iel.waw.pl

Zakład Wielkich Moc,  
Instytut Elektrotechniki

**mgr inż. Daniel GAJDA**

e-mail: dangajda@op.pl

Międzynarodowe Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych  
i Niskich Temperatur

## 1. WSTĘP

---

Właściwości magnetyczne nadprzewodników wysokotemperaturowych mogą być wykorzystane w urządzeniach elektrycznych nowej generacji [1]. Jednym z bardziej znanych przykładów jest lewitacja magnetyczna. O ile teoria Earnshawa pokazuje, że układ dwóch magnesów konwencjonalnych nie może w sposób stabilny lewitować, to w przypadku materiałów nadprzewodnikowych ze względu na generację prądów ekranujących, chroniących przed zmianą indukcji magnetycznej będzie to przypadek stabilnej lewitacji. Podstawowym parametrem użytecznym do opisu magnetycznych właściwości nadprzewodników jest wartość zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej, odpowiadająca tak zwanej remanencji magnetycznej. W niniejszym artykule zostanie omówione to zagadnienie w celu przybliżenia tej nowej perspektywicznej problematyki wykorzystania nadprzewodników wysokotemperaturowych.

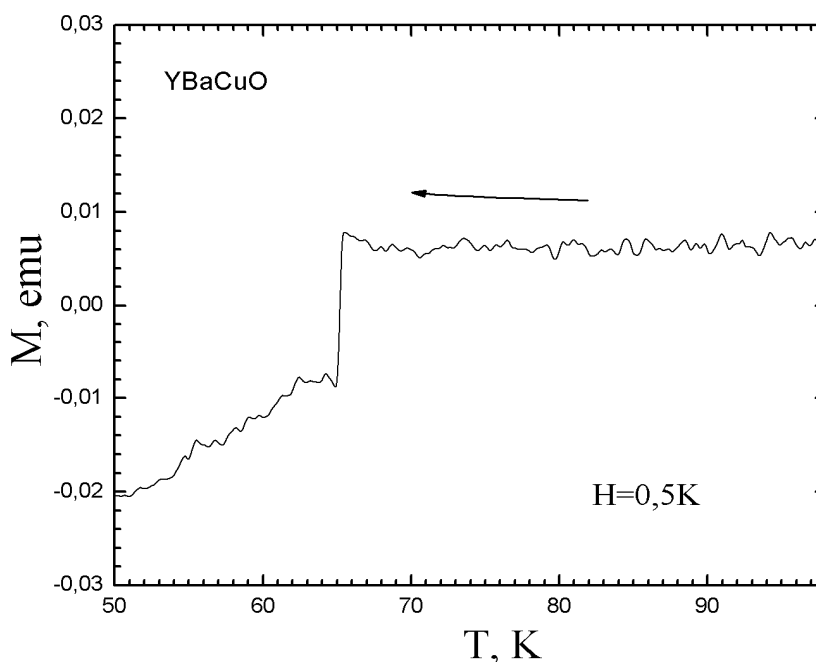


**Rys. 1.** Widok elektromagnesu nadprzewodnikowego (lewa strona) oraz wstawki do pomiaru magnetyzacji z kontr-kriostatem (prawa strona)

## 2. BADANIA DOŚWIADCZALNE CERAMIK NADPRZEWODNIKOWYCH

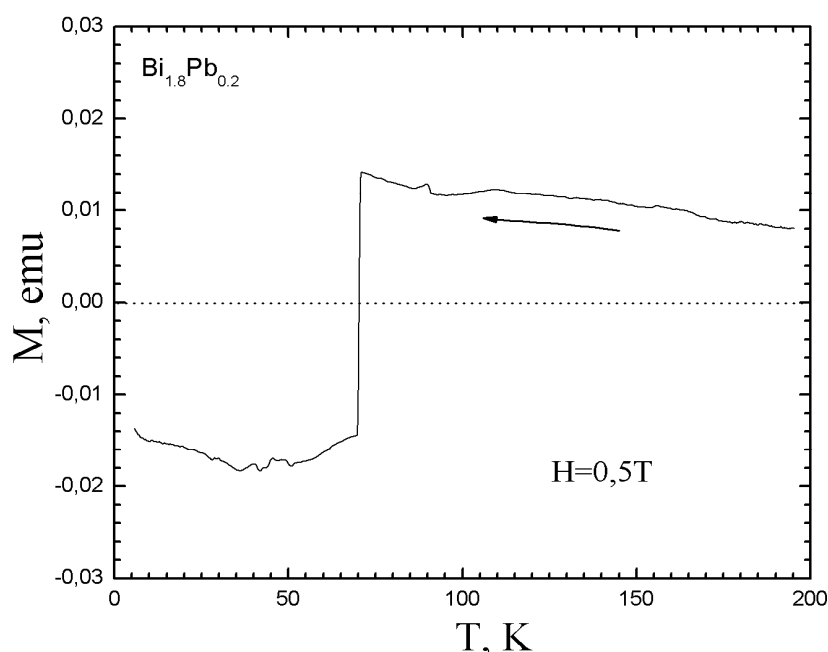
Zamrożony strumień indukcji magnetycznej wyznacza się eksperymentalnie na podstawie pomiarów krzywych magnetyzacji. W pracy pomiary krzywych histerezy magnetycznej przeprowadzono metodą wibrującej próbki, zwaną po angielsku VSM (Vibrating Sample Magnetometer), w elektromagnesie nadprzewodnikowym wytwarzającym indukcję magnetyczną sięgającą 15 T umieszczonym w kriostacie z ciekłym helem, co przedstawia lewa część rys. 1. Pomiary te wykonano w temperaturze 4.2 K. Wstawka regulacji temperatury (kontrkriostat) pokazana jest z prawej strony rys. 1, natomiast w środkowej części widoczna jest wstawka pomiarowa. Na jednym końcu wstawki zamocowane są dwie cewki przeciwsobnie nawinięte, wewnątrz których znajduje się wibrująca próbka nadprzewodnikowa, ruch której napędzany jest mechanicznie głośnikiem lub innym urządzeniem umieszczonym na drugim końcu wstawki.

Pomiary właściwości magnetycznych przeprowadzono na zsyntetyzowanych ceramikach nadprzewodnikowych na bazie itru o składzie  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  oraz na ceramikach bizmutowych typu  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ , preparowanych w kontekście wykorzystania ich w ekranach nadprzewodnikowych.



Rys. 2. Przejście do stanu nadprzewodnictwa w stałym polu magnetycznym o indukcji  $B = 0.5 \text{ T}$  zsyntetyzowanej ceramiki o składzie  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Badane ceramiki otrzymane zostały metodą spiekania sproszkowanych tlenków odpowiednich metali w piecu sylitowym i następnie długotrwałego ich wygrzewania. W celu poprawy parametrów nadprzewodnikowych zastosowano domieszkę srebra w przypadku ceramik itrowych, natomiast dla ceramik bizmutowych domieszkę ołowiu, wprowadzając do procesu syntezy odpowiedni tlenek. Temperaturowe przejścia nadprzewodnikowe badanych ceramik w polu magnetycznym pokazane są na rys. 2 i 3. Ze względu na obecność pola magnetycznego przejścia nadprzewodnikowe zachodzą w odpowiednio obniżonej

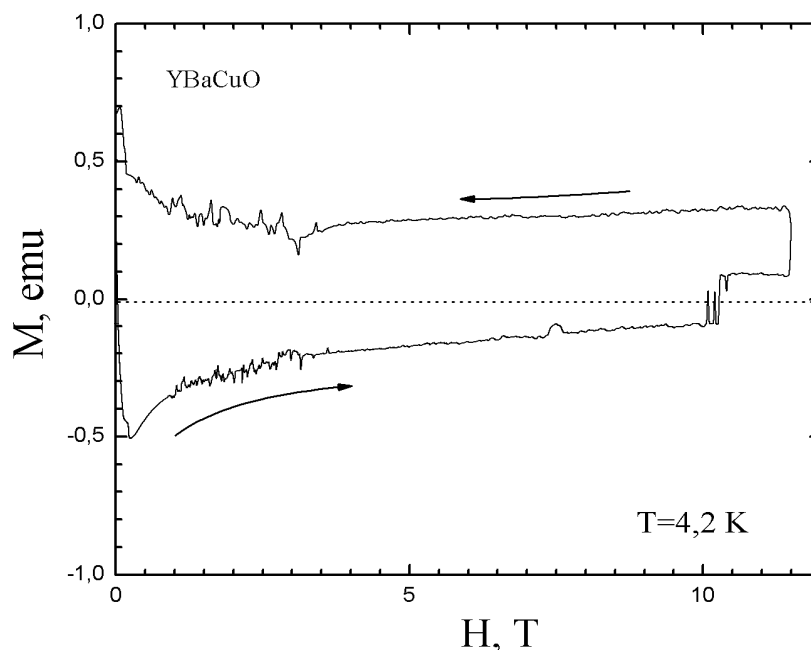


**Rys. 3.** Przejście do stanu nadprzewodnictwa w stałym polu magnetycznym o indukcji  $B = 0.5$  T zsyntetyzowanej ceramiki z domieszką ołowiu o składzie  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$

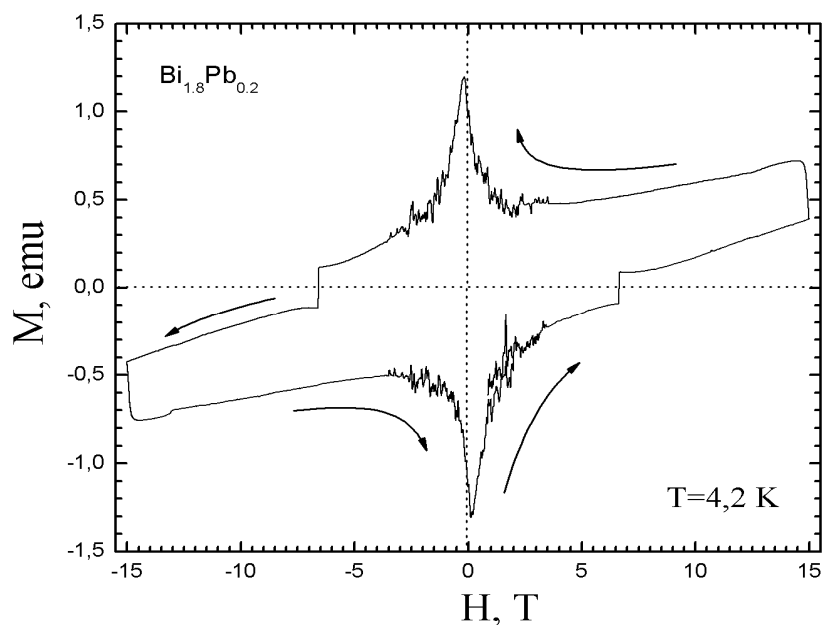
temperaturze. Również wpływ na ten efekt może mieć stopień czystości proszków stosowanych w procesie syntezy. Kolejne rysunki 4 i 5 przedstawiają przykładowe wyniki przeprowadzonych pomiarów magnetyzacji w silnym polu magnetycznym, zmierzone dla tych samych ceramik nadprzewodnikowych. Strzałki oznaczają kierunek zmian przyłożonego pola magnetycznego przy pomiarach krzywych histerezy magnetycznej lub zmian temperatury w przypadku pomiarów przejścia do stanu nadprzewodzącego.

Na rysunku 4 pokazana jest pętla histerezy w przypadku narastającego i następnie malejącego do zera pola magnetycznego, natomiast rys. 5 przedstawia pełną pętlę histerezy zmierzoną dla obydwu polaryzacji przyłożonego pola magnetycznego. Widoczne są na rysunkach drobne oscylacje momentu

magnetycznego w obszarze kilku tesli, występowanie których związane może być z niestabilnością sieci nici wirowych w nadprzewodniku wysokotemperaturowym, tak zwanymi niepełnymi skokami strumienia indukcyjnej magnetycznej.



Rys. 4. Krzywa histerezy magnetycznej ceramiki nadprzewodnikowej na bazie itru typu  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  w silnych polach magnetycznych i temperaturze helowej

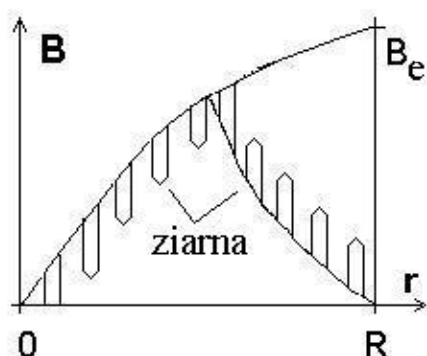


Rys. 5. Pełna pętla histerezy magnetycznej ceramiki nadprzewodnikowej z domieszką ołowiu typu  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$  w silnych polach magnetycznych i temperaturze helowej

Dla ceramiki bizmutowej zaobserwowano przejście magnetyzacji na paramagnetyczną stronę, co wskazuje na występowanie fazy paramagnetycznej w ceramice. Efekt ten obserwowany był także uprzednio na taśmach nadprzewodnikowych na bazie bizmutu w srebrnej powłoce [2].

Znaczna nieodwracalność krzywych histerezy magnetycznej jest miarą prądów krytycznych, które przez dany materiał nadprzewodnikowy mogą płynąć. Jednak ze względu na granulowaną strukturę wysokotemperaturowych ceramik nadprzewodnikowych należy odróżnić wartości prądów krytycznych mierzonych metodami transportowymi a metodami indukcyjnymi. Prąd transportu jest prądem całkowitym płynącym zarówno przez ziarna nadprzewodnikowe, jak też przez obszary międzyziarnowe, które mogą mieć znacznie słabsze charakterystyki nadprzewodnikowe. Przepływ prądu transportu przez taki nadprzewodnik nosi więc cechy perkolacyjnego. Natomiast mierzony prąd magnetyzacji opisuje właściwości ekranujące ceramiki nadprzewodnikowej, które oczywiście są znacznie silniejsze wewnątrz ziaren, niż w obszarach międzyziarnowych, scharakteryzowanych występowaniem słabych złączy Josephsonowskich. Ten efekt wypełnienia matrycy ceramiki nadprzewodnikowej ziarnami o innych właściwościach wpływa także na wartość zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej, a więc wartość magnetyzacji w zerowym polu magnetycznym, po pełnym cyklu narastania i malenia do zera indukcji magnetycznej, co widać na rys. 4 i 5. Efekt ten jest właśnie przedmiotem analizy teoretycznej przedstawionej w niniejszym artykule.

### 3. ANALIZA TEORETYCZNA

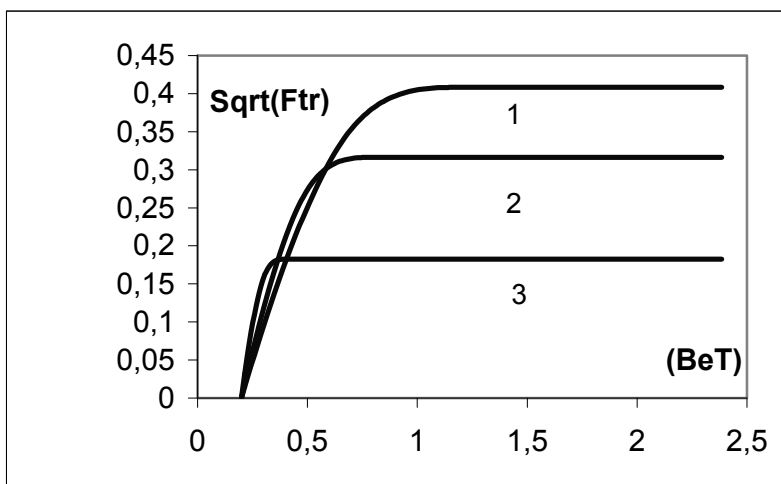


Rys. 6. Profil indukcji magnetycznej w przekroju ceramiki nadprzewodnikowej przy uwzględnieniu występowania ziaren nadprzewodnikowych podczas cyklu indukcji magnetycznej  $0 \rightarrow B_e \rightarrow 0$

W pracy rozpatrzono przypadek wpływu występowania ziaren nadprzewodnikowych na zamrożony strumień indukcji magnetycznej  $F_{tr}$  (Flux trapped), w funkcji maksymalnej indukcji w cyklu przyłożonego pola magnetycznego.

$B_e$  oznacza maksymalną wartość indukcji magnetycznej w cyklu przyłożoną do nadprzewodnika. Schematycznie przedstawia to rys. 6. Rozpatrzone zostały cztery przypadki występowania zamrożonego strumienia, w zależności od narastającej wartości zewnętrznej indukcji magnetycznej. Na ry-

sunku 6 zaznaczona jest także zmiana rozkładów indukcji magnetycznej w nadprzewodniku pod wpływem występowania ziarnistej jego struktury.



**Rys. 7. Wpływ gęstości prądu krytycznego nadprzewodnika na pierwiastek z wartości zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej w cyklu zewnętrznej indukcji magnetycznej  $0 \rightarrow B_e \rightarrow 0$ . Krzywe 1-3 odnoszą się do przypadków rosnących wartości gęstości prądu krytycznego**

Jak widać dla narastającego pola magnetycznego zamrożony strumień w ziarnach obniża całkowity strumień w nadprzewodniku, natomiast dla malejącego pola magnetycznego zmienia znak i dodaje się. Pierwszy przypadek ma miejsce, gdy maksymalna indukcja magnetyczna w cyklu jest mniejsza od tak zwanego pola pierwszej penetracji  $B_{c1}$ . Wówczas indukcja magnetyczna nie wnika do nadprzewodnika i zamrożony strumień indukcji magnetycznej na jednostkę powierzchni ( $F_{tr}$ ), również jest równy zero. Przy wyższych wartościach indukcji magnetycznej, to znaczy dla  $\xi > B_e^1 > 0$ , gdzie  $B_e^1 = B_e - B_{c1}$ , zamrożony strumień, będący matematycznie całką po objętości nadprzewodnika z profilu indukcji magnetycznej w przekroju przedstawionym na rys. 6 wyraża się wzorem:

$$F_{tr} = \frac{B_e^{12}}{2\xi^2} \left[ \xi - \frac{B_e^1}{2} + nB_{sg} \right] \quad (1)$$

gdzie parametr  $\xi$  oznacza wartość pełnej penetracji indukcji magnetycznej do środka nadprzewodnika:

$$\xi = \mu_0 j_c R \quad (2)$$

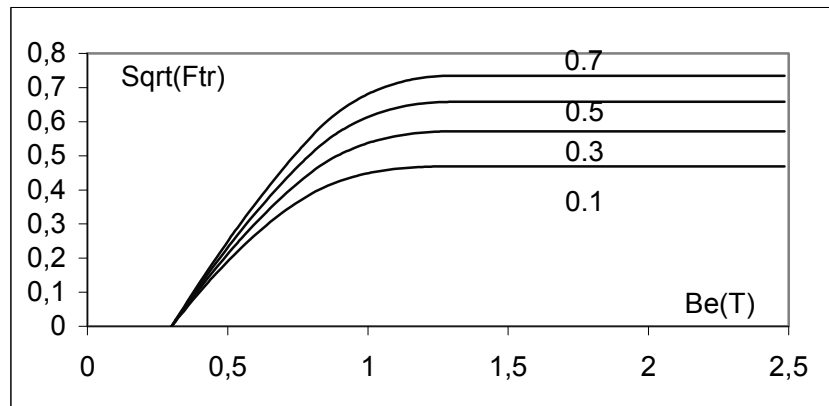
W równaniu 1 uwzględniono również zgodnie z rys. 6 występowanie ziaren nadprzewodnikowych w matrycy ceramiki, opisanych względną koncentracją  $n$  zmieniającą się między 0 a 1 oraz wielkością zamrożonego strumienia związanego z pojedynczym ziarnem na jednostkę jego powierzchni  $B_{sg}$ :

$$B_{sg} = Bc_{1g} + \frac{\xi g}{3} \quad (3)$$

$Bc_{1g}$  jest pierwszym polem krytycznym ziarna, natomiast  $\xi g$  jest zdefiniowane wzorem:

$$\xi g = \mu_0 j_{cg} R_g \quad (4)$$

dla ziarna nadprzewodnikowego o promieniu  $R_g$  i gęstości prądu krytycznego  $j_{cg}$ . Zależności 1-4 wyprowadzone zostały w przybliżeniu liniowych rozkładów indukcji magnetycznej opisanych modelem Beana.



Rys. 8. Wpływ wypełnienia ziarnami nadprzewodnika na pierwszą z wartości zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej w cyklu zewnętrznej indukcji magnetycznej  $0 \rightarrow B_e \rightarrow 0$ . Liczby przy krzywych oznaczają wartość parametru  $n$ , opisującego względną koncentrację ziaren

W kolejnym obszarze narastania zewnętrznej indukcji magnetycznej opisanej warunkiem  $2\xi \geq B_e^1 \geq \xi$  wartość zamrożonego strumienia jest równa:

$$F_{tr} = \frac{2nB_{\lambda g}}{\xi^2} \left( B_e^1 \xi - \frac{\xi^2}{2} - \frac{B_e^1}{4} \right) + \frac{2\xi}{3} \left( \frac{1}{2} - \left( 1 - \frac{B_e^1}{2\xi} \right)^3 \right) \quad (5)$$



Dla wyższych wartości indukcji magnetycznej w cyklu, to znaczy przy  $B_e^1 \geq 2\xi$  zamrożony strumień przybiera wartość stałą, opisana wzorem

$$F_{tr} = \frac{\xi}{3} + nB_{1g} \quad (6)$$

Powyższa analiza teoretyczna umożliwia śledzić wpływ poszczególnych parametrów materiałowych na wielkość zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej, co następnie powinno być pomocne w pracach elektrotechnologicznych nad znalezieniem materiałów nadprzewodnikowych o odpowiednich właściwościach magnetycznych. Przykłady rezultatów obliczeń wpływu poszczególnych parametrów materiałowych na wielkość zamrożonego strumienia indukcji magnetycznej  $F_{tr}$  przedstawione są na rys. 7-8 i wskazują na istotne znaczenie tego zagadnienia.

## LITERATURA

1. Sosnowski J., Nadprzewodnictwo i zastosowania, Wyd. Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 2003.
2. Gajda D., Sosnowski J., The degradation effects in HTc Bi:2223 superconducting tapes, Prace Instytutu Elektrotechniki, 2007 – w druku.

*Rękopis dostarczono, dnia 27.02.2007 r.*

**Opiniował: prof. dr hab. inż. Antoni Cieśla**

ANALYSIS OF THE FLUX TRAPPING  
IN HTc SUPERCONDUCTORS

Jacek SOSNOWSKI  
Daniel GAJDA

**ABSTRACT** *HTc superconductors are characterized not only by zero resistivity but also by unique magnetic properties including the giant value of flux trapped. In the paper is performed analysis of this effect taking into account the granular structure of the superconducting ceramics. The experimental measurements of the magnetic hysteresis curves have been performed on the sintered ceramics. From these measurements the flux trapped magnitude is determined.*