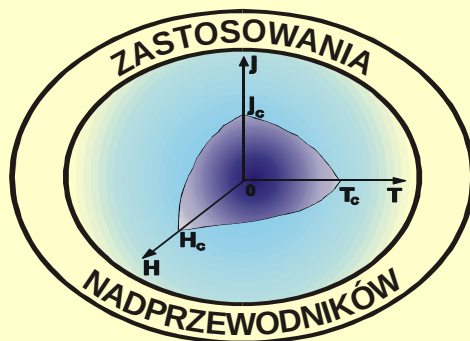


III Seminarium ZASTOSOWANIA NADPRZEWODNIKÓW

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



ZN-3

Oddział Lubelski PTETiS

Sekcja Elektrotechnologii Komitetu Elektrotechniki PAN

Sekcja Przemysłu Elektrotechnicznego ZG SEP

Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki IEl w Warszawie

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii
Politechniki Lubelskiej

Lublin 2001

KOMITET NAUKOWY

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski (Politechnika Lubelska)
Prof. dr hab. inż. Bolesław Mazurek (Politechnika Wrocławska)
Prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk (Instytut Elektrotechniki w Warszawie)
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Sobczyk (Instytut Elektrotechniki w Warszawie)
Dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. AGH (Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków)
Dr hab. Jacek Sosnowski, prof. IEL (Instytut Elektrotechniki w Warszawie)
Doc.dr inż. Jerzy Słowikowski (Sekcja Przemysłu Elektrotechnicznego ZG SEP)

KOMITET ORGANIZACYJNY SEMINARIUM

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski (przewodniczący)
Dr inż. Sławomir Kozak
Dr inż. Paweł Surdacki (sekretarz naukowy)
Mgr inż. Grzegorz Wojtasiewicz
Mgr Renata Gałat (sekretarz organizacyjny)

ZESPÓŁ REDAKCYJNY

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski (przewodniczący)
Dr inż. Sławomir Kozak
Dr inż. Paweł Surdacki
Mgr inż. Beata Kondratowicz-Kucewicz

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej

ul. Nadbystrzycka 38a 20-618 Lublin

tel./fax: (+48-81) 53 81 289

e-mail: ptetis@eltecol.pol.lublin.pl

ISBN 83-88110-09-8

Copyright by Politechnika Lubelska

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI LUBELSKIEJ

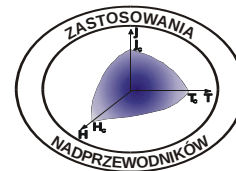
ul. Bernardyńska 13, 29-950 Lublin

Wydawnictwo Drukarnia "Liber"

ul. Szczerbowskiego 6, 20-012 Lublin

**III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”
ZN-3**

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.

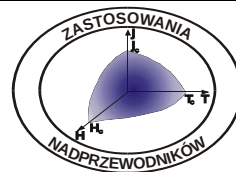


SPIS TREŚCI

1. Jacek Sosnowski <i>Zagadnienia prądu krytycznego nadprzewodników wysokotemperaturowych</i>	7
2. Michał Mosiądz <i>Metody i systemy pomiarowe podatności magnetycznej nadprzewodników wysokotemperaturowych</i>	11
3. Jan Leszczyński, Ewa Korzeniewska <i>Model Beana a krytyczna gęstość prądu w masywnym nadprzewodniku ceramicznym</i>	21
4. Jan Leszczyński, Ewa Korzeniewska <i>Modyfikacja modelu stanu krytycznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego</i>	31
5. Jacek Rymaszewski, Ryszard Pawlak <i>Mikrostruktura obszaru granicznego dyfuzyjnego kontaktu metal – nadprzewodnik</i>	41
6. Jacek Rymaszewski, Marcin Lebioda <i>Nowa technologia wytwarzania połączenia Ag/YbaCuO</i>	47
7. Krzysztof Woźniak, Anna Kisiel, Leszek Woźny <i>Zastosowanie przetworników piezoelektrycznych do badań nadprzewodników wysokotemperaturowych</i>	53
8. Jacek Sosnowski <i>Wybrane zagadnienia normalizacji w nadprzewodnictwie</i>	59
9. Antoni Cieśla <i>Wybrane zagadnienia wykorzystania elektromagnesu nadprzewodnikowego do filtracji magnetycznej</i>	65
10. Dariusz Czerwiński, Tadeusz Janowski <i>Straty mocy w przepustach prądowych urządzeń nadprzewodnikowych</i>	75
11. Henryk Malinowski <i>Układ zabezpieczenia elektromagnesu nadprzewodnikowego chłodzonego kontaktowo</i>	85

12. Leszek Lipiński, Henryk Manuszkiewicz, Anna Szmyrka-Grzebyk <i>Zastosowanie nadprzewodnictwa w termometrii</i>	91
13. Tadeusz Janowski, Paweł Surdacki <i>Współczesne technologie i kierunki badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu</i>	101
14. Grzegorz Wojtasiewicz, Sławomir Kozak <i>Pomiary charakterystyk statycznych modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego</i>	111
15. Sławomir Kozak <i>Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego</i>	121
16. Michał Łanczont, Tadeusz Janowski <i>Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu dla sieci trójfazowej</i>	127
17. Grzegorz Wojtasiewicz <i>Siły dynamiczne w transformatorach nadprzewodnikowych</i>	133
18. Eugeniusz Uchyla <i>Efekty rozwoju krioelektrotechniki w Politechnice Częstochowskiej</i>	143

**III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”
ZN-3**



PRZEDMOWA

Spotykamy się po raz trzeci w Lublinie na seminarium zastosowań nadprzewodników. Seminarium ma charakter roboczy i służy wymianie doświadczeń, poznaniu się i podtrzymaniu kontaktów osobistych pracowników nauki zajmujących się nadprzewodnictwem i zastosowaniami nadprzewodników.

III Seminarium Zastosowań Nadprzewodników organizowane przez Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii przy współudziale Pracowni Kriomagnesów Zakładu Badań Podstawowych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie oraz Lubelskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej pod patronatem Sekcji Elektrotechnologii, Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk i Sekcji Przemysłu Elektrotechnicznego Zarządu Głównego Stowarzyszenia Elektryków Polskich.

Przyspieszenie postępu w zastosowaniach nadprzewodników w ostatniej dekadzie XX wieku, szczególnie w zakresie urządzeń silnoprądowych trwa nadal i wszystko wskazuje, że tendencja ta będzie utrzymywać się długo. Podstawą trwałości tej tendencji jest dokonany w ubiegłej dekadzie wielki postęp w zakresie wytwarzania drutów i taśm nadprzewodnikowych LTS i HTS o zadowalających parametrach technicznych, kontaktowych układów chłodzenia oraz wykorzystania próżni do izolacji termicznej. W Europie ważnym czynnikiem stymulującym rozwój technologii nadprzewodnikowych jest budowa Europejskiego Centrum Badań Nuklearnych (CERN) koło Genewy, dla którego urządzenia na bazie nadprzewodników budują dziesiątki firm, wśród których niestety nie ma firm z Polski.

W Polsce problematyką nadprzewodnictwa zajmuje się wiele placówek naukowych, szkół wyższych i instytutów Polskiej Akademii Nauk oraz instytutów resortowych. Badania nad zastosowaniem nadprzewodników prowadzone są w Politechnikach: Wrocławskiej, Łódzkiej, Częstochowskiej i Lubelskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie (Oddział we Wrocławiu, Pracownia Kriomagnesów w Lublinie). Wyniki badań tych placówek nie zostały dotychczas wdrożone w skali przemysłowej. Są one

prezentowane na krajowych i międzynarodowych konferencjach oraz publikowane w czasopiśmie. Mam nadzieję, że Seminarium Zastosowań Nadprzewodników stanie się forum spotkań i wymiany doświadczeń i prezentacji osiągnięć w zakresie nadprzewodnictwa i przyczyni się do przyspieszenia rozwoju zastosowań nadprzewodników w Polsce.

Bardzo dziękuję wszystkim uczestnikom za nadesłanie swoich prac i udział w seminarium. Życzę wszystkim uczestnikom przyjemnego pobytu w Lublinie i Nałęczowie.

Tadeusz Janowski

Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego
Seminarium

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



ZAGADNIENIA PRĄDU KRYTYCZNEGO
NADPRZEWODNIKÓW WYSOKOTEMPERATUROWYCH

Jacek Sosnowski

Instytut Elektrotechniki

Pracownia Nadprzewodnictwa Wysokotemperaturowego

Zakład NWR

04-703 Warszawa, Pożaryskiego 28

E-mail: sosnow@iel.waw.pl

Abstract

New approach to the critical current analysis of the high temperature superconducting ceramics is presented. The case of the flux line core interaction with the mechanical defects, acting as the pinning centres is investigated. The interaction with columnar defects and flat defects of the form dislocations is considered, while theoretical results compared with experimental data obtained on the BiSCCO tapes. In the second part of paper the application of these tapes in the resistive type fault current limiter is described. The resistive superconducting limiter constructed in HTS Laboratory of IEI is presented, and the results of testing measurements are described.

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe, prąd krytyczny, siły zakotwiczenia, ograniczniki prądowe

1. Wstęp

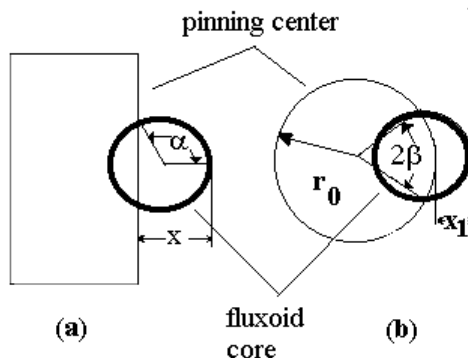
Podstawowym problemem zastosowań nadprzewodników wysokotemperaturowych w urządzeniach elektrycznych mocy jest osiągnięcie odpowiedniej wartości prądu krytycznego. Według wielu prognoz w ciągu najbliższych dwudziestu lat nastąpi gwałtowny postęp w tej problematyce, który umożliwi wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych do przesyłu energii elektrycznej na szeroką skalę [1-2]. Jednak w celu osiągnięcia tej sytuacji należy rozpoznać mechanizm przewodzenia prądu przez te nowe materiały nadprzewodnikowe przy uwzględnieniu specyfiki zagadnień transportu mających w nich miejsce, w tym anizotropowych właściwości [3]. Zagadnienie to rozpatrzone zostanie właśnie w niniejszej pracy. W drugiej jej części zanalizowana zostanie możliwość wykorzystania materiałów nadprzewodnikowych w urządzeniach elektrycznych na przykładzie nadprzewodnikowego ogranicznika prądowego

rezystywnego typu skonstruowanego w Pracowni Nadprzewodnictwa Wysokotemperaturowego Zakładu NWR Instytutu Elektrotechniki w Warszawie.

2. Zagadnienia sił zakotwiczenia w ceramikach nadprzewodnikowych

Prąd krytyczny nadprzewodników wysokotemperaturowych, częściowo analogicznie do nadprzewodników klasycznych określony jest poprzez zagadnienia sił zakotwiczenia - pinningu skwantowanych nici wirowych na centrach zakotwiczenia. Odnosi się to do nadprzewodników kompozytowych - drutów nadprzewodnikowych, w których w procesie obróbki technologicznej powstają nowe defekty strukturalne. Również w trakcie pracy urządzenia z wysokotemperaturowymi elementami nadprzewodnikowymi, na przykład w reaktorach jądrowych i występującego tam napromieniowywania ciężkimi jonami, mogą występować dodatkowe defekty, tak zwane kolumnowe. Wpływem tych defektów na prąd krytyczny zajmiemy się w bieżącym rozdziale.

Rozpatrzono przypadek oddziaływania nici wirowych z defektami płaskimi, a więc dyslokacjami wprowadzonymi głównie w procesie technologicznym oraz oddziaływania z defektami punktowymi cylindrycznymi. Ilustruje to rys. 1 przedstawiający schemat geometryczny oddziaływania rdzenia nici wirowej z centrum zakotwiczenia w obydwu przypadkach.



Rys. 1. Schemat geometryczny oddziaływania rdzenia nici wirowej z centrum zakotwiczenia płaskim (przypadek a) oraz cylindrycznym (przypadek b).

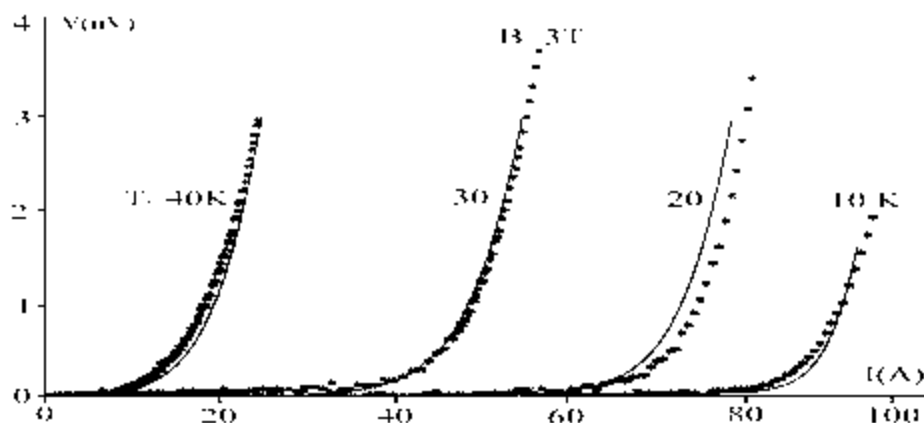
Zmiana położenia rdzenia nici wirowej prowadzi do wzrostu energii swobodnej układu nić wirowa – centrum zakotwiczenia, co opisane jest równaniem:

$$U = \frac{\mu_0 H_c^2 l}{2} * [\xi^2 (\alpha - \pi - \frac{\sin 2\alpha}{2}) - r_0^2 (\beta - \frac{\sin 2\beta}{2})] \quad (1)$$

gdzie H_c jest polem termodynamicznym, ξ długością koherencji, l długością centrum natomiast pozostałe oznaczenia w równaniu 1 są objaśnione na rys. 1. Analiza numeryczna przeprowadzona została przy założeniu w pierwszym przybliżeniu cylindrycznego kształtu rdzenia nici wirowej i regularnego kształtu defektu, pełniącego rolę centrum zakotwiczenia. Płaskie centrum odpowiadać będzie oddziaływaniu z dyslokacjami, natomiast cylindryczne można związać z efektem kolumnowym wywołanym pracą

uzwojenia z wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych w reaktorach jądrowych i związanych z tym efektów napromieniowania:

Znając energię oddziaływania wyznaczono siłę oddziaływania – siłę pinningu w obydwu przypadkach, a z warunku równowagi między tą siłą a siłą Lorentza powstającą podczas przepływu prądu przez materiał nadprzewodnikowy wyznaczono kształt charakterystyk prądowo-napięciowych i następnie prąd krytyczny kompozytowej taśmy nadprzewodnikowej typu Bi:2223. Rys. 2 przedstawia porównanie danych doświadczalnych z obliczeniami komputerowymi. Obserwowana dobra zgodność modelu z eksperymentem umożliwiła wyznaczenie koncentracji centrów pinningu rzędu 10^{17} m^{-3} , która odpowiada wynikom pomiarów scanningowej analizy rentgenograficznej. Charakterystyki I-V otrzymywano również na syntetyzowanych w IEL ceramikach bizmutowych, co również będzie w referacie przedstawione. .



Rys. 2. Porównanie wyników obliczeń komputerowych (----) i danych doświadczalnych (* *) charakterystyk prądowo-napięciowych taśm nadprzewodnikowych w funkcji temperatury.

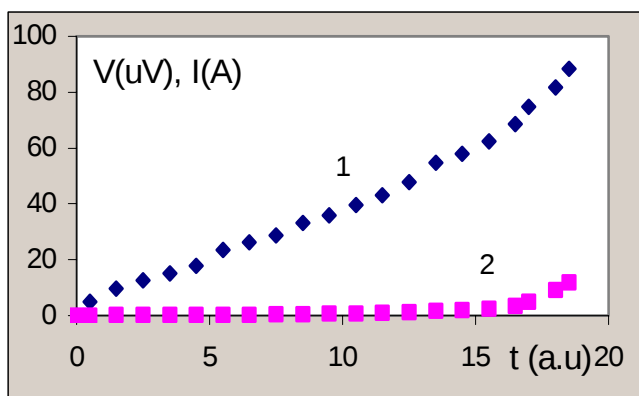
3. Prądowe zastosowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych w ograniczniku rezystywnym

Przedstawiono prądowe zastosowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych w skonstruowanym ograniczniku rezystywnym. Widok ogólny stanowiska pomiarowego pokazany jest na rys. 3. Widoczny jest tutaj kriostat metalowy z przepustem wysokonapięciowym, w którym umieszczona jest wstawka zawierająca element nadprzewodnikowy, który stanowiły dwie taśmy typu BiSCCO połączone równolegle produkcji Sumitomo w Japonii. Osobnym fragmentem widocznym na rys. 3 jest zbiornik z cieczą kriogeniczną podłączony do kriostatu z pomocą lewara przepływowego. Element nadprzewodnikowy służył tutaj jako czujnik elektroniczny. Wytworzony sygnał napięciowy po wzmacnieniu podawany był na cewkę sterującą stycznika, która następnie otwierała obwód. Jako element nadprzewodnikowy służyła wielowłóknowa wysokotemperaturowa taśma nadprzewodnikowa z materiału BiSrCaCuO w srebrnej matrycy. Ponieważ prąd krytyczny tej taśmy wynosił około 50 A, więc wielokrotność tej wartości prądu ograniczanego uzyskiwano poprzez równoległe połączenie kilku odcinków taśm nadprzewodnikowych. Zasilacz prądowy umożliwiał uzyskanie prądu o natężeniu do 100 A w obwodzie ogranicznika. Zastosowano dwie taśmy połączone równolegle w elemencie sterującym. Określało to prąd wyłączania ogranicznika na 90 A, co pokazuje

rys. 4. Krzywa 1 na rys. 4 przedstawia narastający w czasie prąd, podczas gdy krzywa 2 indukowany na sondach napięciowych spadek napięcia. Po przekroczeniu nastawnej wartości progowej równej $10 \mu\text{V}$ sygnał elektryczny po wzmacnieniu wytwarzał impuls na cewce stycznika otwierający obwód elektryczny.



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska rezystywnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądowego z widocznym położonym uchwytem zawierającym element nadprzewodnikowy.



Rys. 4. Charakterystyka pracy rezystywnego ogranicznika prądowego: krzywa 1 – zależność od czasu prądu w obwodzie, 2 – spadek napięcia na czujniku nadprzewodnikowym.

Literatura

- [1] Sosnowski J., Perspektywy i rzeczywistość zastosowań nadprzewodników w wysokotemperaturowych w urządzeniach elektrycznych, *IC SPETO 2000*, str. 81-84 (2000).
- [2] Sosnowski J., Ograniczenia prądu krytycznego w nadprzewodnikach, *Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice, ZKWE 2000*, str. 143-146 (2000).
- [3] Sosnowski J., Boreta B., Analiza wpływu anizotropii materiałowej na warunki pracy wybranych urządzeń elektrycznych, *IC SPETO 2000*, str. 159-162 (2000).

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



METODY I SYSTEMY POMIAROWE PODATNOŚCI
MAGNETYCZNEJ NADPRZEWODNIKÓW
WYSOKOTEMPERATUROWYCH

Michał Mosiǳ

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

Politechnika Wrocławska

50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

e-mail: mmosiǳ@go2.pl

Abstract

Measurements of the high temperature superconductors (HTS) properties are carried in order to control their properties. Measurements of ac susceptibility characteristics give a lot of important information about material properties, and enable to determine their basic parameters. Special automated measurement systems are constructed in order to measure ac susceptibility. In this work ac susceptibility measurement methods are described and compared. Some newest measurement systems constructed in the world are also described.

Słowa kluczowe: podatność magnetyczna, nadprzewodniki wysokotemperaturowe, metody i systemy pomiarowe

1. Wstęp

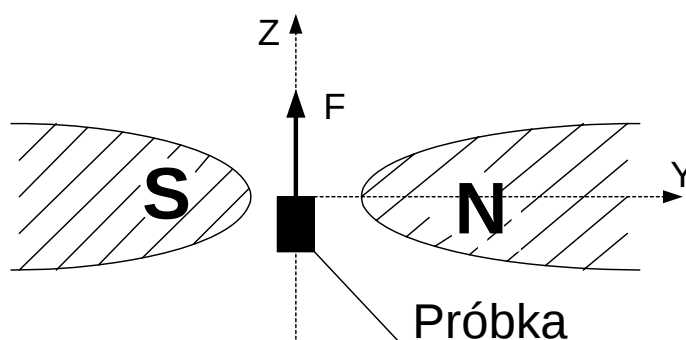
Dla nadprzewodników wysokotemperaturowych prowadzone są badania w celu udoskonalenia ich właściwości i poszukiwania nowych materiałów. Podczas tych badań niezbędna jest kontrola ich właściwości. Mierzy się m. in. podatność magnetyczną, w zewnętrznym polu magnetycznym, i bez jego obecności. W tym celu konstruowane są specjalne systemy pomiarowe. Na podstawie przebiegu temperaturowej charakterystyki podatności magnetycznej określa się m. in. temperaturę krytyczną, szerokość przejścia nadprzewodzącego, prądy ziarnowe, strukturę i ziarnistość materiału, głębokość wnikania i pola krytyczne [1]. Pomiar magnetyczny, w przeciwieństwie do pomiarów właściwości elektrycznych, umożliwia badania materiałów rozdzielonych, nie posiadających dobrych połączeń międzyziarnowych.

2. Metody pomiaru podatności magnetycznej

Metody wagowe

Wśród metod pomiaru podatności magnetycznej najstarsze są metody grawitacyjne [2], zwane wagowymi, wykorzystujące m. in. wagi Gouya, Faradaya, Curie, czy Cohna. W niejednorodnym polu magnetycznym na próbkę o objętości V działa siła (rys. 1)

$$F = \chi H V \frac{dH}{dz}, \quad (1)$$



Rys. 1. Próbkę w niejednorodnym polu magnetycznym

gdzie χ – podatność magnetyczna próbki, H – natężenie pola magnetycznego, dH/dz – gradient pola magnetycznego. Mierzac wartość siły wywieranej na próbkę wyznacza się otrzymuje się wartość podatności magnetycznej [2]. Pomiar podatności magnetycznej metodami wagowymi mogą być wykonywane z rozdzielczością rzędu $10^{-6} \div 10^{-8}$. Niedoskonałościami utrudniającymi stosowanie metod wagowych są trudności występujące podczas integracji wag z kriostatem oraz konieczność stosowania pola magnetycznego rzędu $0,1 \div 1$ T wpływającego na zmianę podatności magnetycznej badanej próbki.

Metody oparte na magnetycznym rezonansie jądrowym

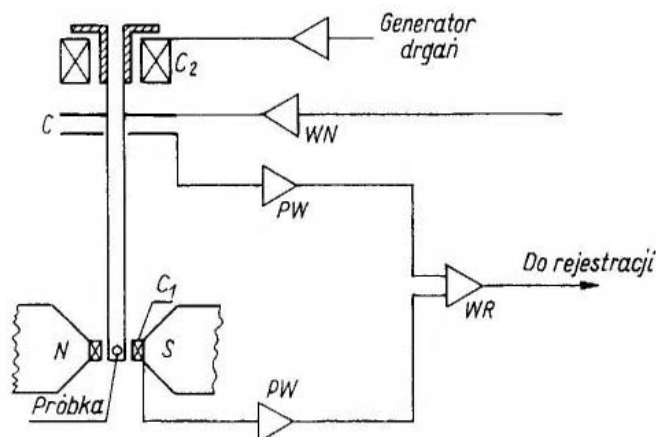
Inną grupą metod pomiaru podatności magnetycznej są metody oparte na magnetycznym rezonansie jądrowym [2, 3], umożliwiające uzyskanie rozdzielczości rzędu $10^{-7} \div 10^{-8}$. Cena, komplikacja procedury pomiarowej i konieczność stosowania pól magnetycznych rzędu 1 T powoduje, że są one stosowane sporadycznie.

Metody indukcyjne

Najobszerniejszą grupą metod pomiaru podatności magnetycznej są metody indukcyjne. Najstarszą z nich jest metoda balistyczna. Przy jej wykorzystaniu osiągnięta jest rozdzielczość rzędu 10^{-5} w polu magnetycznym $10 \div 30$ mT. Niepraktyczność galwanometrów balistycznych eliminuje ją z badań w zakresie niskich temperatur.

Częściej wykorzystywana jest metoda wibracyjna (VSM) [4]. Wykorzystuje ona drgania próbki z częstotliwością akustyczną w stałym polu magnetycznym ok. 10 mT. Schemat magnetometru wibracyjnego Fonera pokazano na rys. 2. Zawieszona próbka

oscyluje w pionie pod wpływem pola magnetycznego wytworzonego przez cewkę C_2 , działającego na nośnik próbki. Powstający w cewce pomiarowej sygnał jest proporcjonalny do momentu magnetycznego próbki oraz parametrów opisujących drgania.



Rys. 2. Schemat magnetometru wibracyjnego Fonera

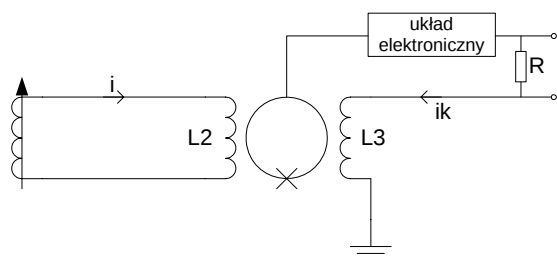
Korzystając z tej metody uzyskać można rozdzielczość pomiaru podatności magnetycznej rzędu $10^{-5} \div 10^{-6}$. Metoda ta stosowana jest do pomiaru podatności magnetycznej próbek o niewielkich rozmiarach. Ze względu na problemy współpracy układu drgającego z układem kriogenicznym, metoda ta nie jest bardzo rozpowszechniona, ale np. firma Oxford Instruments produkuje system pomiarowy oparty o tę metodę.

Najpopularniejszymi metodami pomiaru podatności magnetycznej materiałów nadprzewodzących są

metody indukcyjne prądu zmiennego. W zakresie niskich częstotliwości podatność magnetyczna wyznaczana jest na podstawie zmian indukcyjności wzajemnej czujnika za pomocą mostka Maxwella [5] lub Hartshorna [6]. Metoda pozwala osiągnąć przy częstotliwościach 15-1000 Hz rozdzielczość rzędu $10^{-6} \div 10^{-7}$ w polu magnetycznym $1 \mu T \div 2 mT$. Przy wyższych częstotliwościach (50 kHz $\div$ 1 MHz) do pomiaru zmian indukcyjności wzajemnej czujnika zawierającego próbkę używane są mostki rezonansowe umożliwiające uzyskanie rozdzielczości rzędu 10^{-9} . Ze względu na efekty częstotliwościowe wyniki badań w tak wysokich częstotliwościach są obarczone dużymi błędami. Można je stosować do detekcji przejść nadprzewodzących, a nie do badań przebiegu charakterystyki temperaturowej podatności magnetycznej.

Metody SQUIDowe

Najnowsze są metody pomiarowe oparte na magnetometrach SQUIDowych [2, 3], umożliwiające pomiary z rozdzielczością rzędu $10^{-9} \div 10^{-11}$. Ze względu na koszt, skomplikowanie i wysokie wymagania dotyczące układu pomiarowego nie są powszechnie stosowane. Schemat magnetometru SQUIDowego pokazano na rys. 3. Zasada działania



Rys. 3. Schemat magnetometru SQUIDowego

magnetometrów SQUIDowych jest podobna do metod indukcyjnych, ale detekcja zmian indukcyjności wzajemnej czujnika odbywa się za pomocą czujników SQUID. Ich zastosowanie do badania nadprzewodników wysokotemperaturowych ogranicza brak odpowiednio czułych SQUIDów wysokotemperaturowych.

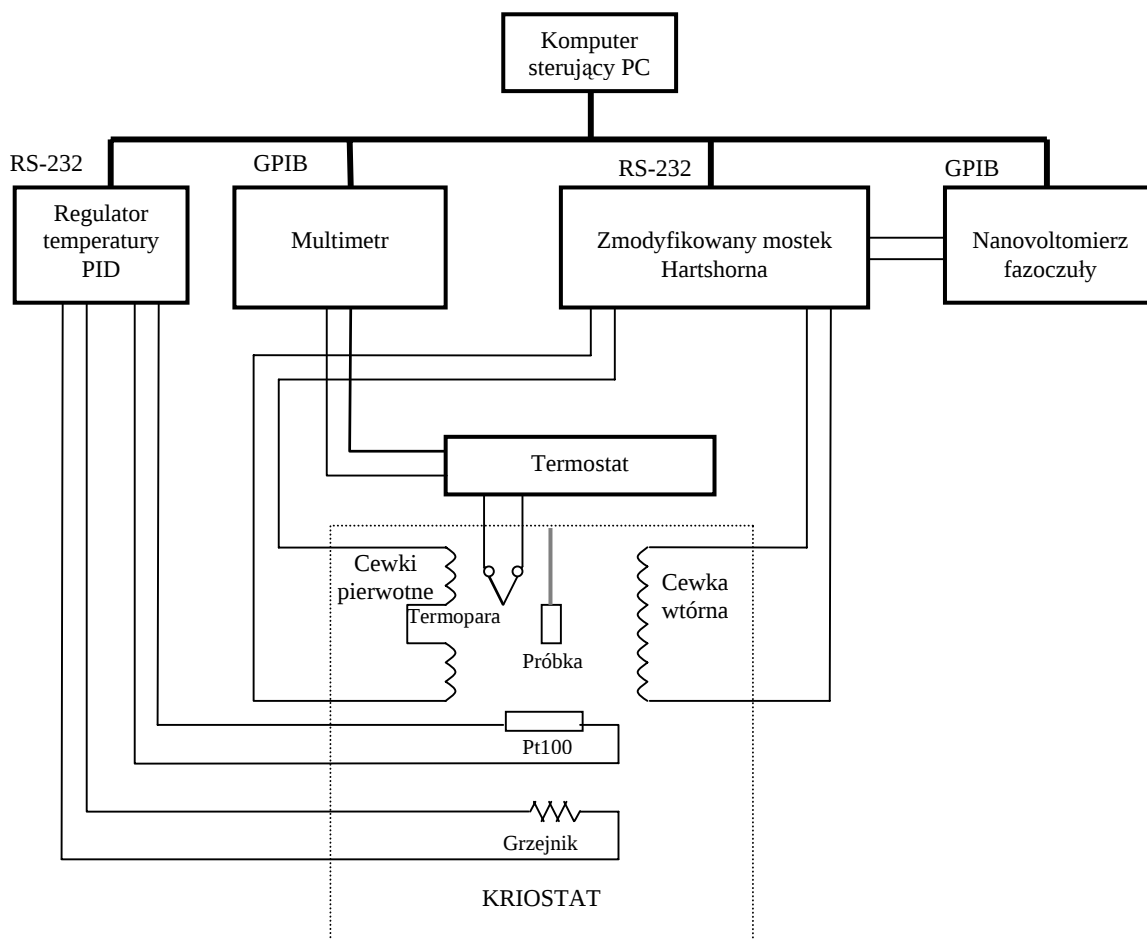
3. Systemy pomiarowe

System skonstruowany na Politechnice Wrocławskiej

Skonstruowany na Politechnice Wrocławskiej system wykorzystuje metodę indukcji wzajemnej. Schemat systemu pokazano na rys. 4. W jego skład wchodzi tor pomiaru podatności magnetycznej i oraz regulacji i pomiaru temperatury.

W skład toru pomiaru podatności magnetycznej [7] wchodzi mostek indukcyjności wzajemnej (zmodyfikowany mostek Hartshorna), nanowoltomierz fazoczuły i czujnik indukcyjności wzajemnej. W skład toru regulacji temperatury wchodzi kriostat przepływowy, regulator temperatury PID czujnikiem temperatury Pt100, natomiast pomiar temperatury odbywa się za pomocą termopary Cu-Konst. i multimetru cyfrowego.

Głównym elementem systemu jest mostek Hartshorna [8]. Mostek ten może pracować w trybach zrównoważonym i niezrównoważonym, podczas badań przejść nadprzewodzących wykorzystywany jest tryb niezrównoważony.



Rys. 4. Schemat podsystemu do pomiaru podatności magnetycznej

W systemie zastosowano kriostat przepływowy [7]. Próbkę umieszcza się w stabilizowanej termicznie komorze pomiarowej. W celu wyeliminowania gradientów termicznych w czujniku pomiarowym, cewki zostały umieszczone na zewnątrz komory pomiarowej, w temperaturze pokojowej.

Kontrola i stabilizacja temperatury w kriostacie prowadzona jest przy użyciu regulatora temperatury współpracującego z czujnikiem temperatury sterującym grzejnikiem. Termopara Cu-Konst umieszczona w pobliżu próbki służy do pomiaru jej temperatury. Na-pięcie na termoparze mierzone jest multimetrem cyfrowym i przekazywane do komputera sterującego. Na podstawie pomiarów korygowane są nastawy regulatora temperatury.

Automatyczne sterowanie systemem i poprawną akwizycję danych zapewnia komputer wraz z oprogramowaniem stworzonym dla potrzeb systemu.

Procedura pomiarowa przebiega dwuetapowo – najpierw mierzona jest pełna charakterystyka czujnika bez próbki, a potem dla czujnika z próbką. Pozwala to skrócić procedurę pomiarową w porównaniu z systemami, w których zastosowano przesuwanie próbki lub układu cewek dla każdego punktu pomiarowego.

Na podstawie charakterystyki $\chi(T)$ określa się temperaturę krytyczną T_c jako wartość odpowiadającą połowie zmiany podatności magnetycznej przy wzroście temperatury.

System umożliwia pomiary podatności magnetycznej w zakresie częstotliwości 30 Hz ÷ 2 kHz, i temperatur 77 K ÷ 300 K bez zewnętrznego pola magnetycznego. Dokładność nastawy temperatury wynosi 0,5 K, a jej stabilność 0,1 K.

System skonstruowany w Indiach

Inny zautomatyzowany system pomiarowy podatności magnetycznej został zbudowany w Indiach przez Interuniversity Consortium for DAE Facilities [9]. System ten umożliwia pomiary w zakresie temperaturowym 77 – 300 K z rozdzielczością 50 mK, przy częstotliwościach 1 Hz – 100 kHz. Oba pola magnetyczne (zmienne pomiarowe oraz stałe) generowane są przez pojedynczą cewkę pierwotną. Do chłodzenia próbki wykorzystuje się ciekły azot. W systemie stosowane jest przesuwanie próbki z jednej z cewek detekcyjnych do drugiej, co wydłuża czas potrzebny niezbędny do przeprowadzenia pomiaru. Do równoważenia mostka pomiarowego zamiast dzielnika Kelvina-Varleya zastosowano własnej konstrukcji układ elektroniczny, co pozwoliło zredukować koszty oraz ograniczenia częstotliwości. Układ cewek pomiarowych jest całkowicie niezależny od układu kriogenicznego, więc dostosowanie systemu do badań w temperaturach helowych jest bardzo proste.

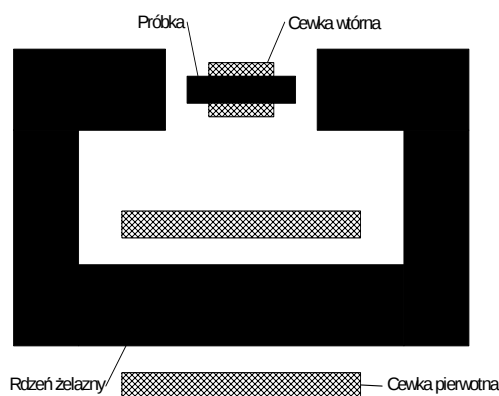
System skonstruowany w Sao Paulo

W Sao Paulo w Brazylii zbudowano system pomiarowy z przesuwaną cewką [10]. Układ kriogeniczny chłodzi komorę pomiarową wykorzystując ciekły hel, dzięki czemu umożliwia badania klasycznych nadprzewodników. System wykorzystuje mostek Hartshorna do pomiaru zmian indukcyjności wzajemnej czujnika. Zastosowano tu metodę przesuwanej cewki. Dla każdego kroku pomiarowego następuje przemieszczenie cewek pomiarowych umieszczonych w temperaturze pokojowej takie, aby próbka znalazła się w środku każdej z nich. Najczęściej w analogicznych systemach stosowane jest przemieszczenie próbki wewnątrz komory pomiarowej. Cewki detekcyjne umieszczono wewnątrz cewki pierwotnej, dzięki czemu zwiększono współczynnik wypełnienia i czułość

układu. Podczas konstrukcji systemu dużą uwagę zwrócono na zapewnienie stabilnych warunków termicznych komory pomiarowej. Stosując odpowiednie materiały zadbane o dobre ekranowanie magnetyczne i elektryczne komory pomiarowej, co znacząco wpłynęło na dokładność wyników pomiarowych. Skonstruowany system umożliwia badania materiałów w zakresie częstotliwości do 10 kHz przy temperaturach sięgających 4 K.

System skonstruowany na Uniwersytecie w Liege

Na Uniwersytecie w Liege w Belgii skonstruowano system do pomiaru podatności magnetycznej [11] wykorzystujący metodę indukcyjności wzajemnej. Zamiast cewki pierwotnej generującej zmienne pole magnetyczne i dwóch nawiniętych przeciwsośnie cewek wtórnych, zamontowano tu pojedynczą cewkę detekcyjną nawiniętą na próbce, jak przedstawiono na rys. 5. Rozwiązanie to daje niską czułość przy badaniu materiałów o małej podatności magnetycznej ($\chi \ll 1$), ale dla próbek nadprzewodzących o podatności z zakresu 0..-1 jest ona wystarczająca. Elektromagnes z żelaznym rdzeniem generuje pole magnetyczne w obszarze próbki. W układzie kriogenicznym zrezygnowano z tradycyjnego chłodzenia próbek ciekłym azotem lub helem, i zastosowano znacznie wydajniejszą chłodziarkę Gifforda-McMahona.



Rys. 5. Schemat czujnika indukcyjności wzajemnej

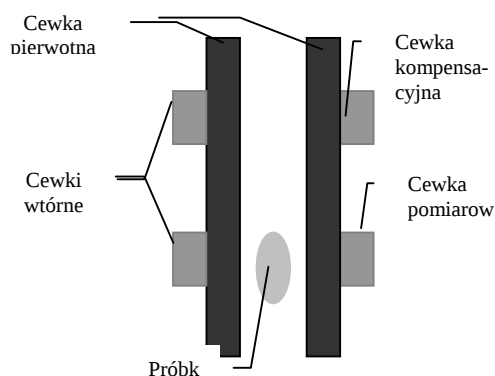
System firmy Oxford Instruments

Bardzo cenione są systemy pomiarowe MagLab^{Exa} i MagLab^{VSM} produkowane przez firmę Oxford Instruments. Są one przeznaczone m. in. do badań właściwości magnetycznych materiałów nadprzewodzących w funkcji temperatury oraz przyłożonego pola magnetycznego. Integracja z systemem komputera i oprogramowania pozwala na całkowitą automatyzację pomiaru.

System MagLab^{Exa} [12] służy do określenia kompletnej charakterystyki materiału. Dzięki uniwersalnej budowie dostosowanie systemu do pomiarów określonych właściwości sprowadza się do wymiany sondy pomiarowej i montażu próbki. W systemie zastosowano technikę cyfrowego przetwarzania sygnałów DSP. Dzięki systemowi kriogenicznemu zakres temperaturowy wynosi 1,5 ÷ 400 K o rozdzielczości rzędu mK w temperaturach poniżej 20 K. Magnes nadprzewodzący o dużej stabilności (10 ppm/°C) umożliwia pomiary w polach do 12 T.

Sonda przeznaczona do pomiarów podatności magnetycznej umożliwia pomiar w zmiennym polu magnetycznym. Czujnik indukcyjny złożony jest z cewki pierwotnej, przez którą przepływa prąd indukujący napięcie w dwóch cewkach wtórnych. Przy pustej sondzie napięcie na obu cewkach wtórnych jest dokładnie zrównoważone. W skład czujnika wchodzi także cewki równoważąca i pomiarowa. Schemat układu cewek czujnika

pomiarowego przedstawiono na rys. 6. Prąd płynący przez cewkę pierwotną indukuje napięcie w obu cewkach wtórnych. Jest ono zrównoważone w momencie, gdy do układu nie jest wprowadzona próbka. W chwili wprowadzenia próbki następuje zmiana impedancji jednej z cewek wtórnych, co rozrównoważa układ. Składowe podatności magnetycznej można wyznaczyć na podstawie pomiaru fazy napięcia zrównoważenia. Części rzeczywistą i urojoną podatności magnetycznej wyznacza się na podstawie pomiaru fazy napięcia. Sonda umożliwia pomiary w zakresie częstotliwości od 1 do 10000 Hz. Powtarzalność wyników wynosi ok. $\pm 0,5\%$. Budowa sondy ogranicza wymiary próbki do średnicy 5 mm.



Rys. 6. Schemat układu cewek w czujniku

System MagLab^{VSM} (Vibrating Sample Magnetometer) [13] wykorzystujący metodę wibrującej próbki jest wysokiej klasy systemem badawczym przeznaczonym głównie do pomiarów właściwości magnetycznych materiałów nadprzewodzących. Posiada konstrukcję analogiczną do systemu MagLab^{Exa} przy lepszych parametrach metrologicznych i rozszerzonych możliwościach pomiarowych. Konstrukcja sprzyja wyznaczaniu charakterystyk czasowych i magnetycznych o dużej częstotliwości próbkowania. Zastosowany elektromagnes wytwarza pole magnetyczne do 16 T. Układ kriogeniczny systemu umożliwia rozszerzenie zakresu temperatur do $1,5 \div 1000$ K.

System firmy Abbess Instruments

Firma *Abbess Instruments* produkuje system MPMS (Material Property Measurement System) [14] do pomiarów właściwości fizycznych materiałów nadprzewodzących. Umożliwia pomiar właściwości magnetycznych i elektrycznych próbki w przedziale temperatur $4 \div 925$ K przy kroku min. 0,5 K. Zaletą systemu jest krótki czas chłodzenia komory pomiarowej. System wykorzystuje susceptometr Zeamera-Faradaya. Elektromagnes wytwarza pole magnetyczne do 1,5 T. Podstawowym wyposażeniem jest magnes z regulowaną szczeliną w zakresie $0 \div 10$ cm przy odległości między cewkami 10 cm, wytwarzający jednorodne pole magnetyczne. System może mierzyć rezystancję rzędu $10^{-6} \Omega$ przy czułości o rząd mniejszej i dokładności 0,5%. System zasilania prądem quasi-zmiennym eliminuje efekty pojemnościowe i indukcyjne w próbce.

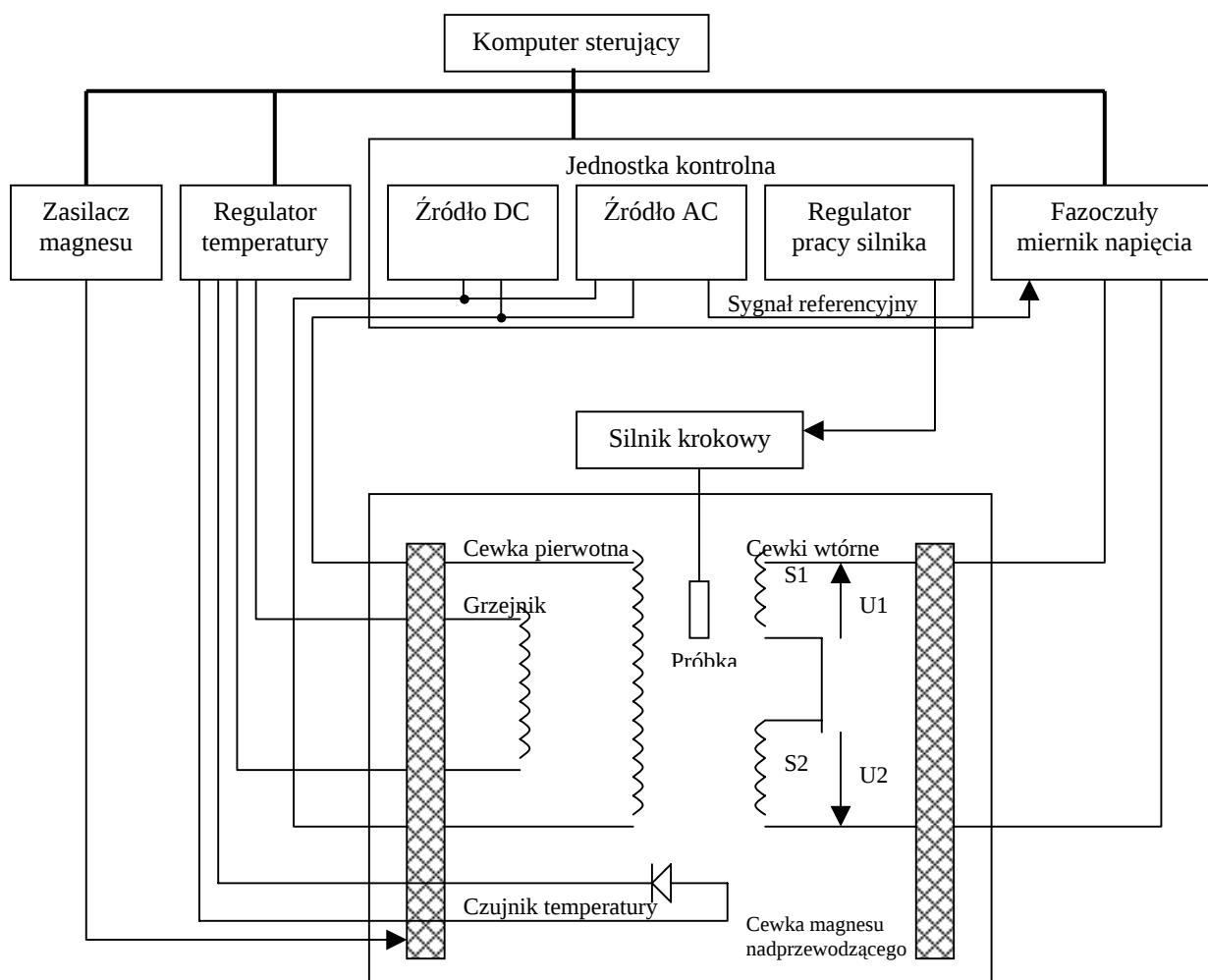
System firmy LakeShore

Susceptometry firmy *LakeShore* [15] są bardzo rozpowszechnione do pomiarów podatności magnetycznej. Pomiary odbywają się metodą różnicową, przez detekcję różnicy napięć z dwóch identycznych, przeciwnie nawiniętych cewek wtórnych znajdujących się wewnątrz cewki pierwotnej. Eliminuje to napięcie indukowane z zewnętrznych źródeł zakłócających. Napięcie offsetu związane z nieidentycznością cewek wynosi od ok. 1 μV przy niskich częstotliwościach do setek μV przy częstotliwości 1 kHz. Próbka umieszczana w cewkach przesuwana jest między nimi za pomocą silnika

krokowego. Sterowanie systemem oraz obróbkę danych pomiarowych za pomocą specjalnego oprogramowania zapewnia komputer firmy HP.

System umożliwia pomiary podatności magnetycznej nadprzewodników w funkcji temperatury od 1,3 K do 325 K. Dostępne częstotliwości pomiarowe mieszczą się w granicach $1 \div 10000$ Hz. Temperatura stabilizowana jest w kriostacie na poziomie $\pm 0,1$ K, natomiast niedokładność pomiaru temperatury wynosi 0,2 K lub 0,5%, w zależności od tego, która z wartości jest większa przy zerowym polu magnetycznym. Osiągnięto czułość rzędu 10^{-9} i dokładność $\pm 1\%$.

Możliwa jest rozbudowa systemu o opcje pomiaru kolejnych harmonicznnych podatności magnetycznej.



Rys. 7. Schemat blokowy systemu firmy LakeShore

System firmy Quantum Design

System pomiarowy PPMS (Physical Property Measurement System) firmy *Quantum Design* [16] oferuje m. in. możliwość pomiarów podatności magnetycznej próbek nadprzewodzących. Zintegrowany z systemem komputer wraz z oprogramowaniem pozwala na automatyzację procedury pomiarowej i obróbkę wyników. Architektura systemu umożliwia łatwe dostosowanie do indywidualnych potrzeb oraz instalację własnego oprogramowania.

System ACMS (AC measurement system) wykorzystuje metodę indukcyjności wzajemnej. Oprócz cewki pierwotnej i wtórnej w systemie zastosowano cewki kompensacyjne i kalibracyjne. Cewka detekcyjna jest gradiometrem I-go rzędu umożliwiającym pomiary gradientu pola magnetycznego niezależnie od poziomu pola zewnętrznego. Na zewnątrz podłużnie oddzielonych cewek detekcyjnych umieszczona jest cewka kompensacyjna ograniczająca pole do obszaru detekcji i redukująca szumy zewnętrzne. Cewka kalibracyjna umieszczona między dwiema cewkami detekcyjnymi zapewnia dokładną kalibrację fazy powodując poprawienie liniowości i czułości. Równocześnie odejmuje od uzyskanego sygnału przesunięcie fazy pochodzące od tła, które może mieć wpływ na wyniki pomiarów.

System umożliwia też pomiary małych próbek oraz cienkich warstw nadprzewodzących wykorzystując do pomiaru momentu magnetycznego mostek Wheatstone'a. System umożliwia pomiary przy częstotliwościach od 10 Hz do 10 kHz w zakresie temperaturowym $0,4 \div 400$ K. Pomiar temperatury odbywa się za pomocą czujników platynowych. Możliwy jest równoczesny pomiar parametrów trzech próbek.

4. Podsumowanie

Badania właściwości nadprzewodników za pośrednictwem pomiaru podatności magnetycznej są bardzo rozpowszechnione. Można badać właściwości nadprzewodników również innymi metodami, ale ta metoda pozwala badać materiały rozdrobione oraz dostarcza najwięcej informacji. Przedstawione systemy stanowią jedynie niewielką część znacznego dorobku naukowego w tej dziedzinie, ale prezentują najpopularniejsze stosowane rozwiązania konstrukcyjne. Wśród innych metod badań nadprzewodników można wymienić m. in. badania emisji akustycznej nadprzewodników w okolicy przejścia nadprzewodzącego, czy badania metodami elektrycznymi. Najlepiej rozwinięte i najczęściej stosowane są pomiary podatności magnetycznej metodami indukcyjnymi.

Literatura

- [1] Gomory F., *Characterization of HTS by ac susceptibility measurements*, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 10 (1997), p. 523.
- [2] Oleś A., *Metody doświadczalne fizyki ciała stałego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998.
- [3] Lisowski M., *Pomiary podatności magnetycznej nadprzewodników wysokotemperaturowych*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej*, Elektryka 26, 1991, s. 149.
- [4] Foner S., *Rev. Sci. Instr.*, vol. 30 (1959), No. 7, p. 548.
- [5] Gotszalk R., Lisowski M.: *Mutual inductance bridge for the measurement of superconducting transition temperatures and magnetic susceptibility*, *Rev. Sci. Instr.*, vol. 58 (1987), No. 9, p. 1771.

- [6] Maxwell E.: *Mutual inductance bridge for ac susceptibility measurements at low frequencies*, Rev. Sci. Instr., vol. 36 (1965), No. 4, p. 553.
- [7] Mosiądz M., *System do pomiaru właściwości elektrycznych i magnetycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych*, Praca dyplomowa wykonana w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [8] Lisowski M.: *Zmodyfikowany mostek Hartshorna do pomiarów indukcyjności wzajemnej w niskiej temperaturze*, Pomiar Automatyka Kontrola, vol. 10 (1996), s. 273
- [9] Bajpai A., Banerjee A.: *An automated susceptometer for the measurement of linear and nonlinear magnetic ac susceptibility*, Rev. Sci. Instr., vol. 68 (1997), No. 11, p. 4075.
- [10] de Souza R. R., Magon C. J., *A moving coil ac magnetic susceptometer*. Rev. Sci. Instr., vol. 69 (1998), No. 2, p. 431.
- [11] Vanderbemden Ph., *Design of an A.C. susceptometer based on a cryocooler*, Cryogenics, vol. 38 (1998), No. 8, p. 839.
- [12] Oxford Instruments: *MagLab^{Exa}*, Tubney Woods, Abingdon, Great Britain, 1998.
- [13] Oxford Instruments: *MagLab^{VSC}*, Tubney Woods, Abingdon, Great Britain, 1998.
- [14] Abbess Instruments Inc.: www.abbess.com.
- [15] LakeShore Cryotronics, Inc.: *LakeShore Magnetic Measurement Catalog*, Westerville, Ohio, USA, 1999.
- [16] Quantum Design: *PPMS – Physical Property Measurement System*. USA, 1999.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



**MODEL BEANA A KRYTYCZNA GĘSTOŚĆ PRĄDU
W MASYWNYM NADPRZEWODNIKU CERAMICZNYM**

Jan Leszczyński, Ewa Korzeniewska
*Politechnika Łódzka, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej,
Metrologii i Materiałoznawstwa,
Zakład Elektrotechnologii i Materiałoznawstwa*

Abstract

The critical current density is one of the most important application parameters of superconductors. The value j_c is usually calculated from the magnetizing measurements $M(H)$. The direct connection between the value $j=j_c$ and the external field H_a , which results from the Bean's model, is the basis for using this method. In this paper it is shown that this method is burdened with fundamental errors in the case of high-temperature superconductors. Among other things they result from the existence of two separate environments in bulk superconductors with different magnetic and transport properties. The paper presents two-environment model of bulk superconductor. The differences between the critical current density that is calculated from the magnetic measurements and the value of current density, which results from real conditions where the environment of weak junctions determines the transport current, are also pointed.

Słowa kluczowe: Nadprzewodnik, gęstość krytyczna prądu, model Beana, histereza magnetyczna.

1. Wstęp

Zasadnicze znaczenie krytycznej gęstości prądu nadprzewodników dla ich technicznych zastosowań powoduje, że parametrowi temu udzielana jest szczególna uwaga i poświęcone liczne badania i publikacje [1-5]. Wartość gęstości krytycznej prądu jest związana z podstawowymi zjawiskami występującymi w nadprzewodniku zarówno na poziomie molekularnym jak i makroskopowym i jest zależna od mechanizmów magnesowania i transportu oraz od parametrów materiałowych. Jedną z metod oceny wartości prądu krytycznego jest wykorzystanie relacji polowo-prądowych, które w ramach modelu stanu krytycznego wiążą bezpośrednio gęstość krytyczną prądu z namagnesowaniem nadprzewodnika (z jego momentem magnetycznym).

Model stan krytycznego opisuje rozkład gęstości strumienia magnetycznego w nadprzewodniku w założeniu, że zrównoważone są lokalnie siły pinningu i siły Lorentza, przy czym stan tej równowagi występuje w warunkach osiągnięcia przez lokalną gęstość prądu wartości krytycznej. Wzrost lub zmniejszanie zewnętrznego pola magnetycznego, związany jest z jego dyfuzją do wnętrza lub z wnętrza nadprzewodnika i ustaleniem się nowego stanu równowagi na granicy stabilności. Mechanizm penetracji pola jest więc uwarunkowany lokalnymi relacjami obu rodzajów sił, z których jedna - siła Lorentza jest wynikiem oddziaływania pola magnetycznego i ekranującego prądu, zaś druga-siła pinningu zależy głównie od głębokości energetycznej pułapki. W tak prostym opisie pomija się istniejące tu zawsze, wzajemne oddziaływanie wirów, które prowadzi do uśrednionej w pewnym obszarze reakcji sieci wirowej na zmiany pola zewnętrznego.

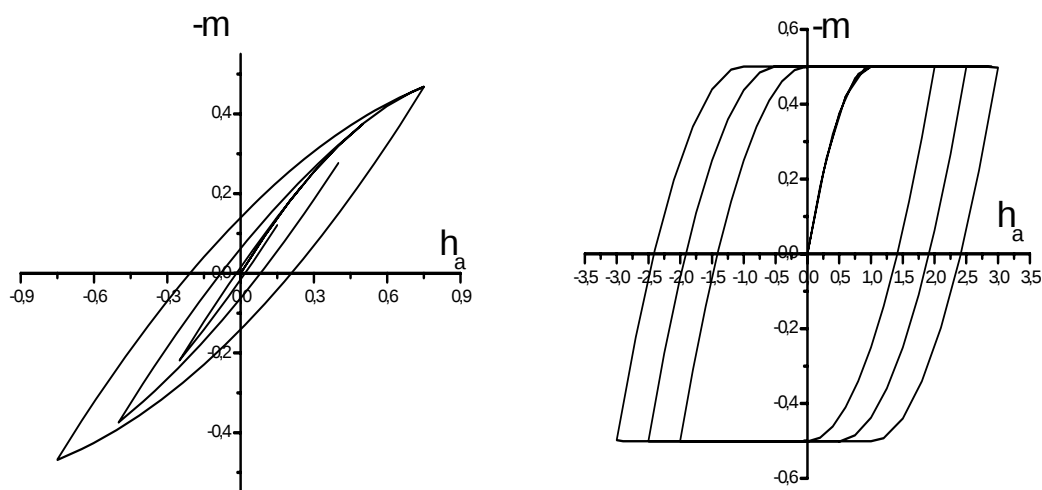
Omawiany model [1,2] zakłada istnienie optymalnego, możliwie silnego działania centrów pinningu, których siła reakcji $F_p = j_c B$, równoważy w każdym punkcie nadprzewodnika, na możliwie najwyższym poziomie ($j = j_c$) siłę dyfuzji pola zewnętrznego.

Należy podkreślić, że nie są znane wartości wielkości wchodzących w skład równania lokalnej równowagi $F_p = F_L$ i rozwiązanie tego równania zmierzające do wyznaczenia profilu $F_p(x)$, $B(x)$ czy też $j(x)$ wymaga założenia rozkładu przynajmniej jednej z tych wielkości. Przyjęcie przez Beana warunku $j_c(x) = \text{const}$ jest założeniem prowadzącym do bardzo prostych zależności analitycznych, jednakże jest to założenie arbitralne nie mające uzasadnienia fizycznego i oparcia w eksperymentach. Należy jednak podkreślić, że założenie to i wynikające z niego przybliżenia, nie zmieniają podstaw i generalnych treści opisu mechanizmu wnikania pola do nadprzewodnika. Zarówno model stanu krytycznego w ujęciu Beana, jak i wiele innych prób powiązania lokalnych wartości $j_c(x)$ i pola magnetycznego $H(x)$ [3,4,5], nie zmieniają istoty tego opisu, lecz prowadzą tylko do nieco innych zależności analitycznych, które i tak z uwagi na uproszczony, fenomenologiczny charakter rozważań mają jedynie znaczenie ilościowe.

Z analizy modelu stanu krytycznego w ujęciu Beana tj. przy założeniu stałej wartości lokalnej gęstości krytycznej $j_c(x) = \text{const}$. wynika, że istnieje związek pomiędzy przyrostem momentu magnetycznego ΔM w układzie $M(H)$, a gęstością j_c . Związek ten ma charakter przybliżony, jednakże tym dokładniejszy im większy jest zakres wartości pola magnetycznego stosowany w eksperymencie. Zasada odpowiedniości ΔM i j_c wynika z liniowości opisu profilu pola magnetycznego $H(x)$ przy $j_c(x) = \text{const}$. Można bowiem łatwo wykazać, że w tym przypadku uzyskuje się w warunkach pola równoległego do nadprzewodzącej płyty o szerokości $2a$, w warunkach pełnej penetracji pola tj. przy $(H_a > H^*)$, zależność $M^+ = 0,5aj_c$ dla $H_a > 0$ oraz $M^- = -0,5aj_c$ dla $H_a < 0$. Prowadzi to do związku $\Delta M = M^+ - M^- = aj_c$. Na rys.1 przedstawiono w systemie wielkości względnych, obliczeniowe charakterystyki $m(h)$ dla stanu krytycznego, dla słabych pól magnetycznych ($|h_a| < h^*$) i dla pól silnych ($|h_a| > h^*$), wyznaczone wg modelu Beana. Oznaczono tu przez $h_a = H_a/H_m$, $x = X/a$, $h^* = H^*/H_m = j_c$, $m = M/H_m$, gdzie H_a -natężenie pola zewnętrznego, H_m -maksymalna wartość natężenia pola zewnętrznego, H^* -natężenie pola pełnej penetracji, M -namagnesowanie (moment magnetyczny).

Przebieg charakterystyk potwierdza możliwość wyznaczania gęstości krytycznej prądu na podstawie przebiegu $m(h)$, co jest aktualnie podstawą stosowanych metod pomiarowych opartych na badaniach magnetycznych. Należy podkreślić, że przedstawiony dowód i jego

konsekwencje mają w odniesieniu do HTS tylko wartość hipotetyczną, bowiem ilustrują potencjalne możliwości modelu w odniesieniu do jednorodnego i stabilnego pod względem magnetycznym środowiska. Warunki takie w HTS nie są spełnione i w związku z tym w przypadku nadprzewodników HTS metoda określania gęstości krytycznej prądu na podstawie przebiegu pętli histerezy $B(H)$ lub $M(H)$ jest niewłaściwa. Bezpośrednią konsekwencją tej tezy jest pogląd o braku w HTS bezpośrednich, jednoznacznych związków pomiędzy cechami magnetycznymi nadprzewodzącej próbki, a jej zdolnościami transportowymi.



Rys. 1. Pętla histerezy $m(h)$ wg modelu Beana: a) zakres słabych pól; $h_a < h^*$, $h^* = j_c = 1$, $h_m = 0 \div 0,75$
b) zakres silnych pól; $h_a > h^*$, $h^* = j_c = 1$, $h_m = 1 \div 3$, m i h_a w jednostkach względnych

Pętla histerezy magnetycznej w ujęciu inżynierskim $B(H)$ przedstawia informacje o strumieniu magnetycznym „zamrożonym” w próbce w procesie jej przemagnesowania. Udział w tym mechanizmie mają wszystkie fragmenty próbki o właściwościach nadprzewodzących. Należą do nich zarówno ziarna o silnych właściwościach nadprzewodzących ($j_{cg} \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$), jak i słabe złącza międzyziarnowe ($j_{cj} \sim 10^3 \text{ A/cm}^2$).

Również sygnał magnetyczny dają wszystkie istniejące mikrotory prądowe, skojarzone z lokalnymi defektami spełniającymi funkcję „pierścieni”, w których jest okresowo - przy zmiennym w czasie polu zewnętrznym - pułapowany strumień magnetyczny. Ekranowanie przestrzeni „wolnych” w nadprzewodniku występuje w zakresie względnie słabych pól magnetycznych, w których o penetracji pola do wnętrza tej przestrzeni decydują prądy ekranujące tj. lokalne bariery Meissnera. Zjawisko takie występować może w centralnej części próbki również po przekroczeniu pola pełnej penetracji, gdyż pole w tym obszarze, osłabione przez ekranujące działanie obszarów zewnętrznych w stosunku do omawianej przestrzeni, jest słabsze niż lokalna bariera H_{c1} . W rezultacie takiego ekranowania „puste obszary” dają sygnał magnetyczny analogiczny do idealnego nadprzewodnika fałszując przez to rzeczywisty obraz cech magnetycznych próbki. Jest to zjawisko analogiczne do obserwowanego w badaniach magnetycznych

wydrążonego cylindra, który przy względnie słabych polach magnetycznych imituje cylinder pełny. Takie obserwacje wskazują na potrzebę prowadzenia badań próbek we względnie silnych polach zewnętrznych, w których lokalne defekty wypełnione strumieniem magnetycznym są odczytywane jako obszary niemagnetyczne. Reasumując należy stwierdzić, że pętla histerezy $b(h)$ jest zintegrowaną odpowiedzią magnetyczną próbki na oddziaływanie zewnętrzne. W odpowiedzi tej biorą udział wszystkie objętościowe obszary o właściwościach nadprzewodzących rzeczywistych lub maskowanych przez prądy ekranujące.

Porównując właściwości transportowe i magnetyczne nadprzewodników należy rozróżnić odmiennosć cech transportowych nadprzewodników klasycznych i wysokotemperaturowych. W pierwszych z nich, z uwagi na monolityczną strukturę, brak defektów makroskopowych w postaci pustych przestrzeni, odpowiedź magnetyczna może być z dużą dokładnością utożsamiana z odpowiedzią elektryczną dotyczącą prądu transportu. Droga tego prądu obejmuje tu całą próbkę tj. tę samą objętość, która uczestniczy w zjawiskach magnetycznych. W nadprzewodnikach wysokotemperaturowych poza omawianymi wyżej przyczynami ukrywania struktury magnetycznej przez prądy ekranujące, występuje zasadnicza dla transportu, perkolacja toru prądowego [7,8]. Tor ten rozgałęzia się na liczne nitki prądowe przebiegające poprzez słabe złącza w sposób określony przez zasadę minimalizacji rozproszenia. Z tego powodu tor prądowy jest związany tylko z pewną częścią objętości próbki, znacznie mniejszą niż ta, która uczestniczy w „odpowiedzi” magnetycznej w ramach eksperymentów magnesowania.

W dalszym ciągu ograniczymy się tylko do uzasadnienia na podstawie obliczeniowego modelu nadprzewodnika granulowanego (dwuśrodowiskowego) faktu istnienia rozbieżności pomiędzy wartościami gęstości krytycznej prądu odczytywanymi z charakterystyki magnesowania próbki, a bliższymi rzeczywistości wartościami odpowiadającymi środowisku słabych złączy [9].

2. Model

Do rozważań przyjęto prosty model nadprzewodnika w postaci struktury dwu - środowiskowej tj. środowiska słabych złączy międzyziarnowych (międzygranularnych) - środowiska SZ i środowiska ziaren (granul) - środowisko SG. Założono przy tym, że pole magnetyczne zewnętrzne H_a (h_a) skierowane wzdłuż osi z równoległej do płaskiej płytki o szerokości $2a$, nieskończenie długiej, ma w środowisku SZ wzdłuż współrzędnej x rozkład określony przez równanie stanu krytycznego z warunkiem $j_c = \text{const}$. Reakcja magnetyczna środowiska SZ w postaci magnetyzacji M_J (m_J) daje w rezultacie w środowisku SZ lokalną indukcję, zależną od pola zewnętrznego h_a

$$b_J(x, h_a) \equiv h_a + m_J(x, h_a) \quad (1)$$

oraz indukcję średnią

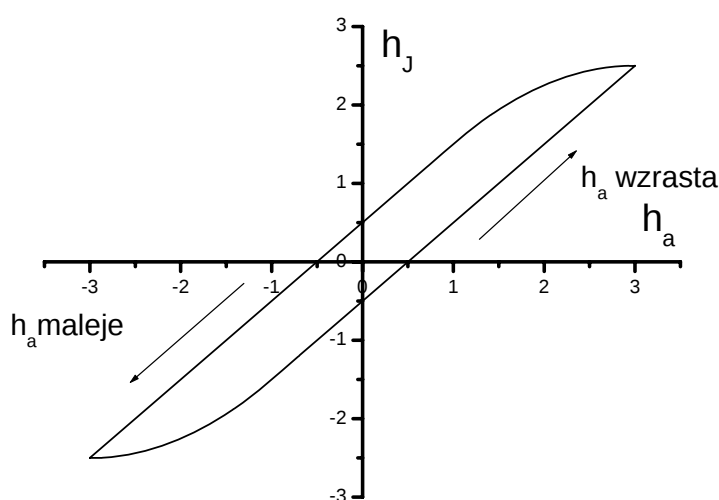
$$b_J(h_a) \equiv h_a + \frac{1}{a} \int_0^a m_J(x, h_a) dx \quad (2)$$

Ziarna „zanurzone” w środowisku złączy podlegają w tej sytuacji oddziaływaniu osłabionego przez reakcję tego środowiska, pola o natężeniu zależnym od lokalizacji ziarna. Zamiast szczegółowego opisu penetracji ziaren z uwzględnieniem ich położenia w środowisku słabych złączy, przyjęto uproszczony opis przyjmujący, iż wszystkie ziarna

znajdują się w polu zewnętrznym H_a , osłabionym przez uśrednioną reakcję magnetyczną środowiska SZ tj. w polu o natężeniu

$$h_J(h_a) = \frac{1}{a} \int_0^a h_J(x, h_a) dx = h_a + \frac{1}{a} \int_0^a m_J(x, h_a) dx \quad (3)$$

Na rys. 1 przedstawiono zależność natężenia pola działającego na ziarna h_J (środowisko ziaren) od pola zewnętrznego h_a tj. charakterystykę magnesowania środowiska SZ w układzie współrzędnych $h_J(h_a)$.



Rys.1. Zależność natężenia pola h_J działającego na środowisko SG w zależności od natężenia pola zewnętrznego h_a dla $h_m \gg h^*$ (h_m - amplituda pola zewnętrznego, h^* pole pełnej penetracji SZ).

Lokalna indukcja w ziarnach jest w tej sytuacji równa

$$b_g(x, h_a) \equiv h_J(h_a) + m_G(x, h_a) \quad (4)$$

natomiast indukcja średnia

$$b_G(h_a) = h_J(h_a) + \frac{1}{a} \int_0^a m_J(x, h_a) dx \quad (5)$$

Uwzględnienie obu środowisk wraz z ich przestrzennym udziałem tj. udziałem objętościowym ziaren - α i udziałem środowiska złączy - $(1-\alpha)$, prowadzi do zależności opisującej indukcję w próbce

$$b(h_a) = (1-\alpha)b_J(h_a) + \alpha b_G(h_a) \quad (6)$$

$$b(h_a) \equiv \frac{1-\alpha}{a} \int_0^a (h_a + m_J(x, h_a)) dx + \frac{\alpha}{a^2} \int_0^a \left(\int_0^a h_J(x, h_a) dx \right) + m_J(x, h_a) dx \quad (7)$$

Odpowiednia zależność dla magnetyzacji wynika z wzoru

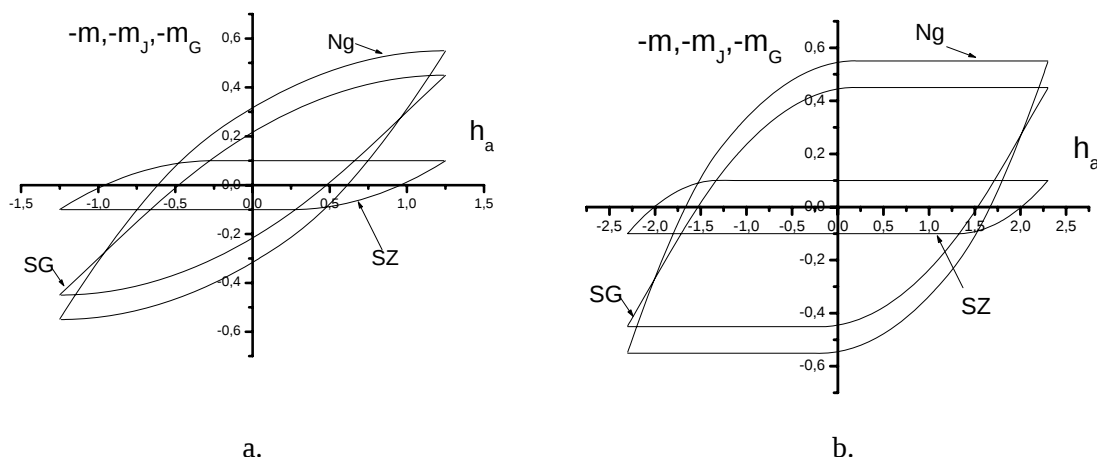
$$m(h_a) = b(h_a) - h_a \quad (8)$$

W modelu nie uwzględniono obecności barier powierzchniowych b_{c1J} i b_{c1G} obu środowisk.

3. Wyniki analizy

Na rys. 2 przedstawiono charakterystyki nadprzewodnika (N_g) dla wartości natężenia pola zewnętrznego h_a zmieniającego się w granicach $h_m = \pm 1,25$ (rys.2a) i $h_m = \pm 2,5$ (rys.2b), dla $j_{cG}=1$. Natężenie pola $h_m=1,25$ (rys.2a) jest ponad dwukrotnie większe niż pole pełnej penetracji $h^*=0,5$, co powoduje „płaski” przebieg charakterystyki magnesowania środowiska SZ. Natężenie pola h_j magnesującego środowisko ziaren jest tu znacznie mniejsze niż pole pełnej penetracji ziaren. Charakterystyka magnesowania $m_G(h_a)$ dla środowiska SG ma tu zatem przebieg wskazujący na duży „dystans” od stanu nasycenia magnetycznego. Wypadkowa charakterystyka nadprzewodnika uwzględniająca oba środowiska z uwzględnieniem założonych proporcji objętościowych ($\alpha=0,6$) odpowiednio do przedstawionego modelu jest „podobna” do charakterystyki środowiska ziaren. Wskazuje to na istotną rolę tego środowiska w formowaniu odpowiedzi magnetycznej próbki w polu magnetycznym stosunkowo silnym z punktu widzenia magnesowania środowiska słabych złączy. W rezultacie zwiększenia wartości h_m do wartości $h_m=\pm 2,5$ (rys.2b) występuje wyraźne wnikanie pola magnetycznego do środowiska granul. Charakterystyka magnesowania $m(h_a)$ odtwarza w zasadzie kształt charakterystyki magnesowania ziaren, które nadal zachowują zasadniczą rolę w kształtowaniu wizerunku magnetycznego nadprzewodnika.

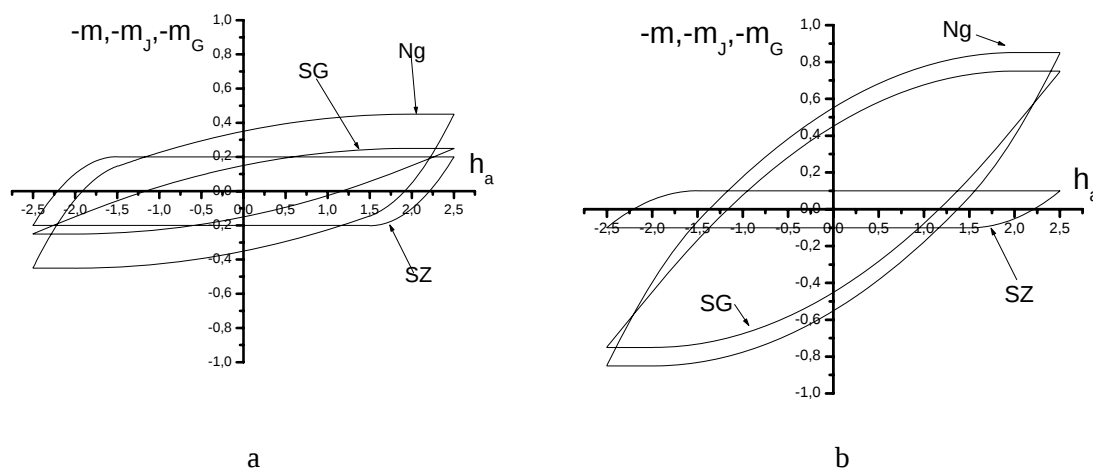
Na rys. 3 pokazano obliczeniowe charakterystyki magnesowania obu środowisk nadprzewodnika granulowanego w polu magnetycznym o wartości zmieniającej się w granicach $\pm h_m$ ($h_m=2,5$), ilustrujące wpływ objętości środowiska ziaren (SG). Przy stosunkowo małym udziale objętości tego środowiska $\alpha=0,2$, znacznie mniejszym, niż to wynika z danych doświadczalnych (rys.2a), oddziaływanie tego środowiska jest względnie małe, mimo dużej wartości $h_m \gg h_j^*$.



Rys.2 Charakterystyki magnesowania nadprzewodnika granulowanego; SZ-środowisko złączy, SG-środowisko granul, N_g -nadprzewodnik granulowany, $j_{cJ}=0,5$, $j_{cG}=1$, $\alpha=0,6$, $h_m = 1,25$ (a), $h_m=2,30$ (b).

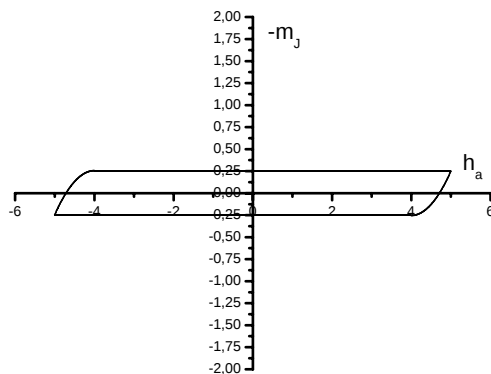
Na rys.4 przedstawiono obliczeniowe charakterystyki magnesowania nadprzewodnika będące ilustracją oceny wartości krytycznych prądu wyznaczanych na podstawie przebiegu

charakterystyki magnesowania. W celu uzyskania wiarygodnych wyników przyjęto szeroki zakres zmian wartości pola zewnętrznego $h_m = \pm 5$. W celu ograniczenia wyników do zakresu częściowej tylko penetracji pola do środowiska SG, założono istnienie w granulach silnego nadprzewodnictwa zobrazonego przez dużą wartość gradientu natężenia pola w ziarnie $j_{cG} = 4j_{cJ}$. Na kolejnych rysunkach pokazano charakterystyki magnesowania środowiska SZ - rys.4a, środowiska SG - rys.4b oraz nadprzewodnika - rys. 4c. Na rys. 4a i 4b nie uwzględniano udziału objętościowego α , przyjmując, że każde ze środowisk zajmuje całą przestrzeń próbki. Udział ten uwzględniono na rys.4c, na którym przedstawiono charakterystykę obu współdziałających środowisk.

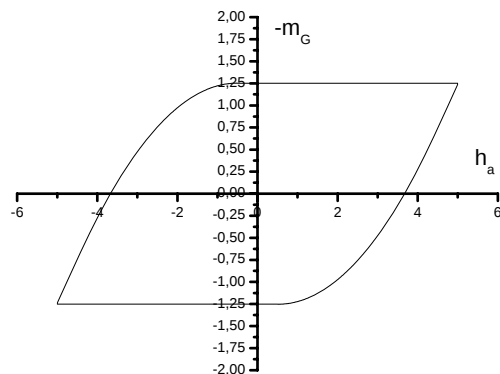


Rys.3 Charakterystyki magnesowania $m(h_a)$ nadprzewodnika granulowanego; SZ - środowisko łączy, SG - środowisko granul, Ng-nadprzewodnik granulowany, $h_m = 2.5$; $j_{cJ} = 0.5$; $j_{cG} = 2$; $\alpha = 0.2$ (a); $\alpha = 0.6$ (b).

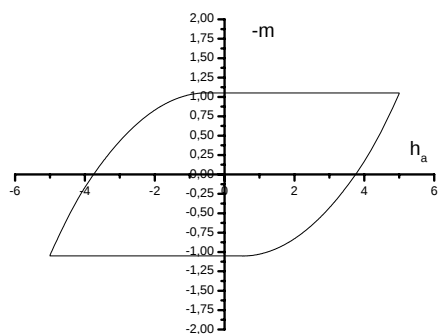
Jest to charakterystyka, która odpowiada mierzonej w ramach pomiarów magnetycznych, wypadkowej charakterystyce próbki. Przypadek zilustrowany przykładowo na rysunkach, stanowi typowy obraz magnesowania w ramach założonego modelu. Z rys.4c wynika, że wartość j_c odczytywana z wyników eksperymentalnych, które odpowiadają magnesowaniu łącznemu obu środowisk, jest w przyjętych warunkach ($h_m = 5$, $j_{cJ} = 0.5$, $j_{cG} = 2$, $\alpha = 0.8$) równa $\Delta m = j_c = 2.10$. W odróżnieniu od tej wartości, wartość krytyczna j_c związana z prądem transportu, a więc odpowiadająca magnesowaniu środowiska SZ (rys.4a) jest równa tylko $j_c = j_{cJ} = 0.52$, a więc jest około cztery razy mniejsza. Podana relacja dotycząca gęstości krytycznych przenosi się znacznie mocniej na relację dotyczącą prądów krytycznych, bowiem w tym przypadku należy uwzględnić niekorzystne dla prądu transportu proporcje objętościowe. Przyjmując chwilowo, iż dotyczą one tylko założonej wartości $\alpha = 0.8$ otrzymujemy relację prądu krytycznego wyznaczonego z pomiarów magnetycznych do prądu krytycznego odpowiadającego eksperymentom transportowym jak $j_c = 2.10$ do $j_{cJ} = 0.10$ (rys.5) tj. ok. 21.



a.



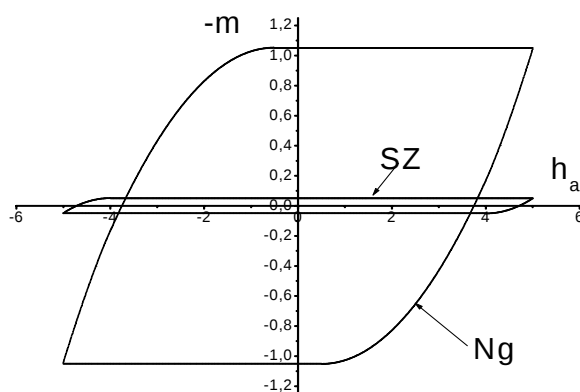
b.



c.

Rys.4 Charakterystyki magnesowania $m(h_a)$ środowiska słabych złączy (2a), granul (2b) i nadprzewodnika granulowanego (2c), $h_m=5$, $j_{cJ}=0,5$, $j_{cG}=2$, $\alpha=0,8$.

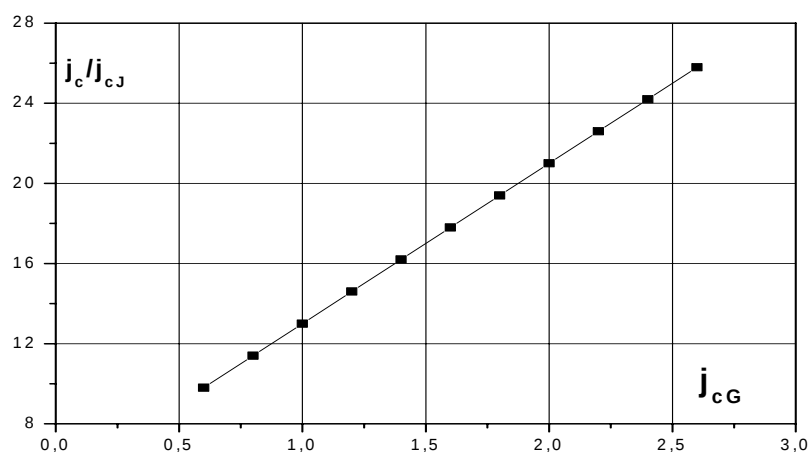
Odpowiednią charakterystykę z uwzględnieniem relacji objętościowych określonych przez współczynnik α ($\alpha=0,8$) pokazuje rys.5



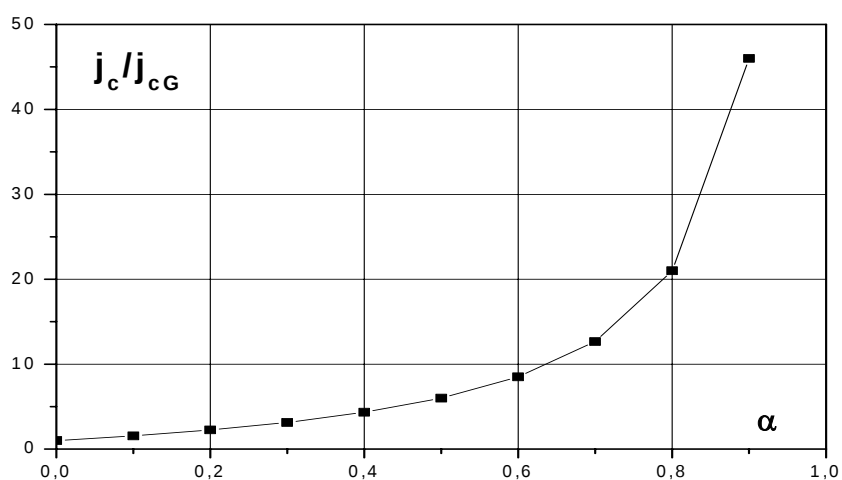
Rys.5 Charakterystyki magnesowania środowiska słabych złączy (wąska pętla histerezy-SZ) i nadprzewodnika granulowanego (SG) dla $h_m = 5$, $j_{cJ} = 0.5$, $j_{cG} = 2$, $\alpha = 0.8$.

Na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono odpowiednio, zależność $j_c/j_{cJ} = f(j_{cG})$ i zależność $j_c/j_{cJ} = f(\alpha)$.

Należy podkreślić, że omawiana w niniejszej publikacji przyczyna rozbieżności pomiędzy wyznaczaną z pomiarów magnetycznych gęstości krytycznej prądu, a wartościami rzeczywistymi ma znaczenie znacznie większe, niż opisywane w wielu publikacjach różnice wynikające z niedokładności stosowanego modelu obliczeniowego. Przykładem takiego właśnie podejścia do problemu rozbieżności jest przedstawiona przez A.Sancheza i C.Navau analiza obliczeniowa magnesowania nadprzewodnika cylindrycznego w polu magnetycznym równoległym do krawędzi, w której uwzględniono pomijane uprzednio zjawiska związane ze skończoną długością próbki. Wnoszone z tego tytułu poprawki dotyczące gęstości prądu krytycznego, sięgają zaledwie kilku procent i maleją praktycznie do zera w silnych zewnętrznych polach magnetycznych $h_a/h^* \sim 2$.



Rys. 6 Zależność od j_{cG} , stosunku gęstości krytycznej prądu próbki nadprzewodnika wyznaczonej z pomiarów magnetycznych j_c , do gęstości krytycznej środowiska słabych złączy j_{cJ} , dla $h_m=5$, $j_{cJ}=0,5$ oraz $\alpha=0,8$.



Rys. 7 Zależność od udziału objętościowego ziaren α , stosunku gęstości krytycznej prądu próbki nadprzewodnika wyznaczonej z pomiarów magnetycznych j_c , do gęstości krytycznej środowiska słabych złączy j_{cJ} , dla $h_m=5$, $j_{cJ}=0,5$ oraz $j_{cG}=2$.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono uproszczony model nadprzewodnika z uwzględnieniem obecności dwóch nadprzewodzących środowisk; słabych złączy międzyziarnowych i silnie nadprzewodzących ziaren. Wykazano, że wartość gęstości krytycznej prądu wyznaczana na podstawie pomiarów magnetycznych, w których bada się ogólną odpowiedź magnetyczną nadprzewodzącej próbki, prowadzi do znacznie zawyżonych wartości. Przyczyną istniejących różnic jest utożsamianie odpowiedzi magnetycznej wynikającej prądów ekranujących wszystkie elementy struktury nadprzewodnika z właściwościami dotyczącymi prądu transportu, które w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych mają charakter szczególny. Są one związane z granulowaną strukturą nadprzewodników, w której rolę przenoszenia prądu transportu przejmuje środowisko międzyziarnowe zawierające słabe połączenia typu złączy Josephsona. Przeprowadzona analiza dotycząca tego zagadnienia, mimo daleko posuniętych uproszczeń i wyodrębnienia tego problemu z ogólnego, złożonego obrazu wielu zjawisk związanych z transportem, prowadzi do oczywistego wniosku o nieadekwatności pomiarów magnetycznych i transportowych. Pogląd ten mimo oczywistych dowodów w postaci dużych różnic pomiędzy wynikami pomiarów magnetycznych wskazujących na gęstości krytyczne rzędu 10^6 A/cm², a wynikami pomiarów bezpośrednich, w których otrzymuje się wartości rzędu 10^3 A/cm², z trudem jest akceptowany przez środowisko fizyków.

Rzeczywista wartość prądu transportu próbek nadprzewodników masywnych HTS jest znacznie mniejsza, niż to wynika z przedstawionych zależności. Jest to konsekwencją wspomnianego we wstępie perkolacyjnego charakteru torów prądowych oraz silnej zależności prądów krytycznych słabych złączy od pola magnetycznego, co nie zostało w prezentowanym modelu uwzględnione. Pewne znaczenie dla omawianego zagadnienia ma również silne zjawisko TAFF, występujące w HTS.

Literatura

- [1] C.P.Bean, "Magnetization of hard superconductors", *Phys.Rev.Lett.* vol.8 (1962) pp. 250-252
- [2] C.P.Bean, "Magnetization of high-field superconductors" *Rev.Mod.Phys.* vol.36 (1964) pp. 31-39
- [3] Y.B.Kim, C.F. Hempstead, A.R. Strand, "Critical persistent currents in hard superconductors" *Phys.Rev.Lett.* vol.9 (1962) pp. 306- 309
- [4] Y.B.Kim, C.F. Hempstead, A.R. Strand, "Magnetization and critical supercurrents" *Phys.Rev.* vol.129 (1963) pp. 528-535
- [5] P.W.Anderson. "Theory of flux creep in hard superconductors" *Phys.Rv.Lett* vol.9 (1962) pp.309-311
- [6] J.Leszczynski, J.Jackiewicz, "The superconducting rings model-percolative character of the transport current in granulated high- T_c superconductors". *Superconductor Science & Technology*, vol.5, no.1S, Jan. 1992, pp. 387-90.
- [7] J.Leszczynski, J.Jackiewicz. "The influence of additional pinning centers on the critical current in weakly coupled percolative structures", *World Sci. Publ. Co, Progr. in High-Tc Supercond.*, vol.30, (1992), pp. 284-290
- [8] Fukami T., "Hysteresis and voltage jumps of transport phenomena due to weak links in high- T_c superconductors", *Physica B* vol. 239 (1997) pp. 157-162
- [9] Sanchez A., Navau C. "Critical-current density from magnetisation loops of finite high- T_c superconductors", *Supercond. Sci. Technol.* vol.14 (2001) pp. 444-447

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



MODYFIKACJA MODELU STANU KRYTYCZNEGO
NADPRZEWODNIKA WYSOKOTEMPERATUROWEGO

Jan Leszczyński, Ewa Korzeniewska

Politechnika Łódzka, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej, Metrologii i
Materiałoznawstwa,
Zakład Elektrotechnologii i Materiałoznawstwa

Abstract

The model of critical state is one of the basic describing methods and analysis of macroscopic superconductor properties. Apart from Bean's model, in which $j_c(x)=const$, different models are used (Kim's, Dersch's and Blatter's, Fietz's and other models), in which the critical current density is dependent on local value of magnetic field strength $j(H(x))$. In this paper the proposal of the model is presented. In this model the constant value of critical current density along the coordinate is assumed. Dependence of the critical current density on external magnetic field is brought into the model and the results of experiments, which have been done so far, are taken into consideration. This simplified model keeps all virtues of Bean's model and in the same time it allows for analysing the influence of external field on j_c . The computational results point at rather good conformity of this model with the nature of experimental relationships.

Słowa kluczowe: Nadprzewodnik, prąd krytyczny, model Beana, histereza magnetyczna,

1. Wstęp

Model stanu krytycznego [1,2,3,4,5] opisuje metastabilną dystrybucję gęstości strumienia w nadprzewodniku II rodzaju, w którym występuje graniczna równowaga sił wynikających z „ciśnienia” strumienia magnetycznego i sił zapuławkowania wirowych linii pola (sił pinningu). Mechanizm dyfuzji pola magnetycznego wymusza tu optymalny stan równowagi charakteryzujący się zrównaniem sił Lorenza i sił pinningu w każdym punkcie nadprzewodnika, na najwyższym możliwym poziomie $j=j_c$ tj. przy wykorzystaniu pełnych możliwości pinningu uśrednionego. Jest to więc w pewnym sensie naturalny, samoorganizujący się stan, stabilizujący się na granicy niestabilności. Model stanu krytycznego jest więc fizycznie uzasadniony w ramach założenia $j=j_c$ w każdym punkcie nadprzewodnika w którym $H>0$.

Z równań opisujących stan krytyczny, a mianowicie

$$F_p = j_c \cdot B \quad (1)$$

oraz

$$\text{rot} H = j_c \quad (2)$$

wynika

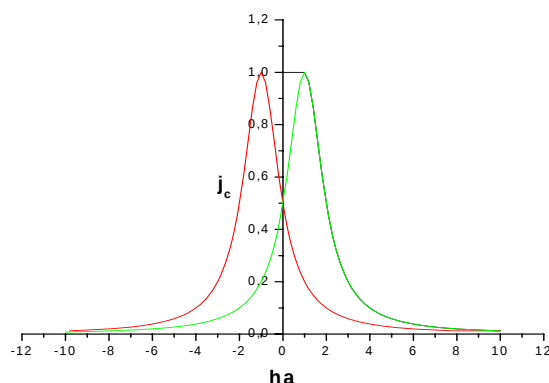
$$\text{rot} H = F_p / B \quad (3)$$

co pozwala na wyznaczanie rozkładu przestrzennego $H(x,y,z)$ i $j_c(x,y,z)$ gdy znany jest rozkład $F_p(x,y,z)$. Założenie Beana [1,2] o stałej wartości j_c znacznie upraszcza otrzymywane wyrażenie i analizę, ma jednakże charakter założenia arbitralnego w małym tylko stopniu opartego na doświadczeniach. W rezultacie, charakterystyki magnesowania $B(H)$ oraz $M(H)$ oparte na tym modelu, różnią się od otrzymywanych eksperymentalnie ukrywając istotne, specyficzne właściwości nadprzewodnika w polu magnetycznym. Zagadnienie to jest szczególnie ważne z uwagi na fakt, iż z modelu Beana wynika istotna, dla oceny jakości nadprzewodnika, zależność gęstości prądu krytycznego od zmian namagnesowania ($\Delta M \sim j_c$) w polach zewnętrznych H_a o wartościach większych od pola pełnej penetracji H^* . Model Beana opracowany w odniesieniu do nadprzewodników klasycznych II rodzaju w przypadku nadprzewodników wysokotemperaturowych wymaga znacznych modyfikacji. Wynikają one między innymi z konieczności uwzględnienia obecności w HTS dwóch środowisk o odmiennych właściwościach nadprzewodzących; silnie nadprzewodzących ziaren i słabo nadprzewodzących obszarów międzyziarnowych [6, 7]. Ukazują one w pomiarach magnetyzacji istnienie nakładających się, wysoko- i niskopolowej pętli histerezy magnetycznej [8]. Ponadto model nie uwzględnia istotnego oddziaływania pola magnetycznego na wartość gęstości krytycznej prądu, która w HTS maleje wraz ze wzrostem H z uwagi na stopniowe wyłączanie z procesu przewodzenia, słabych złączy międzyziarnowych. Dodatkowym zjawiskiem, które powinno być zauważane przez model stanu krytycznego, jest proces transportu ponadbarierowego wirów pola magnetycznego [9] spowodowanej procesami termicznej aktywacji (TAFF), które w HTS odgrywają bardziej znaczącą rolę, niż w nadprzewodnikach klasycznych z uwagi na mniejszą wysokość bariery potencjału oddzielającej centra pinningu i wyższą temperaturę środowiska. W niniejszym artykule ograniczono się tylko do przedstawienia drugiego ze wspomnianych zagadnień, a mianowicie do propozycji modyfikacji modelu Beana przez uwzględnienie w modelu specyficznej formy zależności polowej gęstości prądu krytycznego.

2. Opis modelu

Przenoszenie prądu w HTS odbywa się za pośrednictwem ścieżek prądowych, wielokrotnie rozgałęzionych, których ukształtowanie podlega zasadzie minimalizacji rozpraszania energii. W ramy tych ścieżek wbudowane są w sposób naturalny słabe połączenia międzyziarnowe mające cechy złączy Josephsona. Charakteryzują się one dużą wrażliwością gęstości krytycznej prądu złącza j_{cj} na pole magnetyczne. W rezultacie oddziaływania pola, perkolacyjny tor prądowy w HTS składający się z „nitek” prądowych zamykających się poprzez złącza i ziarna, ulega wraz ze wzrostem wartości pola magnetycznego, stopniowej degradacji z uwagi na wychodzenie ze stanu nadprzewodnictwa złączy o mniejszych prądach krytycznych. Konsekwencją tego procesu,

towarzyszącego wnikanu pola magnetycznego w głąb nadprzewodnika, jest zmniejszanie wartości krytycznej prądu lokalnego tj. zmniejszanie wartości lokalnej gęstości krytycznej. Efekt tego zjawiska jest widoczny na charakterystykach $I_c(H)$ (rys.1), które poza wyraźną, hiperboliczną zależnością $I_c(H)$, wykazują ponadto swoistą histerezę [8-10], spowodowaną – jak się przypuszcza, zjawiskami nieodwracalnymi występującymi w słabych złączach międzyziarnowych (rys.1).



Rys.1 Zależność krytycznej wartości prądu od natężenia pola zewnętrznego nadprzewodnika ziarnistego w modelu „nadprzewodzących pierścieni”[10] (jednostki względne).

$j(B) = j_c$	Bean	1962, 1964
$j(B) = \frac{j_c}{1 + B(x) /B_a}$	Kim	1962, 1963
$j(B) = j_c \exp[- B(x) /B_a]$	Fietz i inni	1964
$j(B) = a_1 \exp\left(-\frac{ H }{a_2}\right) \alpha$	Karasik i inni	1964
$j(B) = K H^q $	Grenn, Hlawiczka	1967
$j(B) = j_c - j'_c B(x) /B_a$	Watson	1968
$j(B) = j_c (1 - B(x) /B_a) \theta(B_a - B(x))$	Dersch i Blatter	1988
$j(B) = \frac{j_c}{ B(x)/B_a }$	Ji i inni	1989
$j(B) = \frac{j_c}{[1 + B(x) /B_a]^\beta}$	Lamm, Xu i inni	1990
$j(B) = \frac{j_c}{ B(x)/B_a ^{1/2}}$	Le Blanc i Le Blanc	1992
$j(B) = \frac{j_c}{1 + [B(x) /B_a]^2}$	Leta i inni	1992

Tab.1. Przykładowe modele stanu krytycznego

Zależność polowa $j_c(h_a)$, bez uwzględniania zjawisk histerezowych- znalazła swoje odbicie w wielu opracowanych modelach stanu krytycznego, a między innymi w modelu Kima [3,4], modelu stałego pinningu (Le Blanc i Le Blanc) i w innych [tab.1].

Cechą wszystkich proponowanych rozwiązań jest uzależnienie lokalnej gęstości krytycznej prądu w nadprzewodniku od lokalnego pola magnetycznego tj. $j_c(x)$ od $B(x)=\mu_0 H(x)$. Wszystkie te, różniące się nieco od siebie, propozycje mają charakter fenomenologiczny i zmierzają do uzyskania możliwie dużej, jakościowej, zgodności modelu z doświadczeniem. Nie kwestionując tej drogi postępowania można jedynie uznać, że żadna z tych metod nie jest uzasadniona teoretycznie, a wynikające z niej przybliżenie nie jest znane, bowiem uzyskiwanie dość dobrej zgodności z eksperymentem ogranicza się z reguły do eksperymentów autorów metody dokonywanych w odniesieniu do określonego nadprzewodnika. Akceptując zatem drogę poszukiwania opisu zjawisk przez proponowanie modelu, w którym zaznaczane są charakterystyczne cechy eksperymentów, proponuje się poniżej model stanu krytycznego, w którym zachowując prostotę modelu Beana uwzględnia się wpływ pola magnetycznego na gęstość krytyczną prądu. Podstawą modelu są zależności polowo-prądowe otrzymywane eksperymentalnie w odniesieniu do wartości średnich. Oznacza to, że średnie, a nie lokalne gęstości prądu krytycznego, podlegają zależności hiperbolicznej. Przyjmując taką zasadę zakłada się, że w układzie płaskim poddanym działaniu zewnętrznego pola magnetycznego o wektorze natężenia równoległym do krawędzi, gęstość krytyczna prądu

$$j_c = j_c(X, H_e) \quad (4)$$

Zapisane w wielkościach względnych, zależności modelu stanu krytycznego dla płytki o szerokości $2a$ przy polu zewnętrznym równoległym do krawędzi skierowanym wzdłuż osi y , są następujące

$$\text{rot } H(X, H_a) = j_c(X, H_a) \quad (5)$$

Wynika stąd rozkład pola magnetycznego

$$H(X) = j_c (X-a) + H_a \text{ dla } H \in (0, H^*) \quad (6)$$

Oznaczono tu przez $H_a = H_{X=a}$ natężenie pola zewnętrznego na powierzchni próbki, X – współrzędną zawartą w granicach od $X=0$ do $X=a$, H^* jest polem pełnej penetracji próbki.

$$H^* = a j_c \quad (7)$$

W rozważaniach pominięto powierzchniową barierę H_{c1} , co znacznie upraszcza analizę i jest powszechnie przyjętą praktyką, jakkolwiek może powodować pewne różnice w przebiegach teoretycznych i doświadczalnych charakterystykach magnesowania szczególnie w zakresie słabych pól zewnętrznych.

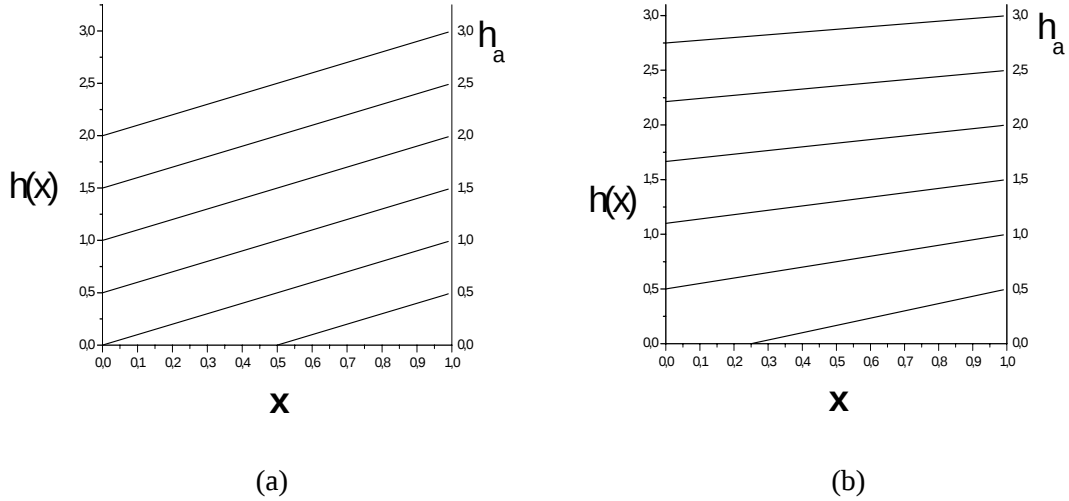
Wprowadzono następujące wielkości względne odniesione odpowiednio, do maksymalnej wartości natężenia pola zewnętrznego H_m oraz do wartości współrzędnej $X=a$,

$$\begin{aligned} h_a &= H_a / H_m \\ x &= X / a \\ h^* &= H^* / H_m = j_c \end{aligned} \quad (8)$$

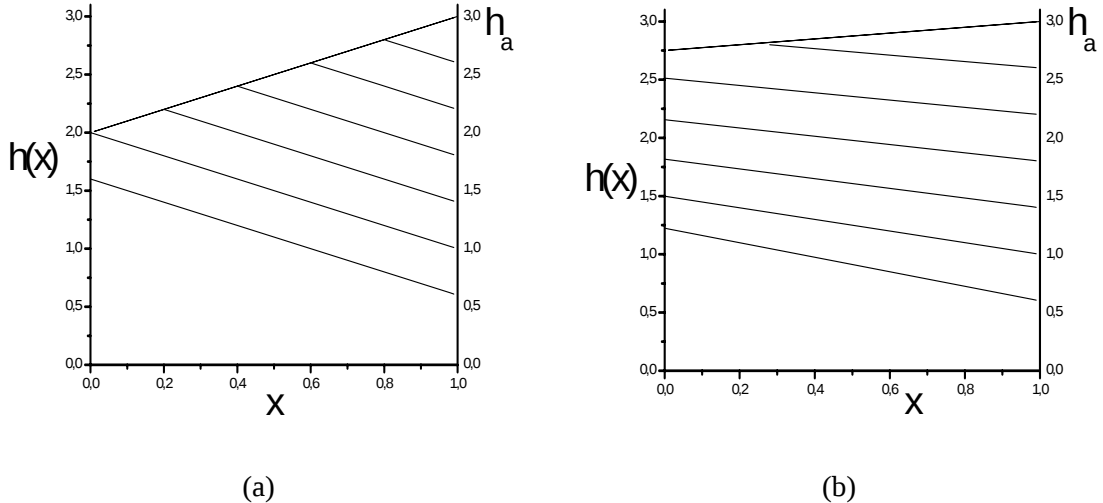
Związek gęstości krytycznej prądu j_c z wartością natężenia pola magnetycznego zapisano w odniesieniu do pola zewnętrznego h_a w postaci

$$j_c = \frac{j_o}{1 + |h_a|} \quad (9)$$

gdzie j_o jest gęstością krytyczną w zerowym polu zewnętrznym $j_o = j_c(h_a=0)$.



Rys. 2 Profile pola magnetycznego $h(x)$ w modelu Beana; $j_c(x)=\text{const}$ (a) i w modelu rozszerzonym $j_c(x, h_a)=\text{const}$. (b). Pole zewnętrzne – rosnące.



Rys. 3 Profile pola magnetycznego $h(x)$ w modelu Beana; $j_c(x)=\text{const}$ (a) i w modelu rozszerzonym $j_c(x, h_a)=\text{const}$. (b). Pole zewnętrzne – malejące.

Dla uproszczenia problemu zakłada się, że nadprzewodząca płytka jest nieskończenie długa wzdłuż współrzędnej y . Na rys. 2 przedstawiono rozkład $h(x)$ pola magnetycznego dla modelu Beana (a) i modelu rozszerzonego (b) przy pierwszym magnesowaniu – narastanie pola zewnętrznego od $h_a=0$ do $h_a=h_m$ dla $h_m > h^*$, zaś na rys.3 przy rozmagnesowaniu - zmniejszanie pola zewnętrznego. W odróżnieniu od klasycznego

modelu Beana uzyskuje się tu zmianę gradientu pola w zależności od wartości h_a ; $\partial h / \partial x = j_o / (1 + h_a)$. Wartość pola pełnej penetracji jest równa

$$h^* = -0,5 + (0,25 + j_o)^{1/2} \quad (10)$$

W rezultacie zmniejszania gradientu natężenia pola występuje w omawianym przypadku słabsza histereza magnetyczna, której wartość może być utożsamiana z właściwościami nadprzewodzącymi. Powierzchnia pętli histerezy jest bowiem miarą zdolności ekranowania wnętrza nadprzewodnika w odniesieniu do pola zewnętrznego, przy czym w procesie ekranowania biorą udział wszystkie fragmenty jego struktury w tym również otoczone nadprzewodnikiem, różnorodne wnętrza.

3. Wyniki obliczeniowe

Gałęzie pętli histerezy w zakresie słabych pól ($h < h^*$) są opisane wzorami:

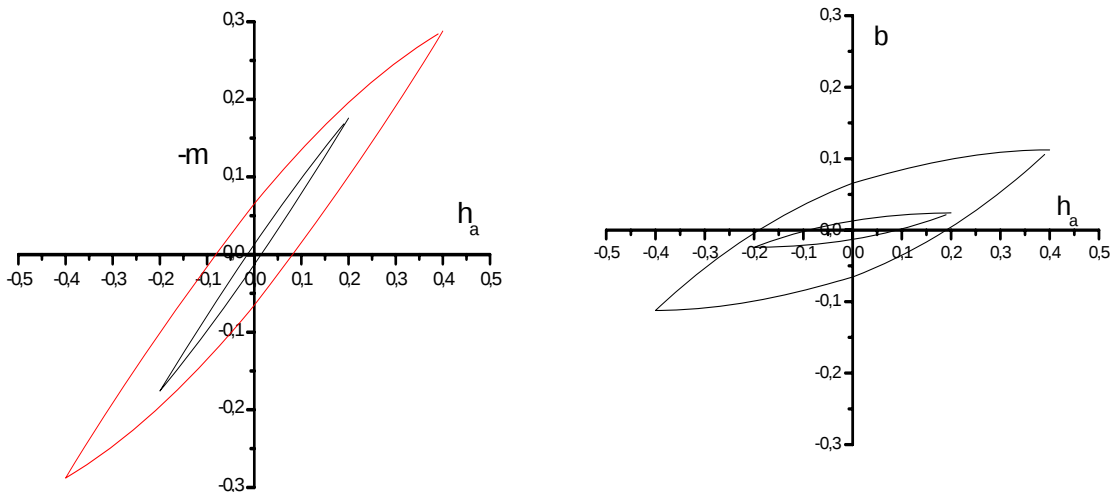
$$b = \int_{x_o}^{x_p} h(x) dx + \int_{x_p}^1 h(x) dx \quad (11)$$

gdzie

$$x_o = 1 - \frac{h_a}{j_c} \geq 0, \quad x_p = 1 - \frac{h_a}{2j_c} \quad (12)$$

W zakresie pól silnych ($h > h^*$) jest

$$b = \int_0^{x_p} h(x) dx + \int_{x_p}^1 h(x) dx \quad (13)$$

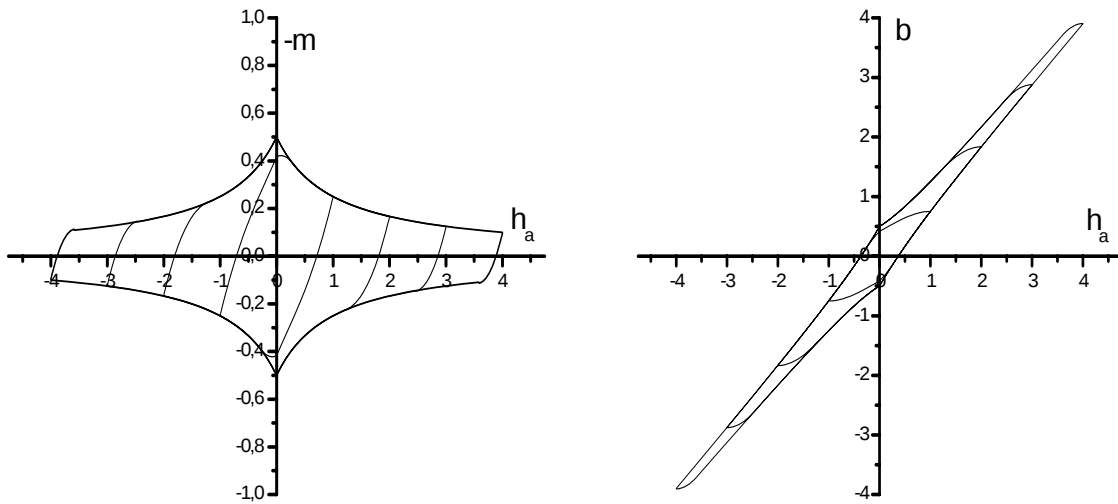


Rys.4 Charakterystyki magnesowania $-m(h_a)$ dla słabych pól zewnętrznych ($h_a=0,2; 0,4$).

Na rys.4 przedstawiono charakterystyki magnesowania w postaci zależności średnich wartości magnetyzacji względnej $-m$ i średniej indukcji względnej b , od bezwymiarowego

natężenia pola zewnętrznego h_a , uzyskane w ramach modelu rozszerzonego, dla słabych pól magnetycznych ($h < h^*$).

Na rys.5 pokazano odpowiednie charakterystyki dla szerokiego zakresu pól silnych ($h_m = 1, 2, 3, \text{ i } 4$)



Rys.5 Charakterystyki magnesowania $b(h_a)$ dla silnych pól zewnętrznych ($h_a = 1,0; 2,0; 3,0; 4,0$).

Na rys. 6 zaznaczono charakterystyczne punkty pętli histerezy. Przy $h_a = 0$ odległość górnej i dolnej gałęzi pętli w skali magnesowalności $j_o = 1$.

Gałęzie pętli histerezy $b(h_a)$ dla odpowiednich zakresów pól magnetycznych, są opisane wzorami:

a) górna gałąź pętli histerezy $b(h_a)$ dla $h_a \in (h_m - 2h^*, -h_m)$

$$b^g = \int_0^1 h(x) dx = \int_0^1 [-j_c(x-1) + h_a] dx = \frac{1}{2} \frac{j_o}{1+h_a} + h_a$$

b) dolna gałąź pętli histerezy dla $h_a \in (-h_m + 2h^*, -h_m)$

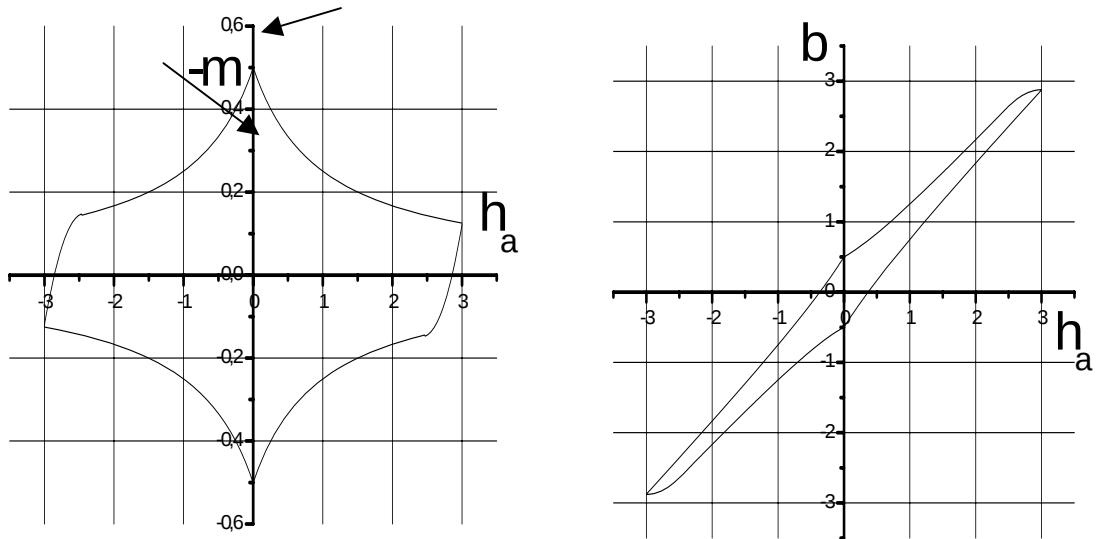
$$b^d = \int_0^1 h(x) dx = \int_0^1 [j_c(x-1) + h_a] dx = -\frac{1}{2} \frac{j_o}{1+h_a} + h_a \quad (14)$$

Stąd

$$m^g = b^g - h_a = \frac{1}{2} \frac{j_o}{1+h_a} \quad (15)$$

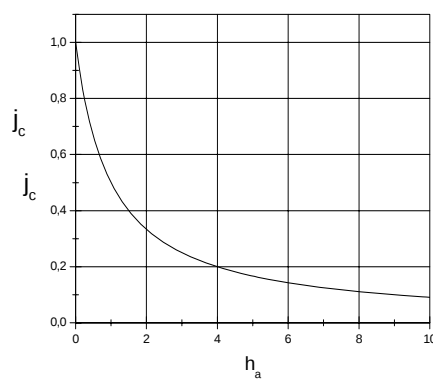
$$m^d = b^d - h_a = -\frac{1}{2} \frac{j_o}{1+h_a} \quad (16)$$

$$\Delta m = m^g - m^d = \frac{j_o}{1 + h_a} \quad (17)$$



Rys.6 Charakterystyki magnesowania $-m(h_a)$ i $b(h_a)$ dla $h_m=3$.

Na rys. 7 przedstawiono zależność $j_c(h_a)$ dla $j_o=1$.



Rys.7 Charakterystyka $j_c(h_a)$.

4. Podsumowanie

Model stanu krytycznego jest jednym z podstawowych narzędzi analizy makroskopowych właściwości nadprzewodników. Istotą modelu jest założenie o istnieniu samoorganizującego się stanu na granicy stabilności połowo-prądowej nadprzewodnika.

Konsekwencją relacji uzyskiwanych z warunku równowagi sił Lorentza i sił dyfuzji pola magnetycznego, jest profil rozkładu pola magnetycznego, gęstości prądu i siły pinningu. Wyznaczenie tych rozkładów wymaga założenia znajomości jednego z nich, przy czym z reguły, jest to założenie o charakterze fenomenologicznym, poparte w wielu przypadkach badaniami eksperymentalnymi, w których, na podstawie zintegrowanej odpowiedzi magnetycznej próbki, poszukuje się najlepiej dobranego rozkładu wielkości poszukiwanej.

Przedstawiony model uwzględnia obserwowaną doświadczalnie zależność gęstości krytycznej prądu od pola magnetycznego wprowadzając tę zależność w odniesieniu do wartości j_c niezależnej od współrzędnej. Utrzymano w ten sposób przejrzystość modelu Beana ($j_c(x)=\text{const}$). Dzięki uzależnieniu wartości j_c od pola h_a uzyskuje się w modelu zawężenie pętli histerezy w całym obszarze wartości poza $h_a=0$. Jest to oczywista konsekwencją pogarszania właściwości nadprzewodzących w silniejszych polach magnetycznych i wynikającego stąd zmniejszania „stopnia nieodwracalności” charakterystyki magnesowania. Model zachowuje w punkcie $h_a=0$ krytyczny parametr $\Delta M=2j_c$, który w modelu Beana jest rozciągnięty na szeroki obszar wartości h_a . Jest to jest oczywistą i uzasadnioną fizycznie, konsekwencją przyjętej zasady zmniejszania j_c w rosnącym polu magnetycznym. Wartości ΔM wyznaczone dla wartości pola $h_a \neq 0$, odpowiadają hiperbolicznej zależności $j_c(h_a)$. Uzyskano w ten sposób w odróżnieniu od klasycznego modelu Beana, odpowiedniość pomiędzy charakterystykami $m(h_a)$ oraz $j_c(h_a)$ dla pola $h > h^*$ pełnej penetracji próbki.

Należy podkreślić, że przedstawiony model ma charakter czysto fenomenologiczny i jest tylko ograniczonym rozwinięciem modelu Beana. W odróżnieniu od wprowadzanych przez dotychczasowych kontynuatorów tego modelu, idei uzależniania j_c od lokalnego pola $h(x)$, którego profil nie jest znany i musi być niezależnie od metody przyjmowany *a priori* w sposób ukryty lub jawny, wprowadzono hiperboliczną zależność $j_c(h_a)$. Zależność taka była wielokrotnie potwierdzana eksperymentalnie i ma pewne uzasadnienie fizyczne na tle koncepcji transportu ładunku w środowisku rozgałęzionych torów prądowych zawierających słabe połączenia międzyziarnowe.

Literatura

- [1] C.P Bean, “Magnetization of hard superconductors”, *Phys.Rev.Lett.* vol.8 (1962) pp. 250-252
- [2] C.P Bean, “Magnetization of high-field superconductors” *Rev.Mod.Phys.* vol.36 (1964) pp. 31-39
- [3] Y.B.Kim, C.F. Hempstead, A.R. Strand, “Critical persistent currents in hard superconductors” *Phys.Rev.Lett.* vol.9 (1962) pp. 306- 309
- [4] Y.B.Kim, C.F. Hempstead, A.R. Strand, “Magnetization and critical supercurrents” *Phys.Rev.* vol.129 (1963) pp. 528-535
- [5] P.W.Anderson. “Theory of flux creep in hard superconductors” *Phys.Rv.Lett* vol.9 (1962) pp.309-311
- [6] M.Mahel, J.Pivarč, “Magnetic hysteresis in high-temperature cuprates”, *Physica C* vol. 308 (1998) pp. 147-160
- [7] A.Silva-Castillo, R.A.Brito-Orta, A.Pérez-González, F.Péres-Rodríguez, “Double critical-state model weak-link regime of granular high- T_c superconductors”, *Physica C* vol. 296 (1998) pp. 75-83

- [8] Subir Saha. B.K.Das, "A realistic two-component critical state model: successful derivation of low-field M-H loops of granular superconductors", *Supercond.Sci.Technol.* vol. 6 (1993) pp. 685-690
- [9] M. Nikolo „Flux dynamics in high-temperature superconductors”; *Supercond. Sci. Technol.* vol.6 (1993) pp. 618-623
- [10] J.Leszczynski, J.Jackiewicz, "The superconducting rings model-percolative character of the transport current in granulated high- T_c superconductors". *Superconductor Science & Technology*, vol.5, no.1S, Jan. 1992, pp.387-90.
- [11] J.Leszczynski, J.Jackiewicz. "The influence of additional pinning centers on the critical current in weakly coupled percolative structures", *World Sci. Publ. Co, Progr. in High-Tc Supercond.*, vol.30, (1992), s.284-290
- [12] J.Leszczynski, J.Jackiewicz, V.M.Svistunov at al. (Physico-Technical Institute Ukrainian Academy of Sciences), "The Abnomal Histeresis Phenomena in Magnetic Field", *Ukr. Acad. of Scien. Fizika i Technika Vysokich Davlenij* t.3, z.1, pp.67-73, 1993,
- [13] K.Watnabe, K.Noto, H.Morita, H.Fujimori, K.Mizuno, T.Aomine, B.Ni.T.Matsushita, K.Yamafuji, Y.Muto, *Cryogenics* vol. 29 (1989) pp. 263
- [14] Y.Yang, C.Beduz, S.P.Ashworth, *Cryogenics* vol. 30 (1990) pp. 618
- [15] M.Majoroš, M.Polák, V.Štrbik, Š.Banácka,Š.Chromik,F.Hanic, V.Plecháček, *Supercond. Sci. Technol.* vol. 3 (1990) 227

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



MIKROSTRUKTURA OBSZARU GRANICZNEGO DYFUZYJNEGO KONTAKTU METAL-NADPRZEWODNIK

Jacek Rymaszewski, Ryszard Pawlak

*Instytut Elektrotechniki Teoretycznej, Metrologii i Materiałoznawstwa
Politechniki Łódzkiej*

Zakład Materiałoznawstwa i Elektrotechnologii

ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

e-mail: jacekrym@matel.p.lodz.pl

Abstract

The results of the microscopic observations (SEM) of the junction metal-YBaCuO surroundings are presented. The samples with wire electrodes dipped into YBaCuO were examined. Gold, silver, platinum and nickel wires were used as the electrodes. In each case degraded interlayers were observed. For platinum and nickel the insulation layers were extremely wide and a contact resistance was over 1 M Ω . For gold and silver the layers were very thin and the contact resistance was below 500 $\mu\Omega$.

Słowa kluczowe: kontakt metal-nadprzewodnik, mikrostruktura, YBaCuO.

1. Wstęp

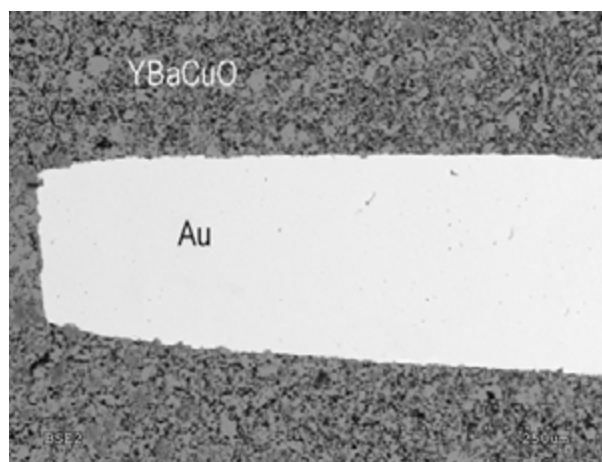
Łączenie nadprzewodnika z obwodem normalnym stanowi, jak do tej pory, jeden z ważniejszych problemów wymagających rozwiązania w praktycznych zastosowaniach nadprzewodników wysokotemperaturowych. Wytworzenie takiego połączenia wiąże się z zakłóceniem, zarówno w skali mikro jak i makroskopowej, bardzo skomplikowanej (i wrażliwej na niewielkie zmiany składu) struktury nadprzewodnika w otoczeniu kontaktu. Efektem takiego procesu jest większa od oczekiwanej wartość rezystancji połączenia, co w sposób oczywisty ogranicza właściwości transportowe całego układu. Łączenie metali z niemetalami (np. ceramiką) należy do najtrudniejszych problemów techniki spajania. Zasadnicze trudności wynikają z krańcowo różnych właściwości fizykochemicznych, jak różne średnice atomów po obu stronach powierzchni granicznej, inne typy sieci krystalograficznej, brak wzajemnej rozpuszczalności czy też możliwości tworzenia się twardych

i kruchych faz, degradujących takie połączenie. W przypadku połączeń, które powinny być zdolne do przewodzenia prądu o znacznej gęstości, czyli mieć małą wartość rezystancji, by nie przyczyniać się nawet do lokalnego wzrostu temperatury nadprzewodnika, zagadnienie jest szczególnie trudne. W pracy przedstawiono wyniki badań mikroskopowych obszaru przejściowego połączenia metal-YBaCuO. Zbadano kilka wariantów takiego połączenia dla różnych materiałów, z jakich zostały wykonane elektrody.

2. Badania

Przedmiotem opisywanych badań były próbki masywnej ceramiki YBaCuO z wyprowadzeniami drutowymi, wykonane według technologii dokładniej opisanej w pracy [1]. Połączenie metal-YBaCuO zostało wykonane poprzez wprowadzenie w proszek ceramiczny, jeszcze przed ostateczną syntezą, elektrody w postaci odcinka drutu. Tak przygotowane próbki prasowano, a następnie spiekano w temperaturze około 920-930°C. Wykonano zglądy metalograficzne otrzymanych próbek, które następnie poddano obserwacjom przy wykorzystaniu systemu mikroskopowego HITACHI S-3000N, wyposażonego w mikroanalityzator EDS NORAN.

Zastosowana technologia wytwarzania próbek pozwala na uzyskiwanie połączeń o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych. Spiekanie próbek nadprzewodzących wraz z przygotowanymi wyprowadzeniami ma charakter zgrzewania dyfuzyjnego. Rezultatem takiego procesu może być powstawanie warstwy przejściowej, często izolacyjnej, której skład chemiczny i grubość zależą silnie od właściwości metalu zastosowanego na elektrodę. W skład całkowitej rezystancji kontaktu wchodzi zatem nie tylko rezystancja wynikająca ze zjawisk związanych z transportem ładunku na granicy nadprzewodnik-przewodnik takich jak zmiana wartości parametru porządku [2], różnica prędkości elektronów na poziomie Fermiego [3], odbicie Andrejeva [4]. Pojawia się dodatkowy składnik rezystancji wynikający z istnienia zakłóconej strukturalnie warstwy granicznej o wymiarach mikroskopowych.

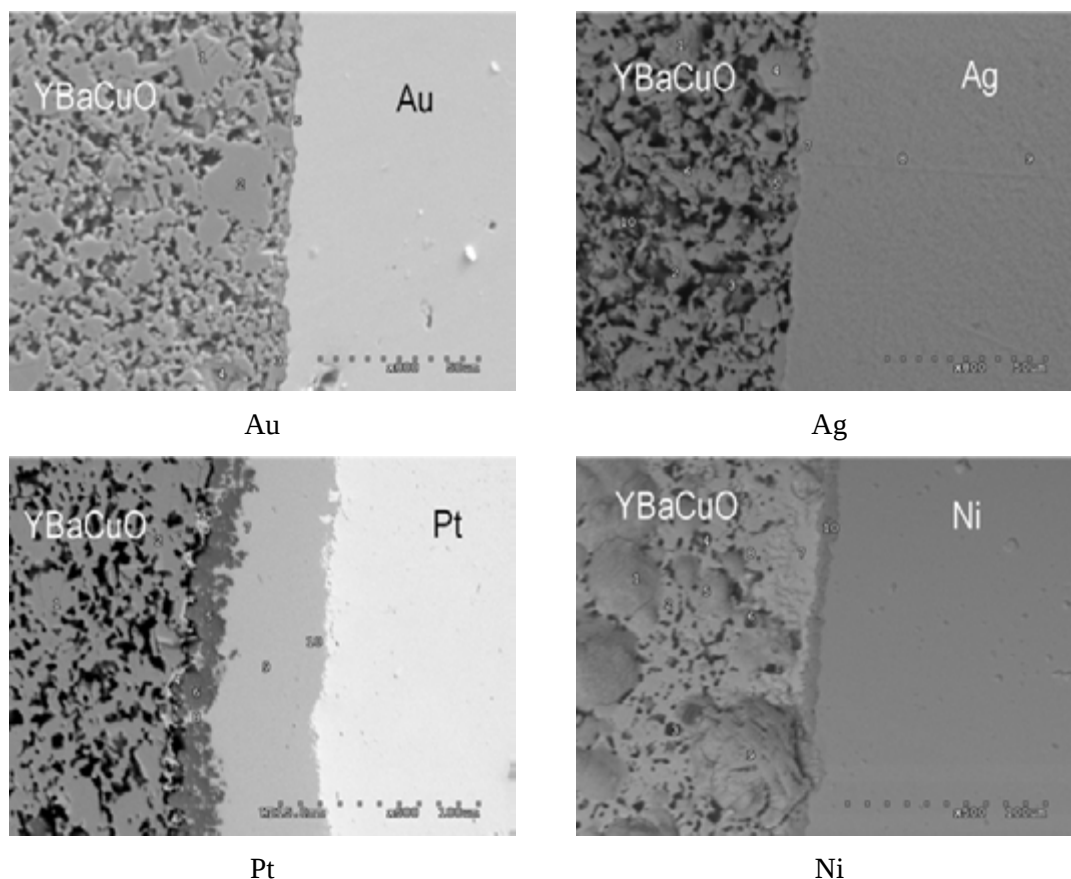


Rys. 1. Przekrój metalograficzny elektrody drutowej zanurzonej w ceramice YBaCuO.

Aby zweryfikować wpływ rodzaju metalu na jakość połączenia metal-YBaCuO wykonano próbki z różnymi elektrodami. Zastosowano druty z metali szlachetnych: złoto,

platyna, srebro oraz dodatkowo drut niklowy. Przykładowy obraz mikroskopowy elektrody drutowej (Au) „zanurzonej” w ceramice YBaCuO pokazano na rysunku 1. Obraz ten potwierdza zalety zastosowanej technologii wytwarzania połączeń. W tej skali odwzorowania widoczna jest ciągła, jednakowa wzdłuż całej elektrody drutowej zanurzonej w ceramice, granica metal-nadprzewodnik. Nie zaobserwowano wyraźniejszych zmian mikrostruktury nadprzewodnika wokół elektrody (morfologia i wielkość ziaren, porowatość).

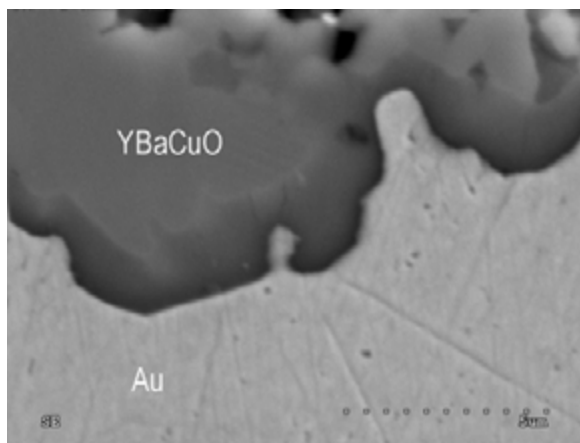
Na rysunku 2 przedstawiono bardziej szczegółowe obrazy struktury obszaru granicznego metal-YBaCuO dla elektrod wykonanych ze: złota Au, platyny Pt, srebra Ag i niklu Ni. Przy tych powiększeniach (500-800×) na obrazach próbek z elektrodami Au i Ag nie jest widoczna warstwa przejściowa.



Rys. 2. Struktura obszaru granicznego kontaktu dyfuzyjnego metal-YBaCuO.

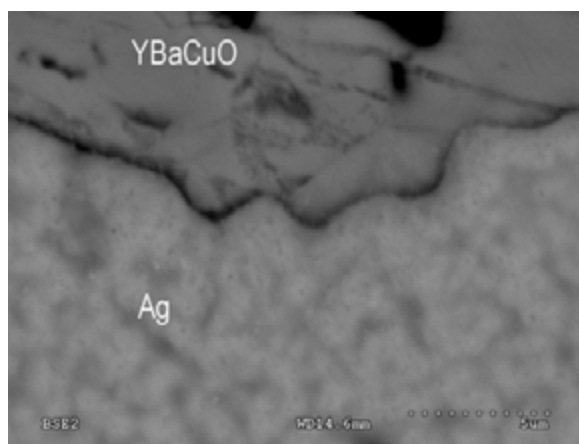
Inaczej wygląda obszar graniczny w próbkach z elektrodami Pt i Ni. Występują tu makroskopowe warstwy przejściowe, o strukturze odmiennej zarówno od materiału elektrody, jak i ceramiki nadprzewodzącej. W przypadku elektrody platynowej widoczne są dwie warstwy przejściowe. Na granicy z ceramiką ujawniły się wyraźnie nieciągłości struktury. Ciemna warstwa przejściowa (od strony YBaCuO), o grubości ok. 10 μm , składa się zasadniczo z miedzi (76.9÷77.2 % wag.) i tlenu (22.8÷23.1 % wag.), co pozwala stwierdzić, że jest to tlenek CuO. Jaśniejsza warstwa przejściowa (od strony platyny), o grubości ok. 25 μm , zawiera wagowo ok. 32 % Pt, 4 % Y, 45 % Ba, 6 % Cu i 13 % O.

Atomy pierwiastków tworzących ceramikę nadprzewodzącą wdyfundowały na znaczną odległość w głąb materiału elektrody, przy czym dyfuzja atomów Cu zachodziła głównie do warstwy pierwszej. Taka budowa strukturalna obszaru przejściowego sprawia, że elektrody Pt nie mogą tworzyć dobrego kontaktu do ceramiki YBaCuO. Potwierdziły to całkowicie pomiary rezystancji takich kontaktów (wartości rezystancji niepowtarzalne, rzędu $M\Omega$ w temp. otoczenia). W przypadku elektrody Ni obszar YBaCuO oddzielony jest od rodzimego materiału elektrody warstwą przejściową o grubości ok. $5\text{ }\mu\text{m}$. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej (wagowo ok. 65 % Ni, 13 % Cu, 22 % O) wskazują, iż tworzą ją złożone tlenki niklowo-miedziowe. Zaobserwowano również przypadki dyfuzji niklu w głąb ceramiki, tworzące wydzielenia o rozmiarach $5\div 10\text{ }\mu\text{m}$ w znacznej odległości od powierzchni elektrody. Zarówno istnienie tlenkowej warstwy przejściowej o znacznej grubości, jak i nieoczekiwana dyfuzja niklu w ceramikę YBaCuO sprawiają, że elektrody „zapijane” w próbce nadprzewodnika nie mogą być wykonane z Ni. Również w tym przypadku rezystancja takich kontaktów jest rzędu $M\Omega$, co dowodzi, że nikiel jest nieprzydatnym materiałem na elektrody do ceramiki nadprzewodzącej.



Rys. 3. Obraz mikroskopowy kontaktu Au-YBaCuO.

Na rysunku 3 pokazana jest mikrostruktura połączenia Au-YBaCuO. Przy znacznie większym powiększeniu niż na rysunku 2 ujawnia się cienka (ok. $1\text{ }\mu\text{m}$) strefa przejściowa, rozciągająca się od granicy elektrody Au w głąb ziaren ceramiki. Przeprowadzona mikroanaliza wykazała, że średnio w warstwie przejściowej występują miedź i tlen (po ok. 50 % at.) oraz śladowe ilości atomów Ba oraz Au. Na podstawie obrazu mikroskopowego można przypuszczać, że skład obszaru przejściowego nie jest jednakowy w całej jego grubości (zmienia się w kierunku oddalania się od powierzchni elektrody). Tej tezy nie można jednak potwierdzić wynikami badań rozkładu liniowego pierwiastków ze względu na ograniczoną rozdzielczość wiązki mikrosondy (średnica minimalna $1\text{ }\mu\text{m}$). Z uwagi na małą grubość obszaru przejściowego i jego dobre powiązanie strukturalne zarówno z ceramiką YBaCuO jak i z elektrodą Au kontakty Au-YBaCuO wykazują nieduże wartości rezystancji i mogą być stosowane w badaniach właściwości tego rodzaju nadprzewodników.



Rys. 4. Obraz mikroskopowy kontaktu Ag-YBaCuO.

Na rysunku 4 widoczne są dwie nieregularne warstwy przejściowe. Pierwsza po stronie ceramiki o grubości rzędu $0,5\ \mu\text{m}$, zawiera zdefektowane ziarna YBaCuO z niewielką domieszką srebra (ok. $3\div 4\%$ wag.). Druga, po stronie elektrody srebrnej, o grubości około $1,5\ \mu\text{m}$, zawiera głównie srebro oraz pierwiastki pochodzące z ceramiki (ok. 87% Ag, ok. $6,5\%$ Cu, $1,5\%$ O, $4,5\%$ Ba, $0,5\%$ Y wag.). Otrzymane wyniki pokazują wzajemną dyfuzję atomów z elektrody srebrnej i ceramiki. Skład otrzymanych warstw nie daje podstaw do twierdzenia, że są to warstwy izolacyjne. Pomierzone wartości rezystancji kontaktu dla próbek z zanurzonymi elektrodami srebrnymi wynoszą poniżej $500\ \mu\Omega$.

3. Dyskusja

Można było oczekiwać, że w wyniku długiego procesu spiekania ceramiki nadprzewodzącej z elektrodami zanurzonymi na etapie prasowania próbek, powstaje dobre spojenie między ziarnami ceramiki YBaCuO a metalem. Ze względu na fakt, że proces jest długotrwały i odbywa się w wysokiej temperaturze, w warstwie granicznej mogą zachodzić złożone przemiany strukturalno-chemiczne. Główną siłą napędową tych zmian są aktywowane termicznie procesy dyfuzyjne, zachodzące w fazie stałej w układzie złożonym z atomów wielu pierwiastków. Ze względu na złożony skład obszarów, w którym zachodzą procesy dyfuzyjne, trudno jest jednoznacznie przewidzieć kierunki efektywnych strumieni dyfuzji oraz ich kinetykę. Wobec tych ograniczeń przydatne okazały się przeprowadzane badania doświadczalne kontaktów z elektrodami wytworzonymi z różnych metali. Obserwacje mikroskopowe połączone z pomiarami rezystancji połączenia potwierdziły całkowitą nieprzydatność platyny oraz niklu jako materiałów stosowanych na elektrody. Powstająca na styku metal-ceramika warstwa izolacyjna powoduje, że wartość rezystancji takiego kontaktu jest bardzo duża (rzędu $\text{M}\Omega$). W przypadku złota, na granicy metal-nadprzewodnik też widoczna jest warstwa przejściowa, lecz jej grubość jest na tyle mała, że nie ogranicza w sposób znaczący przepływu prądu. Prawdopodobną przyczyną tego faktu jest silny efekt bliskości występujący w nadprzewodnikach tlenkowych [2] (o małej wartości długości koherencji). Dzięki temu zjawisku możliwe jest tunelowanie par Coopera przez bardzo grube warstwy izolacyjne. Typowa wartość rezystancji połączenia jest rzędu $100\ \mu\Omega$, co daje rezystywność powierzchniową równą około $10^{-7}\ \Omega\text{cm}^2$. Taką wartość

rezystywności otrzymano zakładając, że cała powierzchnia drutu zanurzona w ceramice bierze udział w przewodzeniu. Wyniki badań przedstawione w pracy [1] pokazują, że w przewodzeniu prądu bierze udział niewielki fragment powierzchni elektrody. Zatem rzeczywista wartość rezystywności powierzchniowej jest znacznie mniejsza i trudna do oszacowania. Dla próbek z elektrodami Ag w obszarze granicznym również powstają cienkie warstwy przejściowe, jednak ich skład pozwala sądzić, że nie są to warstwy izolacyjne. W tym przypadku występują trudności technologiczne wynikające z wartości temperatury spiekania zbliżonej do temperatury topnienia srebra. Przedstawione powyżej rezultaty potwierdzają przydatność złota i srebra jako materiałów stosowanych na elektrody.

4. Podsumowanie

Wyniki badań zaprezentowane w pracy pokazują, że na granicy metal-YBaCuO zachodzi wiele zjawisk, które bezpośrednio lub pośrednio wpływają na wartość rezystancji kontaktu. Należy przypuszczać, że niezależnie od konfiguracji połączenia, sposobu jego wykonania czy zastosowanych materiałów, między nadprzewodnikiem a metalem normalnym występuje warstwa przejściowa, najczęściej o charakterze izolacyjnym [5]. Powodem pojawienia się takiej warstwy mogą być zarówno mechaniczne uszkodzenie struktury nadprzewodnika w pobliżu połączenia, jak i skomplikowane reakcje fizyko-chemiczne w obszarze granicznym. To wszystko powoduje, że całkowita rezystancja połączenia jest zwiększona o wartość wynikającą z istnienia wyżej wymienionych zjawisk. Należy zatem dążyć do minimalizacji warstwy przejściowej i zwiększenia powierzchni styku metal-nadprzewodnik. Jedną z propozycji rozwiązania tego problemu jest metoda wytwarzania elektrod ze sproszkowanego srebra przedstawiona w pracy [6].

Literatura

- [1] Rymaszewski J., Pawlak R., Charakterystyki prądowo-napięciowe kontaktu Au/YBaCuO, *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej*, nr 37, seria: Konferencje no. 12, 2000, s. 237-240.
- [2] Cyrot M., Pavuna D., *Wstęp do nadprzewodnictwa, nadprzewodniki wysokotemperaturowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1996.
- [3] Svistunov V.M., Tarenkov V.Yu., D'yachenko A.I., Chernyak O.I., Aoki R, Contact phenomena in Ag-YBCO composites, *Physica C*, v. 303, 1998, pp. 177-184.
- [4] Chiang Yu.N., Shevchenko O.G., Contribution of Andreev reflection to the increase in the resistance of the normal metal in a bimetallic N-S structure, *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, vol. 113, no. 3, March 1998, pp.1064-1070.
- [5] Leszczyński J., Rymaszewski J., Korzeniewska E.: Rezystancja tunelowa kontaktu Au/YBaCuO; *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej*, nr 37, seria Konferencje nr 12, 2000; s. 245-249.
- [6] Rymaszewski J., Lebioda M., Nowa technologia wytwarzania połączenia Ag/YBaCuO, *III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników”*, Lublin – Nałęczów 2001.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



NOWA TECHNOLOGIA WYTWARZANIA POŁĄCZENIA
Ag/YBaCuO

Jacek Rymaszewski, Marcin Lebioda

*Instytut Elektrotechniki Teoretycznej, Metrologii i Materiałoznawstwa
Politechniki Łódzkiej*

Zakład Materiałoznawstwa i Elektrotechnologii

ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

e-mail: jacekrym@matel.p.lodz.pl

Abstract

The results of investigations of diffusion contact Ag/YBaCuO properties are presented in this paper. This contact was obtained in the process of bulk superconducting sample production. The silver electrodes, made of silver powder, were obtained in the processes of pressing and final sintering with YBaCuO powder. The $U(I)$ characteristics were measured in three and four probes methods. The real surface of contact obtained in this technology is significantly bigger than the geometrical surface.

Słowa kluczowe: kontakt metal-nadprzewodnik, YBaCuO.

1. Wstęp

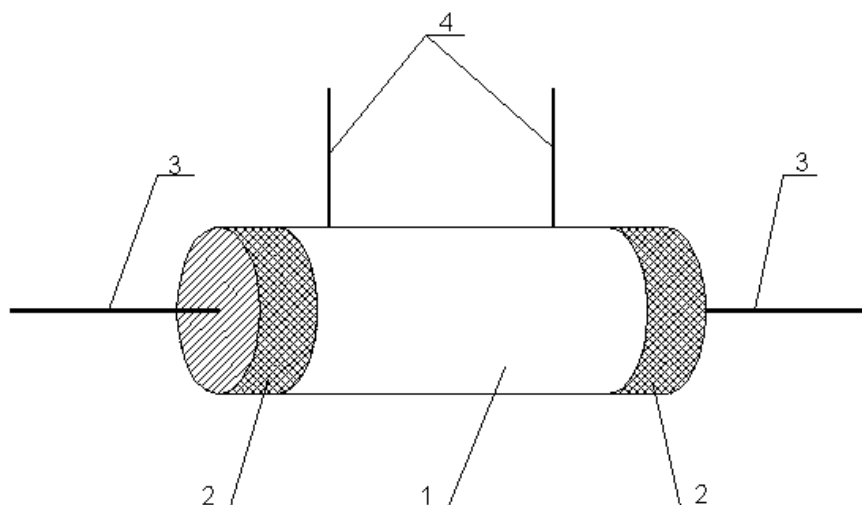
Nadprzewodniki wysokotemperaturowe pomimo stosunkowo prostego procesu wytwarzania mają ciągle bardzo ograniczony zakres zastosowań. Spowodowane jest to szeregiem różnych czynników. Jednym z ważniejszych, obok niekorzystnych właściwości mechanicznych jest mała wartość gęstości prądu krytycznego J_C . Na wielkość tę ma wpływ szereg czynników takich jak między innymi: słabe złącza międzyziarnowe, duża anizotropia materiału, zbliżniaczenia, pęknięcia i inne defekty sieci krystalicznej oraz w przypadku połączenia metal – nadprzewodnik duży opór złącza. Wiele z wymienionych czynników można w większym lub mniejszym stopniu kontrolować w procesie technologicznym. Wykonuje się to poprzez np.: orientację ziaren w polu magnetycznym, domieszkowanie srebrem, wykonywanie kontaktów metal – nadprzewodnik o jak najmniejszej rezystancji. Wykonanie kontaktu o małej rezystancji jest istotne z punktu widzenia ciepła Joule’a wydzielanego w wyniku przepływu prądu. Zjawisko to może prowadzić do lokalnego przekroczenia temperatury krytycznej a w konsekwencji do utraty właściwości nadprzewodzą-

cych. Utrata nadprzewodnictwa ma charakter lokalny (przebiegowy), lecz w określonych warunkach może rozwinąć się w całej objętości próbki. Wynika to z faktu istnienia dodatniego sprzężenia zwrotnego pomiędzy rezystancją (wzrostem rezystancji) i wydzielanym ciepłem Joule'a.

W artykule zaproponowano nową metodę wytwarzania kontaktu metal (Ag) – nadprzewodnik (YBaCuO).

2. Eksperyment

Do badań użyto masywnych próbek YBaCuO z elektrodami w postaci warstw sproszkowanego srebra sprasowanych razem z proszkiem YBaCuO przed ostatecznym spiekaniem. Proszek nadprzewodzący przygotowany wykorzystując powszechnie znaną technologię [1]. Po umieszczeniu w specjalnie przygotowanej matrycy sproszkowanego srebra oraz sproszkowanego półproduktu próbki poddano procesowi prasowania. Przygotowano próbki w postaci walców o średnicy 7 mm i wysokości zależnej od ilości sproszkowanych półproduktów. Proces spiekania przebiegał w temperaturze 940 °C przez 8 godzin, po czym próbki schładzano do temperatury otoczenia przez 12 godzin w atmosferze tlenowej. Uproszczony widok próbki przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Widok próbki z kontaktami wykonanymi ze sproszkowanego srebra. 1 – YBaCuO, 2 – kontakty z proszku srebrnego, 3 – elektrody prądowe, 4 – elektrody napięciowe.

Do elektrod prądowych przylutowano centrycznie spoiwem Pb – Sn druty srebrne. Elektrody napięciowe przymocowano przy pomocy kleju elektroprzewodzącego.

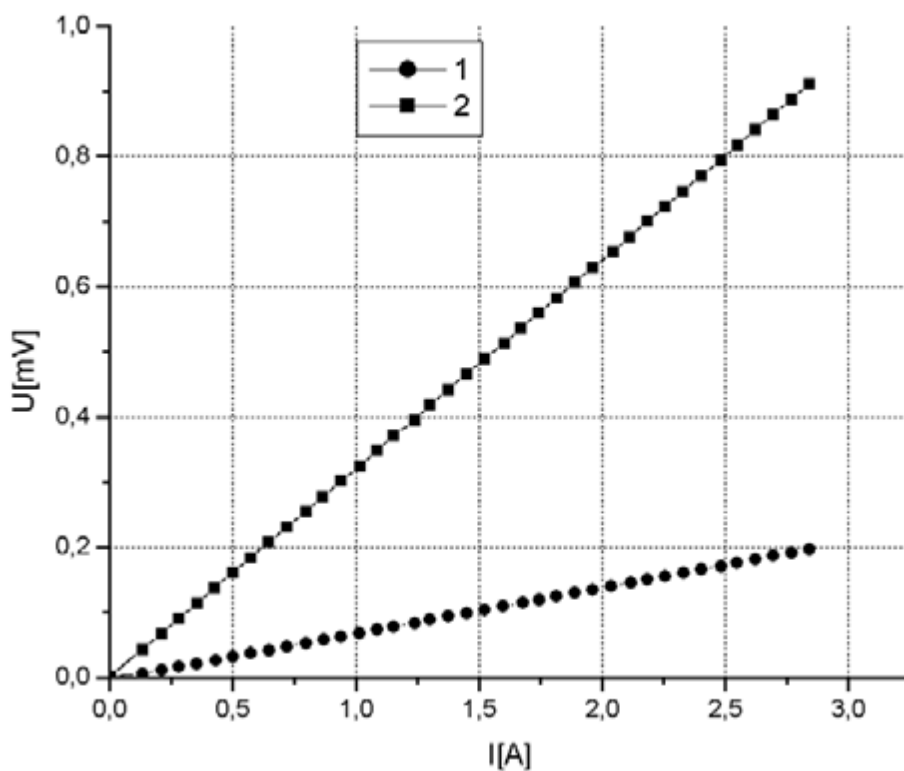
Do wyznaczenia charakterystyk prądowo – napięciowych posłużono się układem trój- i czteroelektrodowym. Do pomiaru napięcia wykorzystano nanowoltomierz HP3420A o rozdzielczości 0,1 nV połączony z systemem komputerowym [2] służącym do sterowania stanowiskiem pomiarowym i do archiwizacji wyników pomiarów.

3. Wyniki

W celu wyznaczenia rezystancji kontaktu wyznaczono charakterystyki prądowo – napięciowe w układach trój- i czteroelektrodowym. Pozwoliło to określić rezystancję kontaktu według zależności (1).

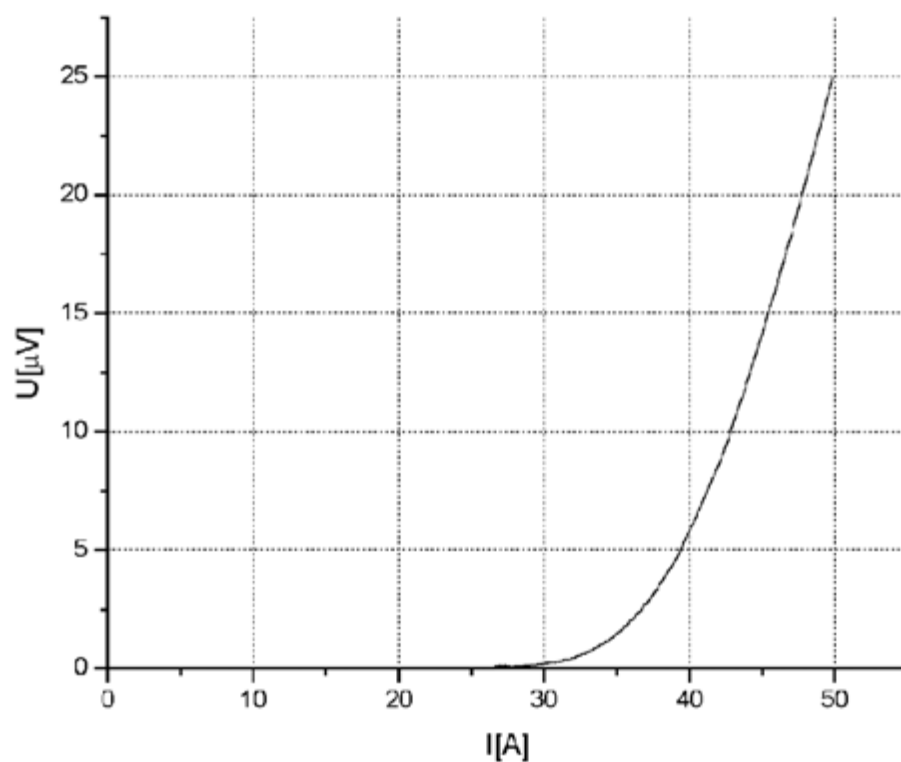
$$R_{C(3,4)} = \frac{U_{3el} - U_{4el}}{I} \quad (1)$$

Rezystancja kontaktu w obliczona dla próbek badanych w temperaturze pokojowej wynosiła $0,2 \div 0,3 \text{ m}\Omega$.

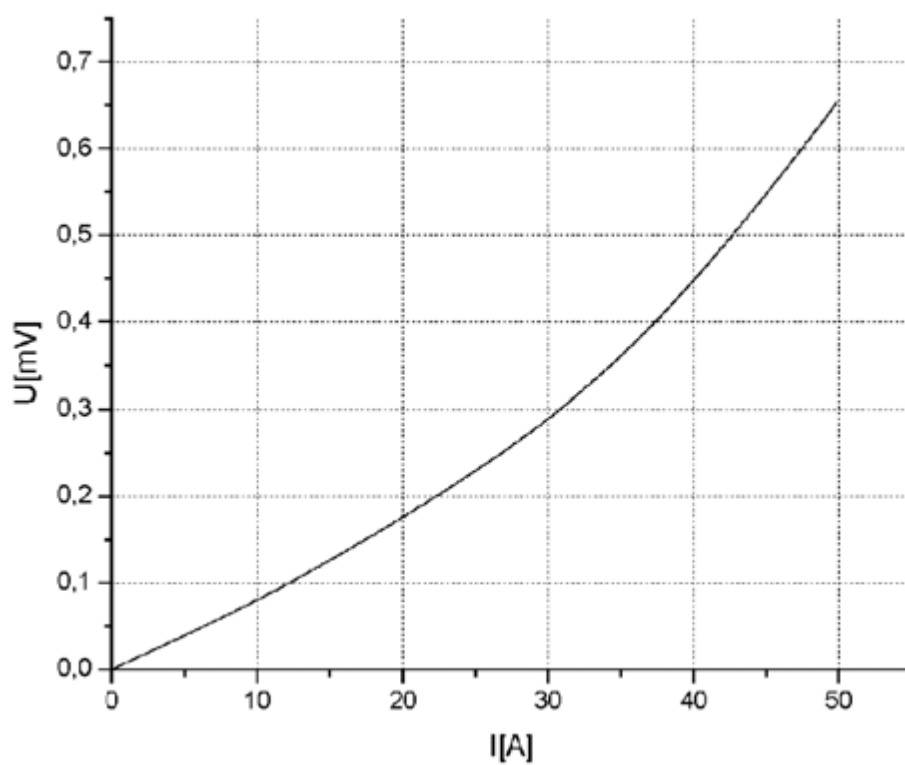


Rys. 2. Charakterystyki $U=f(I)$ wyznaczone w temperaturze pokojowej: 1 – charakterystyka $U=f(I)$ w układzie czteroelektrodowym, 2 – charakterystyka $U=f(I)$ wyznaczona w układzie trójelektrodowym.

Dzięki uzyskanym charakterystykom w układzie czteroelektrodowym (rys. 3) możliwe było wyznaczenie prądu krytycznego I_C . Znajomość wartości prądu krytycznego pozwoliła wyznaczyć jego gęstość. Przy założeniu, że cały przekrój poprzeczny próbki bierze udział w przewodzeniu prądu gęstość krytyczna zawiera się w przedziale $80 \div 100 \text{ A/cm}^2$.



Rys. 3. Charakterystyka $U=f(I)$ wyznaczona w układzie czteroelektrodowym dla próbek w temperaturze ciekłego azotu.

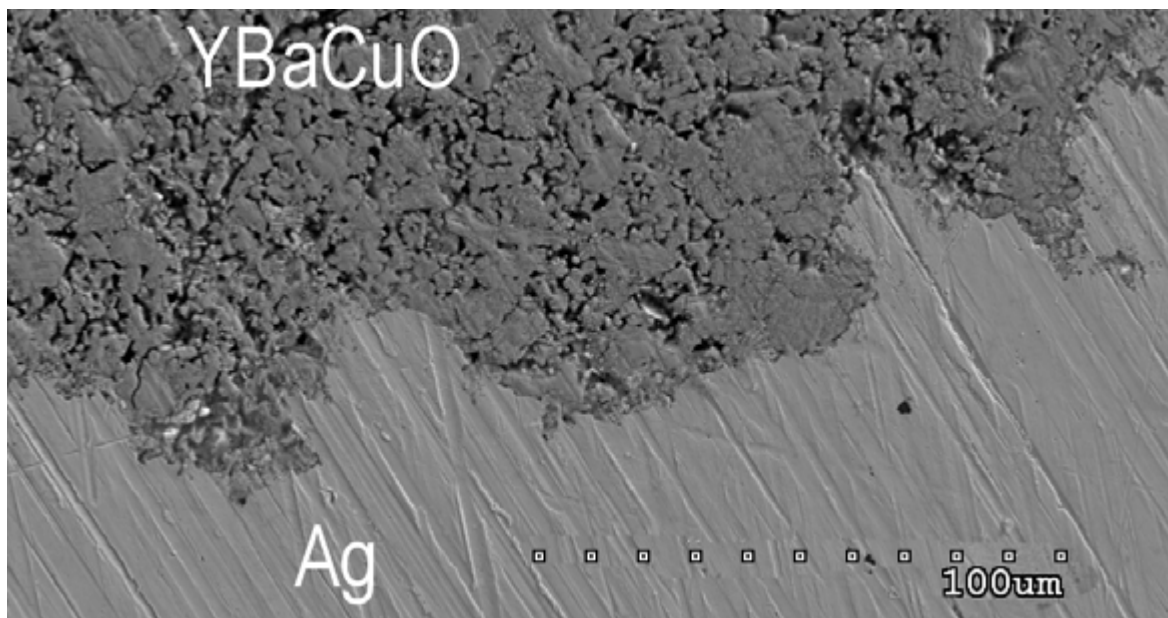


Rys. 4. Charakterystyka $U=f(I)$ wyznaczona w układzie trójelektrodowym dla próbek w temperaturze ciekłego azotu.

Wyniki odczytane z charakterystyk $U=f(I)$ wyznaczonych w układzie trójelektrodowym w temperaturze ciekłego azotu (rys. 4) wskazują na małą rezystancję uzyskanych kontaktów YBaCuO/Ag. Rezystancja kształtuje się na poziomie $9\div 13\ \mu\Omega$. Po przekroczeniu prądu krytycznego charakterystycznego dla danej próbki charakterystyka mierzona w układzie trójelektrodowym przestaje być prostoliniowa.

4. Dyskusja

Wykonane i przebadane próbki charakteryzowały się powtarzalnymi wartościami rezystancji kontaktu. Poprzez centryczne umieszczenie drutu doprowadzającego prąd do elektrody „sztucznie” wymuszono centrum czynnej powierzchni kontaktu YBaCu/Ag w celu zachowania symetrii rozptywu prądu. Charakterystyka $U=f(I)$ przestaje być prostoliniowa w momencie utraty przez próbkę właściwości nadprzewodzących. Odcinek prostoliniowy charakterystyki jest praktycznie identyczny dla wszystkich badanych próbek. Wartość prądu dla której występuje ugięcie charakterystyki odpowiada wartości prądu krytycznego danej próbki. Wzrost spadku napięcia mierzonego w układzie trójelektrodowym (rys. 4) jest jednak niewielki i wynika z utraty przez próbkę właściwości nadprzewodzących. Po uwzględnieniu, zgodnie z zależnością (1), spadku napięcia mierzonego w układzie cztero-elektrodowym wartość rezystancji pozostaje niezmienna na poziomie $9\div 13\ \mu\Omega$. Pozwala to przypuszczać, że ciepło wydzielane w kontakcie nie jest przyczyną zaniku nadprzewodnictwa. Jako bezpośredni mechanizm utraty nadprzewodnictwa w próbce można zatem przyjąć mechanizm słabozłączowy. Przemawia za tym niewielka zmiana rezystancji w obszarze przyelektrodowym, widoczna dla prądów większych od prądu krytycznego.



Rys. 5. Przekrój metalograficzny połączenia Ag/YBaCuO.

Dobre właściwości cieplne kontaktu wynikają z ich małej rezystancji a także z dużej powierzchni styku srebro-ceramika. Rozpatrywana powierzchnia jest znacznie większa od

powierzchni geometrycznej elektrody. Wynika to z zastosowania srebra w postaci proszku, co powoduje wzajemne „zazębianie” się ziaren srebra i ceramiki (rys. 5). Nie występuje tutaj zjawisko histerezy dla charakterystyki $U=f(I)$ jak w przypadku elektrod drutowych [3]. Jest to związane z dobrym odprowadzaniem ciepła z kontaktu. Na tej podstawie można stwierdzić, że zmierzony prąd krytyczny jest prądem krytycznym słabych złączy międzyziarnowych.

Elektrody uzyskane wyżej opisaną metodą charakteryzowały się dobrymi właściwościami mechanicznymi. W przypadku kilku próbek powierzchnie styku poddawane były obróbce mechanicznej w celu ich wygładzenia poprzez szlifowanie. Nie wpływało to na parametry elektryczne. Elektrody wykonane opisaną metodą pozwalały na prosty montaż wyprowadzeń tradycyjną metodą lutowania za pomocą spoiwa Pb – Sn.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników badań stwierdzono, że opisany w artykule kontakt metal-nadprzewodnik charakteryzuje się dobrymi parametrami zarówno elektrycznymi jak i mechanicznymi. Wynika to z faktu zastosowania do wytworzenia elektrod srebra w postaci proszku, co pozwoliło zwiększyć rzeczywistą powierzchnię styku. Różnica pomiędzy rzeczywistą a geometryczną powierzchnią styku jest efektem „zazębiania” się ziaren srebra i ceramiki. Stała wartość rezystancji w funkcji prądu świadczy o dobrej jakości uzyskanego połączenia metal-ceramika. Polepszenie parametrów mechanicznych pozwoliło na mechaniczną obróbkę kontaktów (np. przez szlifowanie), co może mieć duże znaczenie w późniejszych praktycznych zastosowaniach. Dobre właściwości elektryczne i przede wszystkim brak zauważalnych zjawisk cieplnych w otoczeniu kontaktu uzasadniają zastosowanie zaproponowanych połączeń w nadprzewodzących ogranicznikach prądu [4,5].

Literatura

- [1] Murakami M., Processing of bulk YBaCuO, *Superconductor Science and Technology*, vol. 5, 1992, pp. 185-203.
- [2] Rymaszewski J., Pawlak R., Lebioda M., Tomczyk M., Komputerowe systemy pomiarowe w badaniach właściwości materiałów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Elektryka*, nr 886, s. 419-428.
- [3] Rymaszewski J., Pawlak R., Charakterystyki prądowo-napięciowe kontaktu Au/YBaCuO, *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej*, nr 37, seria: Konferencje nr 12, 2000, s. 237-240.
- [4] Paul W., Chen M., Lakner M., Rhyner J., Braun D., Lanz W., Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications, *Physica C*, vol. 354, 2001, pp. 27-33.
- [5] Tixador P., Porcar L., Floch E., Buzon D., Isfort D., Bourgault D., Chaud X., Tournier R., Current limitation with bulk Y-Ba-Cu-O, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, 2001, pp. 2034-2037.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



**ZASTOSOWANIE PRZETWORNIKÓW
PIEZOELEKTRYCZNYCH DO BADAŃ NADPRZEWODNIKÓW
WYSOKOTEMPERATUROWYCH**

Krzysztof Woźniak, Anna Kisiel, Leszek Woźny

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50 – 370 Wrocław

E-mail: wozniakk@poczta.onet.pl

Abstract

Acoustic emission technique applied to superconducting materials investigations at low temperature requires the application of suitable transducers. Common transducers using at low temperature measurements are based on PZT ceramics. Recently piezopolymer materials are used more frequently, especially polyvinylidene fluoride PVDF film or cable. In this paper basic rules of the acoustic emission techniques were shown. PVDF film transducers were designed. Measurements of the acoustic emission from HTS using PZT and PVDF films transducers were realized.

Słowa kluczowe: detektor, emisja akustyczna, nadprzewodnik wysokotemperaturowy.

1. Wstęp

Termin emisja akustyczna (EA) dotyczy sygnałów w szerokim zakresie częstotliwości od 10 Hz do 50 MHz. Technika EA stosowana jest jako narzędzie do badań materiałów w fizyce ciała stałego. Posiada wiele zalet: możliwość nieniszczących badań struktury materiałów, ciągły monitoring zjawisk, lokalizacja miejsca powstania sygnału EA oraz prostota wykonania badań. Wadami jej są brak jasno określonych zależności pomiędzy amplitudą sygnału z przetwornika EA i energią wywołującą impuls EA oraz konieczność korzystania ze skomplikowanej i mało poznanej teorii akustyki [1].

Metoda EA znalazła zastosowanie w diagnostyce materiałów i urządzeń oraz w badaniu zjawisk fizycznych, którym towarzyszy generowanie fali sprężystej, np. w przypadku wyładowań elektrycznych [2]. Jest bardzo użyteczna ze względu na nieniszczący charakter badań, możliwych do przeprowadzenia również podczas normalnej

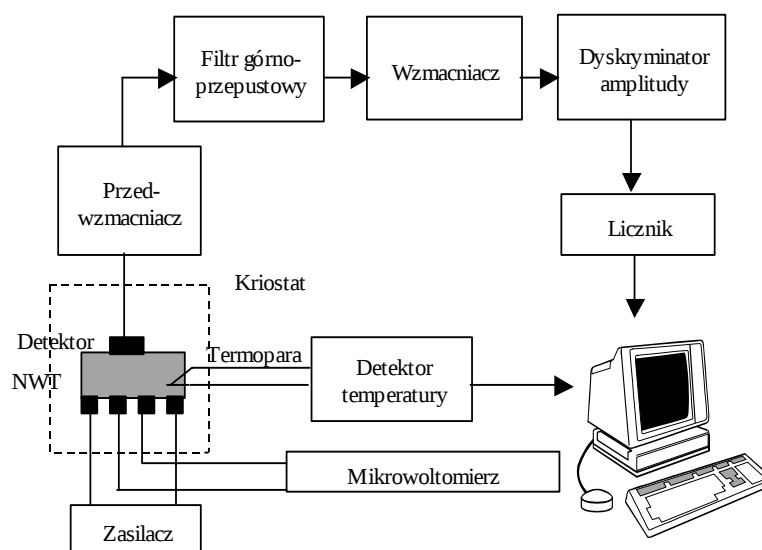
pracy urządzeń. Pozwala ona na wczesne wykrycie wad i uszkodzeń, spowodowanych np. procesami starzeniowymi [3].

Wraz z coraz większym wykorzystaniem nadprzewodników powstaje potrzeba opracowywania metod pomiaru ich parametrów krytycznych bądź ulepszania już istniejących. Do takich metod należy technika emisji akustycznej. Coraz częściej stosowana jest ona do badań nadprzewodników przy przejściach fazowym w niskich temperaturach [4].

2. Układ do pomiaru emisji akustycznej

Podstawowym elementem układu do detekcji impulsów EA jest przetwornik akustoelektryczny, zwykle wykonany z ceramiki piezoelektrycznej PZT o dużym współczynniku piezoelektrycznym d_{33} ok. 300-400 pC/N [3]. Wadami takich detektorów są ich stosunkowo duże rozmiary, mała wytrzymałość mechaniczna i termiczna oraz trudność wytworzenia przetworników szerokopasmowych. Z tych powodów stosuje się coraz częściej detektory piezopolimerowe, w szczególności wykonane z polifluorku winylidenu (PVDF), charakteryzującego się silnymi właściwościami piezoelektrycznymi, korzystnymi właściwościami mechanicznymi i chemicznymi oraz szerokim pasmem odbieranych częstotliwości – powyżej 1 GHz [1].

Typowy układ pomiarowy EA jest przedstawiony na rys. 1. Przejście nadprzewodnika do stanu normalnego uzyskuje się przez podwyższanie temperatury kontrolowanej termoparą miedź-konstantan. Możliwe jest również badanie EA przy jednoczesnym przepływie prądu przez próbkę. Wtedy oprócz temperatury mierzony jest spadek napięcia na próbce. W niniejszej pracy ograniczono się do pomiaru EA w stanie bezprądowym. Jako detektory zostały użyte zarówno przetworniki ceramiczne jak i polimerowe. Z folii PVDF wykonano konstrukcje przetworników polimerowych, różniące się wymiarami oraz materiałem użytym na powłoki elektrod.



Rys. 1. Układ pomiarowy EA z nadprzewodników wysokotemperaturowych.

3. Wyniki pomiarów i ich omówienie

Badania przeprowadzono na różnych próbkach nadprzewodzących (tab. 1). Rys. 2–7 przedstawiają rezultaty pomiarów emisji akustycznej dla tych próbek. Różnice w wartościach ich temperatur krytycznych pozwalały stwierdzić czy otrzymane impulsy są wynikiem przejścia fazowego.

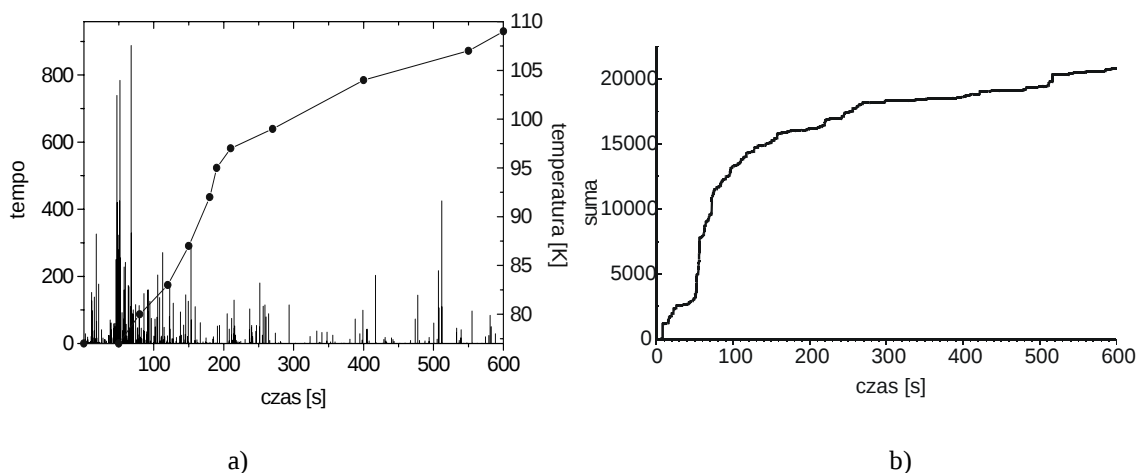
Tab. 1 Wykorzystane próbki oraz ich podstawowe właściwości.

Próbki nadprzewodników	Temperatura krytyczna T_C	Szerokość przejścia ΔT_C
YBaCuO 20% wag. Ag	90 K	2.5 K
YBaCuO 20% wag. Zr	85 K	---
$\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	~ 105 K	2.5 K

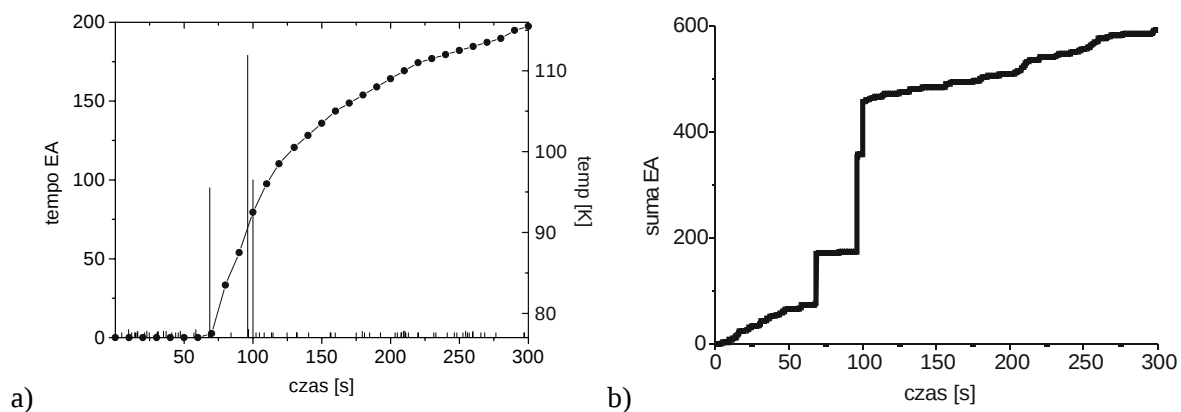
Na rysunku 2 pokazano obraz emisji akustycznej z YBaCuO domieszkowanego 20% wag. Ag, otrzymany przy użyciu detektora ceramicznego PZT 200 kHz, a na rys. 3 przy użyciu detektora polimerowego PVDF. W pierwszym przypadku widoczne jest zagęszczenie impulsów w pobliżu temperatury 85 K, czyli tuż poniżej temperatury krytycznej próbki. Również w drugim przypadku w pobliżu temperatury krytycznej nastąpił wyraźny wzrost liczby rejestrowanych impulsów. W obu przypadkach widoczny jest wyraźny wzrost na wykresie sumy EA.

Na rysunkach 4–5 pokazano tempo i sumę emisji akustycznej otrzymane przy użyciu detektora PZT (rys. 4) oraz detektora piezopolimerowego PVDF dla nadprzewodnika z układu Bi-Sr-Ca-Cu-O. W pobliżu temperatury krytycznej pojawia się zwiększenie ilości impulsów. Zaobserwowano natomiast różnice w wartościach sumy EA.

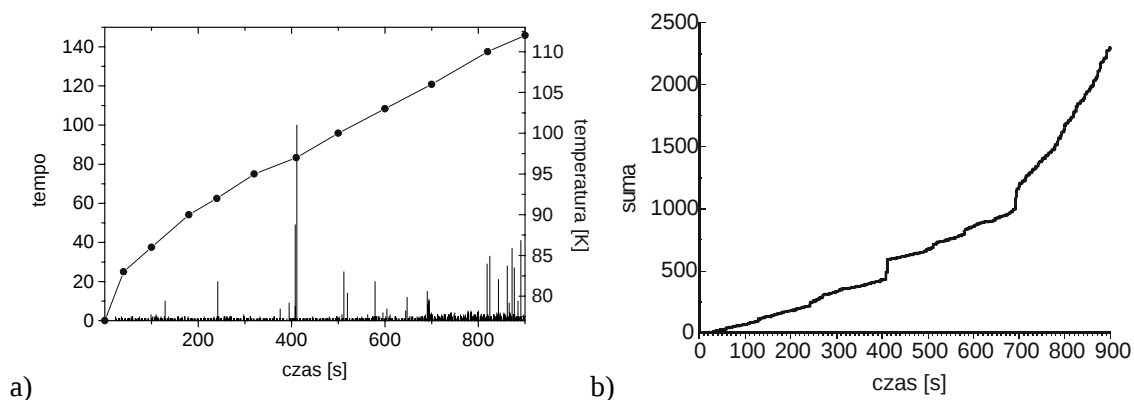
Takie same badania przeprowadzono dla ceramiki YBaCuO domieszkowanej 20% wag. Zr (rys. 6-7). Również i w tym przypadku pobliżu temperatury krytycznej zarejestrowano zagęszczenie impulsów związane z przejściem fazowym.



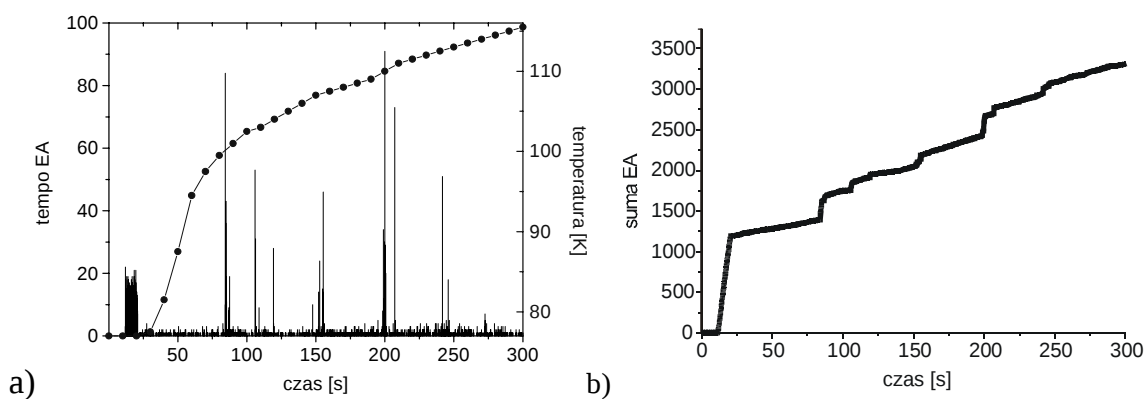
Rys. 2. Emisja akustyczna z próbki $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ domieszkowanej wagowo 20% wag. Ag, detektor PZT 200 kHz, próg dyskryminacji 0.8 V, wzmacnienie 50 dB: a) tempo EA, b) suma EA.



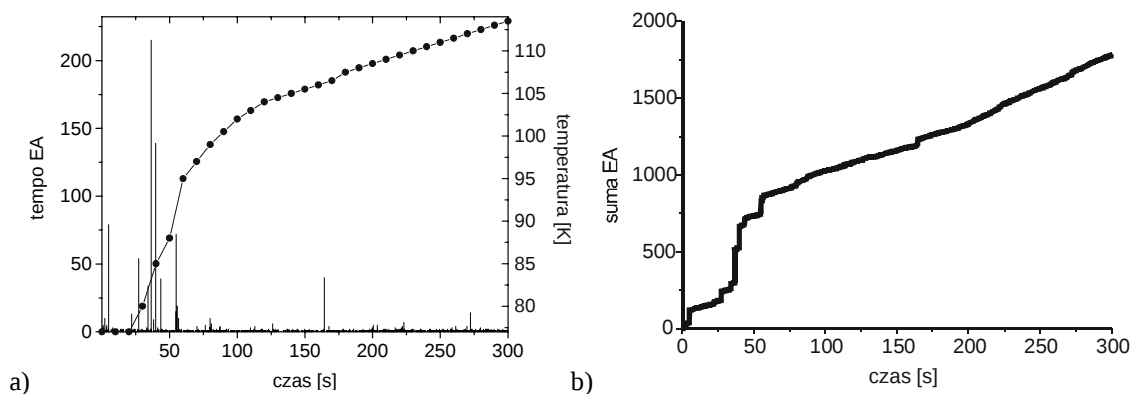
Rys. 3. Emisja akustyczna dla próbki YBaCuO domieszkowanej srebrem 20% wag. Ag, detektor - folia nie metalizowana PVDF laminowana z elektrodami miedzianymi, wzmacnienie 17 dB, próg dyskryminacji 1 V: a) tempo EA, b) suma EA.



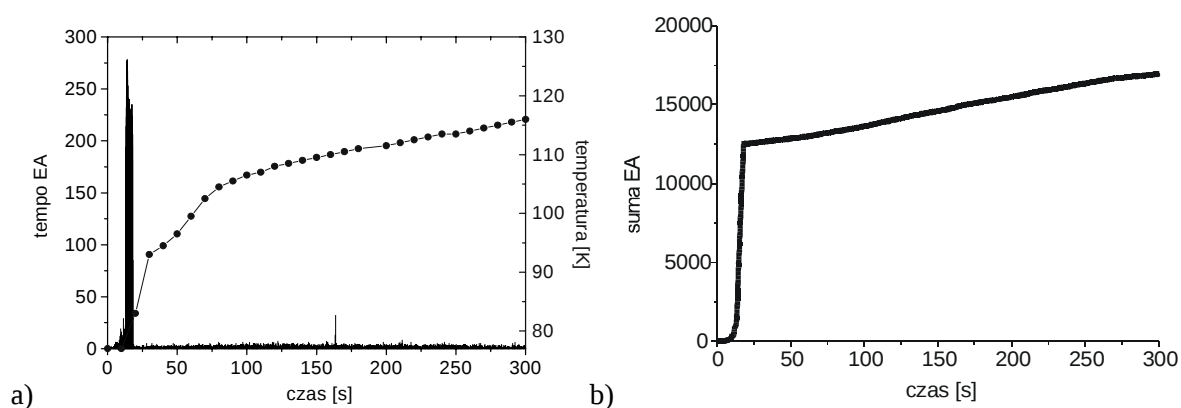
Rys. 4. Emisja akustyczna z próbki $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, detektor PZT 200 kHz, próg dyskryminacji 0.7 V, wzmacnienie 50 dB: a) tempo EA, b) suma EA.



Rys. 5. Emisja akustyczna dla próbki $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ detektor - folia nie metalizowana laminowana z elektrodami srebrnymi średnia, wzmacnienie 9 dB, próg dyskryminacji 1 V: a) tempo EA, b) suma EA.



Rys. 6. Emisja akustyczna z próbki YBaCuO domieszkowanej 20% wag. Zr, detektor PZT 200 kHz, próg dyskryminacji 0.7 V, wzmacnienie 60 dB: a) tempo EA, b) suma EA



Rys. 7. Emisja akustyczna dla próbki YBaCuO domieszkowanej 20% wag. Zr, detektor - folia nie metalizowana laminowana z elektrodami srebrnymi, wzmacnienie 7 dB, próg dyskryminacji 0.7 V: a) tempo EA, b) suma EA.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono możliwość zastosowania czujników piezoelektrycznych wykonanych z folii PVDF jako detektora emisji akustycznej w niskich temperaturach. Emisję akustyczną zaobserwowano dla każdego użytego nadprzewodnika przy wzroście temperatury w pobliżu temperatury krytycznej.

Obrazy emisji akustycznej uzyskane przy użyciu przetworników PVDF i PZT mają podobny charakter. Jednak ze względu na lepsze właściwości mechaniczne PVDF w niskich temperaturach i prostotę wykonania czujnika stosowanie tego detektora w technice EA ma przyszłość.

Wykonanie prostego detektora polimerowego z folii PVDF nie nastęrcza żadnych trudności i nie wymaga żadnej skomplikowanej technologii i aparatury. Mając gotowy półfabrykat, jakim jest folia, można łatwo zbudować taki przetwornik. Jako elektrod można użyć niemalże każdej dowolnej powłoki przewodzącej. Daje to wyraźną przewagę nad detektorami PZT, które wymagają skomplikowanej technologii wytwarzania.

Emisja akustyczna rejestrowana przy użyciu każdego z rodzaju detektorów miała wyraźnie powtarzalny charakter. Suma rejestrowanych impulsów tylko w kilku przypadkach różniła się w znaczący sposób, a impulsy o podobnym natężeniu pojawiały się w pobliżu temperatur krytycznych. Różnice w wartościach tych temperatur wynikają z błędów pomiaru temperatury za pomocą termopary oraz sposobu pomiaru temperatury. Termopara była umieszczana pomiędzy próbką a detektorem, co powodowało dodatkowy błąd, wynikający z nierównomiernego ogrzewania się próbki i detektora.

Stwierdzono również wpływ szybkości ogrzewania na wyniki pomiarów emisji akustycznej. W przypadku zbyt wolnego podwyższania temperatury nie zarejestrowano żadnej emisji, co jest potwierdzeniem, że za zjawisko emisji w przypadku przejścia przy wzroście temperatury jest odpowiedzialne zjawisko gwałtownej zmiany wymiarów nadprzewodnika, powodujące wprowadzenie w drgania sieci krystalicznej.

W dalszych badaniach należy zająć się metodami ekranowania. Jest to równie ważny problem co pomiar temperatury, mający ogromny wpływ na rejestrowane impulsy, a czasami nawet uniemożliwiający poprawny pomiar. Najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby całkowite odizolowanie całego układu pomiarowego oraz ograniczenie połączeń do minimum. Kolejnym ważnym aspektem jest opracowanie sposobu wzorcowania czujników PVDF. Pozwoliłoby to na dokładne określenie charakteru rejestrowanych impulsów, ich rzeczywistego natężenia i częstotliwości.

Praca została sfinansowana przez KBN w ramach badań statutowych Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej nr 341374 (2001).

Literatura

- [1] Kowalczyk D., Woźny L., Mazurek B., Wykorzystanie polifluorku winylidenu do detekcji sygnałów emisji akustycznej, *II Konferencja Naukowa Postępy w Elektrotechnologii*, Szklarska Poręba, 1996, ss. 191-195.
- [2] Skubis J., *Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektrycznych*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, W-wa 1993.
- [3] Kisiel A., Woźny L., Mazurek B. Wykorzystanie czujników z polifluorku winylidenu w diagnostyce urządzeń elektrycznych, *III Konferencja Postępy w Elektrotechnologii*, Szklarska Poręba, 1998, ss. 161-164.
- [4] Kisiel A., Borowicz M., Woźny L., Mazurek B. Wykorzystanie polifluorku winylidenu do detekcji sygnałów akustycznych w niskich temperaturach, *II Konferencja Naukowa Postępy w Elektrotechnologii*, Szklarska Poręba, 1996, ss. 165-167.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



WYBRANE ZAGADNIENIA NORMALIZACJI W
NADPRZEWODNICTWIE

Jacek Sosnowski

Instytut Elektrotechniki

Pracownia Nadprzewodnictwa Wysokotemperaturowego

Zakład NWR

04-703 Warszawa, Pożaryskiego 28

E-mail: sosnow@iel.waw.pl

Abstract

The standarizing activity in the field of superconductivity is presented. The purposes and the importance of this procedure both for material science as well as for the application of the superconductors in the electricity are considered. The works of the technical committee for the special technologies are described, with the emphasis of the standards presently prepared in the subject of superconductivity. These standards contain both low temperature and high temperature superconducting materials in the form of bulk materials, wires and films as well as general standard being the dictionary of the terms used in the superconductivity.

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, standaryzacja, urządzenia nadprzewodnikowe

1. Wstęp

Oczekuje się w najbliższej przyszłości znacznego postępu w zastosowaniu zjawiska nadprzewodnictwa w urządzeniach elektrycznych. Dotyczy to nadprzewodnictwa klasycznego, z którym związany jest znaczny postęp w produkcji drutów nadprzewodnikowych opartych na Nb-Ti i Nb-Sn oraz szeregu nowych konstrukcji technologicznych opartych na Nb-Al i fazach Chevrela, jak też znaczny rozwój nastąpił w przypadku nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego. Wytwarzane są już taśmy z wysokotemperaturowych materiałów nadprzewodnikowych głównie na bazie bizmutu, jak też na bazie itru. Oczekuje się, że nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe właśnie umożliwi pokonanie bariery ekonomicznej ograniczającej zastosowania urządzeń nadprzewodnikowych w przemyśle, ze względu na obniżenie kosztów chłodzenia. Pojawiają się już różne programy zastosowań nadprzewodnictwa w dużej skali

urządzeniach elektrycznych, włączając w to zastosowania w medycynie, w otrzymywaniu obrazów z jądrowego rezonansu magnetycznego MRI, w pociągach lewitujących na magnetycznej poduszce MAGLEV, w magnetycznej separacji, tokamakach stosowanych w reaktorach jądrowych (program ITER), magazynowaniu energii elektrycznej (SMES), prądowych ogranicznikach nadprzewodnikowych, transporcie energii elektrycznej i wielu innych dziedzinach. Wypada nawet pokusić się o stwierdzenie, że właściwie we wszystkich dziedzinach elektryki można będzie w niedalekiej przyszłości lub nawet już obecnie zaproponować nadprzewodnikowe odpowiedniki urządzeń elektrycznych. O ich zastosowaniu decydować będą już normalne prawa ekonomii rynkowej, gdyż wydaje się, że pewien konserwatyzm przemysłu w dobie komputerów i ogólnego postępu technicznego zostaje już stopniowo przełamany. Dotyczy to przede wszystkim urządzeń

Tab. 1. Program prac normalizacyjnych dotyczących kabli mocy (szyn) typu Nb-Ti.

Lp	Nazwa zagadnienia normalizacyjnego	Lata realizacji	Ważność problemu w skali ocen 1-3
1	Iloraz objętości matrycy do nadprzewodnika	4	2
2	Włókna	3	2
3	Skok skręcenia włókien	3	2
4	Struktura kompozytowa	3	2
5	Prąd krytyczny	4.5	3
6	Wpływ naprężeń	2	1.5
7	Straty przemiennoprądowe	4	2
8	Przemienny prąd	2.5	1.5
9	Prąd quenchu przemienny	2	1
10	Krytyczne pole magnetyczne	2.5	1.5
11	Pole magnetyczne nieodwracalności	2	1.5
12	Temperatura krytyczna	2.5	2
13	Iloraz rezystancji resztkowej	4	3
14	Test stabilności	3	2.5
15	Test rozciągłości (w temperaturze pokojowej)	4	3
16	Test rozciągłości (w temperaturze niskiej)	3	2

opartych na nadprzewodnictwie wysokotemperaturowym, które są chłodzone ciekłym azotem, popularnym obecnie gazem technicznym. Większość z tych projektów realizowana jest w ramach współpracy międzynarodowej, co sugeruje między innymi konieczność wprowadzenia procedury normalizacyjnej przy konstrukcji urządzeń nadprzewodnikowych. W celu realizacji zagadnień normalizacyjnych w nadprzewodnictwie powołany został w lipcu 1989 r. Komitet Techniczny TC 90 Nadprzewodnictwo Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC) z siedzibą w Genewie. Omówieniu prac prowadzonych w ramach tego komitetu poświęcona będzie niniejsza praca.

Tab. 2. Program prac normalizacyjnych dotyczących wysokotemperaturowych drutów nadprzewodnikowych opartych na bizmucie.

Lp	Nazwa zagadnienia normalizacyjnego	Lata realizacji	Ważność problemu w skali ocen 1-3
1	Iloraz objętości matrycy do nadprzewodnika	3.5	3
2	Włókna	2.5	2
3	Skok skręcenia włókien	2	1.5
4	Struktura kompozytowa	2	1.5
5	Prąd krytyczny	4.5	3
6	Wpływ naprężeń	3.5	3
7	Straty przemiennoprądowe	3.5	3
8	Przemienny prąd	2.5	2
9	Prąd quenchu przemienny	2.5	2
10	Krytyczne pole magnetyczne	2.5	2
11	Pole magnetyczne nieodwracalności	3	2
12	Temperatura krytyczna	3.5	2
13	Iloraz rezystancji resztkowej	3	2
14	Test stabilności	2	2
15	Test rozciągłości (w temperaturze pokojowej)	3.5	2
16	Test rozciągłości (w temperaturze niskiej)	3	2

2. Działalność Grup Roboczych w ramach TC 90

Działalność Komitetu Technicznego TC 90 Nadprzewodnictwo oparta jest podobnie zresztą jak i działalność innych Komitetów Technicznych IEC na Grupach Roboczych. Komitet ten grupuje przedstawicieli szeregu państw, w tym europejskich, jak też z USA, Japonii i Korei. Wśród krajów europejskich aktywnym członkiem jest Francja i Niemcy, które zorganizowały posiedzenia Komitetu Technicznego TC 90. Polska również jest członkiem typu P tego Komitetu. Przewodniczącym Komitetu Technicznego TC 90 od początku jego istnienia jest przedstawiciel USA, obecnie Dr. L. Goodrich z NIST w Boulder Colorado. Z kolei sekretariat tego Komitetu zlokalizowany jest w Japonii, która odgrywa szczególnie istotną rolę w procesie przygotowania kolejnych dokumentów normalizacyjnych. Komitet Techniczny współpracując z krajowymi Normalizacyjnymi Komisjami Problemowymi skupia 11 komitetów: z Chin, Francji, Włoch, Niemiec, Japonii, Polski, USA, Wielkiej Brytanii, Rosji i Korei Południowej [1-3]. W ramach tych Komitetów działa w obecnym momencie 8 Grup Roboczych, określanych skrótem WG:

Grupa Robocza 1

Grupa ta zajmuje się przygotowaniem Słownika Terminologicznego z zakresu Nadprzewodnictwa. Słownik ten stanowiący już 815 wolumin Słownika Technicznego IEC został przygotowany w 2000 roku jako Norma Europejska i stanowi Normę Europejską (EN) nr. IEC60050-815, która obecnie jest w trakcie ustanawiania jako Polska Norma (PN).

Tab. 3. Program prac normalizacyjnych dotyczących wysokotemperaturowych drutów nadprzewodnikowych opartych na itrze.

Lp	Nazwa zagadnienia normalizacyjnego	Lata realizacji	Ważność problemu w skali ocen 1-3
1	Iloraz objętości matrycy do nadprzewodnika	3.5	2
2	Włókna	2.5	2
3	Skok skręcenia włókien	2	1.5
4	Struktura kompozytowa	2	1
5	Prąd krytyczny	4.5	3
6	Wpływ naprężeń	2.5	2
7	Straty przemiennoprądowe	2.5	2
8	Prąd przemienny	2	2
9	Prąd quenchu przemienny	2	2
10	Krytyczne pole magnetyczne	2.5	2.5
11	Pole magnetyczne nieodwracalności	2.5	2
12	Temperatura krytyczna	3	2.5
13	Iloraz rezystancji resztkowej	2.5	2
14	Test stabilności	2	2
15	Test rozciągłości (w temperaturze pokojowej)	2.5	2
16	Test rozciągłości (w temperaturze niskiej)	2.5	2

Grupa Robocza 2

Grupa ta powołana została do przygotowania standardu dotyczącego pomiaru prądu krytycznego drutów kompozytowych Cu/Nb-Ti, który nosi oryginalną nazwę: Critical Current Test Method for Cu/Nb-Ti wires.

Grupa Robocza 3

Grupa ta zajmuje się analogicznie do Grupy Roboczej 2 przygotowaniem normy dotyczącej metodyki pomiaru prądu krytycznego tlenkowych nadprzewodników ceramicznych. Jest to więc bardzo perspektywiczna Grupa Robocza, zajmująca się aktualnymi materiałami – nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi.

Grupa Robocza 4

WG 4 opracowała dokument normalizacyjny dotyczący metody pomiaru ilorazu rezystancji resztkowej w temperaturze pokojowej i powyżej temperatury krytycznej drutów kompozytowych o składzie Cu/Nb-Ti.

Grupa Robocza 5

Grupa ta przygotowuje dokument normalizacyjny dotyczący metody badania naprężeniowego w temperaturze pokojowej drutów kompozytowych Cu/Nb-Ti.

Grupa Robocza 6

W ramach tej Grupy Roboczej, WG 6 opracowywany jest dokument dotyczący metody pomiaru ilorazu miedzi do nadprzewodnika w drutach kompozytowych Cu/Nb-Ti.

Grupa Robocza 7

Przygotowuje ona dokument roboczy dotyczący metodyki pomiaru prądu krytycznego drutów kompozytowych typu Cu/Nb₃Sn.

Grupa Robocza 8

Ostatnia w tym momencie Grupa Robocza Komitetu Technicznego TC 90, WG 8 zajmuje się zagadnieniem metody pomiarowej rezystancji powierzchniowej nadprzewodnikowych cienkich warstw.

Oprócz wymienionej powyżej problematyki prowadzone są prace przygotowawcze nad opracowaniem nowych dokumentów normalizacyjnych. Schemat i zakres czasowy tych dokumentów przedstawiony jest w Tabl. 1-3.

Działalność Grup Roboczych wymienionych powyżej oparta jest na zespołach ekspertów mianowanych przez poszczególne Komitety Krajowe do udziału w poszczególnych Grupach Roboczych nad przygotowaniem określonych dokumentów roboczych.

3. Działalność Normalizacyjnej Komisji Problemowej NKP 290 z zakresu nadprzewodnictwa

W Polsce działa Normalizacyjna Komisja Problemowa NKP 290 ds. Technik Specjalnych, zajmująca się między innymi normalizacją w zakresie nadprzewodnictwa. Polska ma status członka typu P, czyli aktywnego w porównaniu do członków typu O – obserwatorów. Obliguje to nas do aktywnego głosowania nad wszystkimi dokumentami normalizacyjnymi. Należy bowiem zaznaczyć, że dokumenty opracowane przez Grupy Robocze rozsyłane są w różnych stadiach do Komisji Krajowych w celu naniesienia poszczególnych uwag, poprzedzających finalne uchwalenie Normy Europejskiej, a następnie Polskiej Normy będącej jej odpowiednikiem.

Bieżące prace naszej Komisji są skoncentrowane przede wszystkim nad opracowaniem Polskiej Normy będącej odpowiednikiem Europejskiej Normy Słownika Elektrotechnicznego zatytułowanego Nadprzewodnictwo. Jest to 815 wolumin Międzynarodowego Słownika Elektrotechnicznego. Prowadzone są również bieżące prace z zakresu opiniowania dokumentów normalizacyjnych nadesłanych przez Sekretariat Komitetu Technicznego TC 90 oraz popularyzacją tych zagadnień w Polsce.

Poza przygotowaniem Słownika z dziedziny nadprzewodnictwa w najbliższym planie naszej Komisji jest opracowanie dwóch dalszych polskich norm z opartych na ustanowionych oryginałach europejskich zatytułowanych: Test Method for DC Critical Current of Nb-Ti Composite Superconductors opublikowanej w 1998 r. nr IEC61788-1 oraz DC Critical Current of Nb₃Sn Composite Superconductors opublikowanej w 1999 r. nr IEC61788-2.

Jakkolwiek osobowo zespół naszych specjalistów z dziedziny nadprzewodnictwa wchodzących w skład Normalizacyjnej Komisji Problemowej ds. Technik Specjalnych jest nieliczny, to jednak konsultujemy opinie z tak zwaną Grupą Roboczą ds. Nadprzewodnictwa, skupiającą ekspertów z tej dziedziny z całej Polski.

4. Wnioski

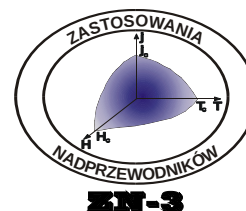
Podsumowując ten artykuł zauważmy, że dotychczasowe prace z zakresu normalizacji w nadprzewodnictwie dotyczą głównie zagadnień materiałowych, podczas gdy w najbliższej przyszłości oczekuje się przesunięcia punktu ciężkości na problematykę urządzeń nadprzewodnikowych, gdyż normalizacja jest przede wszystkim wymagana w przypadku przemysłowego zastosowania także materiałów nadprzewodnikowych. Ogólny istotny cel prac normalizacyjnych jest związany także z włączeniem Polski do Unii Europejskiej, co wymaga dostosowania systemów normalizacyjnych poszczególnych państw.

Literatura

- [1] Report on Superconductivity International Standardization Vision, *International Superconductivity Technology Center*, March 1999.
- [2] International Electrotechnical Vocabulary, part 815: *Superconductivity*, 60050-815 IEC.
- [3] Sosnowski J., Standardisation problems in the superconductivity, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z. 197, s. 97-101, 1998.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



WYBRANE ZAGADNIENIA WYKORZYSTANIA
ELEKTROMAGNESU NADPRZEWODNIKOWEGO
DO FILTRACJI MAGNETYCZNEJ

Antoni Cieśla

Zakład Elektrotechniki, Akademia Górniczo - Hutnicza
al. Mickiewicza 30, 30 -059 Kraków,
E-mail: aciesla@uci.agh.edu.pl

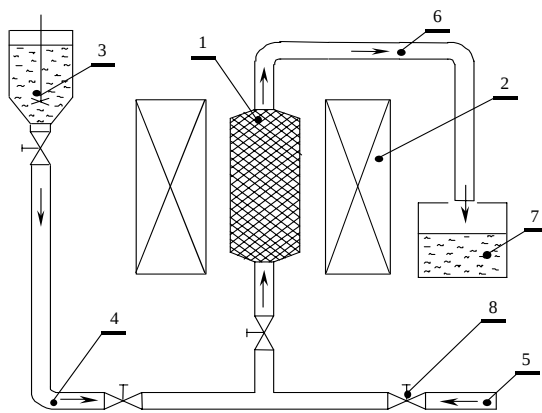
Abstract

Superconductor separators are a new generation of magnetic separators; as a source of magnetic field a DC superconductor electromagnet is used. It creates, between other things, a chance to reject weak-magnetic particles as well as extra small ones (the basic problem for beneficiation of useful minerals). The subject of the following consideration is one of the possible constructions: a matrix high-gradient separator equipped with the DC superconductor electromagnet. Some practical aspects of the application as well as the conditions to use the separator are presented.

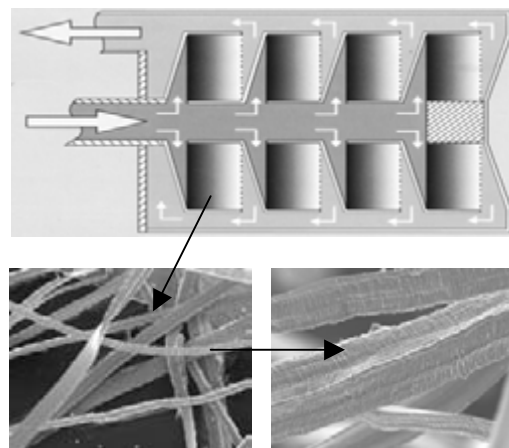
Słowa kluczowe: filtracja magnetyczna, nadprzewodnikowy separator wysokogradientowy, siła pola magnetycznego.

1. Wstęp

Nową metodą wzbogacania, rozwijaną od kilku lat w świecie, jest metoda magnetycznej separacji wysokogradientowej (High Gradient Magnetic Separation - HGMS) z wykorzystaniem elektromagnesów nadprzewodnikowych jako źródeł pola magnetycznego. Metoda ta stwarza nowe możliwości wydzielania składników zawartych w surowcach a niedostępnych zarówno dla dotychczas stosowanych technik separacji magnetycznej jak i wszelkich innych fizycznych metod rozdziału [1]. Jedną z odmian konstrukcyjnych separatora wysokogradientowego jest separator matrycowy, którego budowę pokazano na schemacie na rys. 1. W polu magnetycznym generowanym przez uzwojenie o konstrukcji osiowo - symetrycznej (solenoid) znajduje się matryca, w której zachodzi proces wychwytywania



Rys. 1. Wysokogradientowy filtr magnetyczny
1 - matryca filtra, 2 - uzwojenie elektromagnesu nadprzewodnikowego, 3 - zbiornik zawiesiny poddawanej filtracji,
4 - strumień zawiesiny, 5 - strumień wody czyszczącej,
6 - strumień produktu filtracji 7 - zbiornik produktu separacji,
8 – zawór.



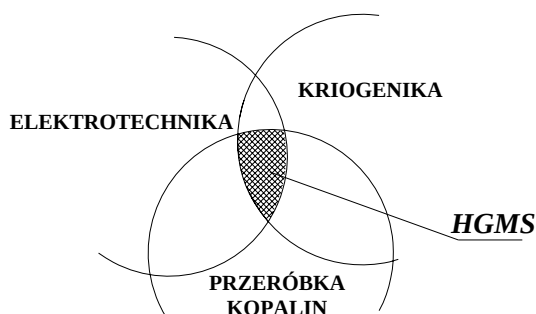
Rys. 2. Jedno z możliwych rozwiązań matrycy filtra i jej wypełnienie nierdzewną stalową watą ferromagnetyczną (stainless steel wool)
(kolejne powiększenia wypełnienia matrycy watą stalową).

cząstek z przepływającej przez nią zawiesiny rozdzielanego materiału. Matryca stanowi wypełnienie komory roboczej separatora i wykonana jest z materiału ferromagnetycznego w postaci siatek, wiórek lub waty (rys. 2). W przypadku gęstego upakowania wypełnienia np. watą stalową, w komorze roboczej separatora, urządzenie takie może spełniać rolę filtra magnetycznego.

W literaturze przedmiotu [2], można znaleźć opis szeregu praktycznych zastosowań separatorów wysokogradientowych (także z magnesami nadprzewodzącymi) np. do wzbogacania rud żelaza (ilmenit, hematyt, goetyt, limonit), minerałów paramagnetycznych (wolframit, chromit, ilmenit), usuwania minerałów paramagnetycznych (syderytu lub ilmenitu z kasyterytu). W cytowanych pracach opisano także konkretne instalacje przemysłowe, np. zbudowany przez firmę CARPCO SMS nadprzewodnikowe urządzenie pod nazwą CRYOFILTER generujące pole o indukcji 5 T stosowane do separacji bardzo drobnych cząstek (m. in. do uszlachetniania kaolinu). Innym przykładem opisanym w pracy [2] są separatory HGMS budowane przez firmę SVEDALA PUMPS & PROCESS, które pracują m.in. w Norwegii (wzbogacanie ilmenitu), Finlandii (wzbogacanie drobno uziarnionego chromitu), w Abu Tartur w Egipcie (wzbogacanie apatytu). W pracach Mathieu i Sirois [3] oraz Watsona [4] opisano zastosowanie przemysłowych separatorów nadprzewodnikowych oznaczających się wydajnościami rzędu 50 do 200 Mg/godz. do wydzielania koncentratów żelaza z drobnoziarnistych mułów odpadowych a także koncentratów chromu, wolframu i manganu z ubogich rud i mułów z zakładów przeróbczych.

W kraju prace nad wdrożeniem separatorów nowej generacji jakimi bez wątpienia są separatory nadprzewodnikowe do praktyki przemysłowej przebiegają stosunkowo wolno. Decydują o tym zarówno względy materialne (duże koszty inwestycyjne) jak i psychologiczne (nowa technika, ekstremalne warunki eksploatacji). Argumentem przemawiającym za rozwojem przedstawionego typu konstrukcji separatorów będą wyniki uzyskiwane na urządzeniu na skalę laboratoryjną. Muszą one być atrakcyjne zarówno pod względem technicznym jak i ekonomicznym. Dla pełnej oceny skuteczności proponowanego procesu

wzbogacania magnetycznego i jego ekonomicznych aspektów konieczne jest przeprowadzenie pełnego cyklu badań technologicznych poczynając od modelowania procesu ekstrakcji ziaren w matrycy separatora wysokogradientowego, poprzez weryfikację eksperymentalną i określenie warunków technicznych możliwości aplikacji tego typu urządzenia w ciągu technologicznym. Ze względu na złożoność problematyki, badania takie muszą być prowadzone przez specjalistów kilku dziedzin nauki i techniki. Problem jest bowiem interdyscyplinarny, łączy przeróbkę kopalin, elektrotechnikę i kriogenikę. Obrazowo pokazano to na rysunku 3.



Rys. 3. Separacja wysokogradientowa z zastosowaniem nadprzewodnictwa jako problem interdyscyplinarny.

2. Filtracja magnetyczna jako proces technologiczny

Filtracja magnetyczna - ważny element nowoczesnych procesów produkcyjnych - oparta jest na wykorzystaniu różnicy własności magnetycznych minerałów użytecznych i skały płonnej. Własności te charakteryzuje podatność magnetyczna χ_c . Podział surowców mineralnych na silnie magnetyczne, słabo magnetyczne oraz niemagnetyczne determinuje ich przeróbkę.

Podstawowe wielkości wpływające na skuteczność procesu separacji magnetycznej, które muszą być poddane analizie teoretycznej i eksperymentalnej można ogólnie sklasyfikować następująco:

1. **wielkości fizyczne separowanego materiału** (podatność magnetyczna ziaren poddawanych separacji, podatność magnetyczna ziaren skały płonnej, rozkład uziarnienia obu składników, stopień uwolnienia),
2. **wielkości charakteryzujące pole magnetyczne i matrycę separatora** (wielkość indukcji magnetycznej, rozkład pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora, typ matrycy separatora, rodzaj wypełnienia matrycy, stopień upakowania, materiał matrycy, sposób czyszczenia matrycy),
3. **wielkości charakteryzujące nadawę** (gęstość nadawy, prędkość przepływu nadawy, skład jonowy fazy rozpraszającej),
4. **obróbka wstępna nadawy** (kondycjonowanie, przygotowanie odpowiednich klas ziarnowych nadawy, odmulanie, dyspersja, określenie warunków fizykochemicznych, pH itp.).

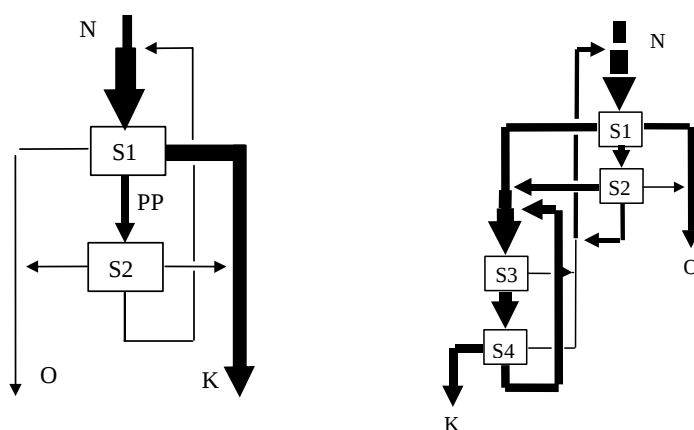
Poznanie i zrozumienie wpływu tych wielkości na prawidłowy przebieg filtracji w matrycy stanowi jedyną możliwość opracowania fizycznego modelu przy pomocy którego będzie można skutecznie sterować procesem ekstrakcji cząstek słabomagnetycznych i drobno uziarnionych z zawiesiny.

W tabeli 1 pokazano rezultaty wzbogacania węgla kamiennego. Próbę przeprowadzono na węglu z kopalni Janina w polu magnetycznym o indukcji 2 T.

Tab. 1. Rezultaty wzbogacania węgla z kopalni "Janina" (indukcja $B = 2 \text{ T}$).

	siarka %	popiół %	γ %	ϵ_s %	ϵ_p %
nadawa	2,40	25,72	100,00	100,00	100,00
pr. niemagnet	1,39	22,42	87,77	50,85	76,60
pr. magnetyczny	9,67	44,10	12,23	49,15	23,40

Analiza uzyskanych rezultatów wskazuje, że stopień odsiarczenia (usunięcia pirytu) z węgla jest zadowalający, jednakże stopień odpopielenia nie jest już tak dobry. Oznacza to, że dla usunięcia składników popiołonośnych z węgla należy dobrać odmienne warunki procesu separacji, które uwzględniłyby wszystkie wymienione powyżej czynniki. Tak więc schemat procesu technologicznego separacji i filtracji jest bardzo często złożony. Przykłady złożonych schematów technologicznych pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowe schematy złożonego procesu technologicznego filtracji magnetycznej.

3. Model filtracji magnetycznej

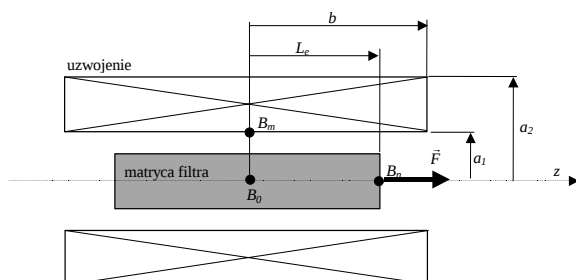
Określenie rozkładu pola w przestrzeni roboczej filtra

a) Stan statyczny

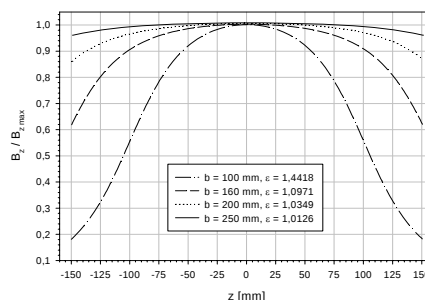
Matryca filtra powinna znajdować się w jednorodnym polu magnetycznym dla stworzenia jednakowych warunków procesu technologicznego (filtracji zawiesiny). Należy zatem dobrać kształt uzwojenia nadprzewodnikowego wzbudzające pole magnetyczne o założonej jednorodności.

Na rys. 5. pokazano konfigurację uzwojenia elektromagnesu najczęściej wykorzystywaną dla wzbudzania pola magnetycznego w filtrze magnetycznym. Zakreskowany obszar w centrum uzwojenia oznacza matrycę ferromagnetyczną filtra. Podstawowe zależności obowiązujące przy określaniu rozkładu pola w tego typu konfiguracji oraz analizę zagadnienia autor przedstawił m. in. w [5]. Na rys.6 przedstawiono zależności względnej wartości indukcji magnetycznej dla rozwiązania z rys. 5 dla różnych geometrii uzwojenia solenoidalnego. Analizowany rozkład pola dotyczy długości $z = \pm 150 \text{ mm}$ i wynika z długości matrycy ($2L_e = 300 \text{ mm}$). Widać, że rozważane geometrie dopiero przy znacznej (w porównaniu z długością matrycy) długości uzwojenia wzbudzają jednorodne pole magnetyczne. Dla takich gabarytów

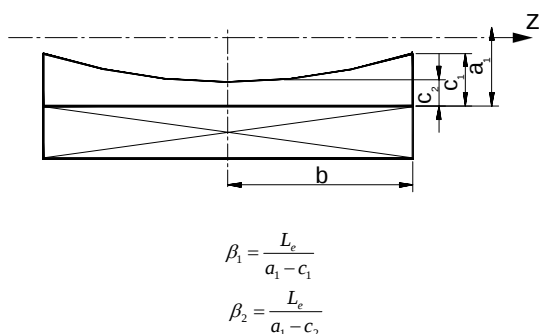
uzwojenia wymagana jest znaczna ilość drogiego przewodu nadprzewodzącego. W [5] rozważa się zatem inne rozwiązania. Jeden z przykładów proponowanej konstrukcji uzwojenia pokazuje rys. 7, natomiast rozkład pola dla tej konstrukcji – rys. 8.



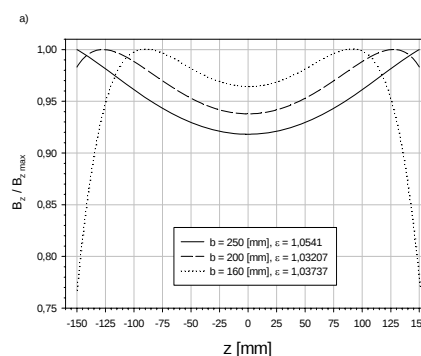
Rys. 5. Konfiguracja uzwojenia solenoidalnego.



Rys. 6. Rozkład względnej wartości indukcji magnetycznej w osi solenoidu z rys. 5.



Rys. 7. Konfiguracja uzwojenia z dozwojeniami.

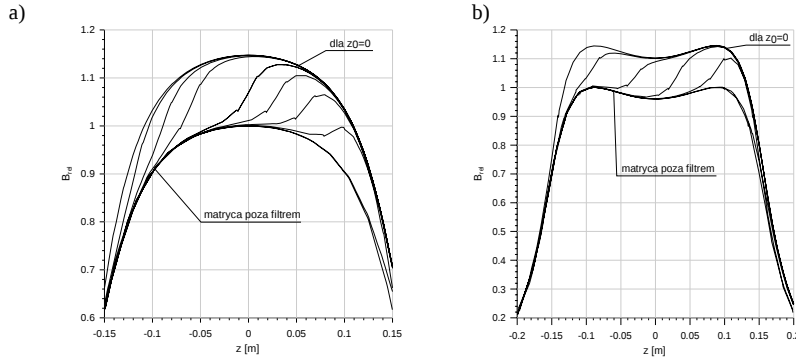


Rys. 8. Rozkład względnej wartości indukcji magnetycznej w osi uzwojenia z rys. 7.

Rozkład pola przedstawiony na rys. 8 wyznaczono numerycznie. Dla porównania otrzymanych rezultatów wprowadzono parametr $\epsilon = B_{z, max} / B_{z, ave}$, gdzie: $B_{z, max}$ jest maksymalną wartością B_z , a $B_{z, ave}$ – wartością średnią B_z . Z porównania tego parametru widać, że najbardziej przydatnym rozwiązaniem jest konstrukcja z rys. 7 z następującymi parametrami: $b = 200$ mm, $\beta_1 = 6$, $\beta_2 = 3,75$.

b) Stan dynamiczny

Wprowadzenie matrycy filtra, która jest porowatym elementem ferromagnetycznym, w przestrzeń roboczą filtra, zmienia wartość indukcji. Przemieszczanie matrycy powoduje zmianę rozkładu pola magnetycznego. Na rysunku 9 przedstawiono obliczone numerycznie rozkłady indukcji w osi uzwojenia dla rozważanych konstrukcji o określonej wartości współczynnika upakowania matrycy κ (i odpowiadającej mu własności magnetycznych μ_z – zastępczej względnej przenikalności magnetycznej). Krzywe rozkładu wartości względnej indukcji w osi z filtra zostały wyznaczone dla ustalonych położenia matrycy w przestrzeni roboczej filtra (położenie wyjściowe: $z_0 = 0$ – matryca w centrum; położenie końcowe – matryca poza polem). Pokazano także rozkład indukcji dla położenia pośrednich matrycy w przestrzeni filtra.



Rys.9. Rozkład względnej wartości indukcji magnetycznej w osi solenoidu przy przemieszczaniu matrycy wzdłuż osi z:

a) dla konfiguracji z rys. 5,
b) dla konfiguracji z rys.7
(dla matrycy o $\mu_z = 1,18$).

Widać, że wraz z przemieszczaniem matrycy wzdłuż osi filtra, istotnej deformacji ulega rozkład pola magnetycznego w przestrzeni filtra. Stopień tej deformacji wzrasta wraz ze wzrostem współczynnika upakowania waty ferromagnetycznej w matrycy. W obliczeniach przyjęto rzeczywiste wartości tego współczynnika występujące w urządzeniach technicznych (5 - 20%). Odpowiada to zastępczej względnej przenikalności magnetycznej ferromagnetycznego ośrodka porowatego z zakresu wartości $\mu_z = 1,18; \div 5$ [6].

Makroskopowy model filtracji

Wygodnym narzędziem do analizy zjawisk zachodzących w matrycy filtra jest tzw. model mikroskopowy, w którym rozpatruje się przepływ zawiesiny przez porowaty ośrodek ferromagnetyczny z uwzględnieniem wymiany masy pomiędzy zawiesiną i ośrodkiem [7]. Wykorzystuje się następujące równania:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \beta C(x,t) \left[1 - \frac{P(x,t)}{A} \right] \quad (1) \quad \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} + v_0 \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

gdzie $P(x,t)$ jest koncentracją cząstek osadzonych w matrycy, $C(x,t)$ koncentracją cząstek przepływających przez matrycę, A jest maksymalną wartością koncentracji C , β jest współczynnikiem aktywności procesu filtracji uwzględniającym wszystkie zjawiska występujące przy osadzaniu cząstek w matrycy.

Rozwiązanie równań (1) i (2) z uwzględnieniem warunków początkowych ma postać [6]:

$$P(x,t) = \begin{cases} A \frac{e^{-\frac{C_0 \beta}{v_0}(x-v_0)} - 1}{e^{-\frac{C_0 \beta}{v_0}(x-v_0)} + e^{-\frac{A \beta}{v_0}x} - 1} & \text{dla } x - v_0 \leq 0 \\ 0 & \text{dla } x - v_0 > 0 \end{cases} \quad (4) \quad \text{gdzie:} \quad \beta = \frac{2R_k \lambda_0 v_0}{S_k \epsilon_0} \quad (6)$$

$$C(x,t) = \begin{cases} C_0 \frac{e^{-\frac{C_0 \beta}{v_0}(x-v_0)}}{e^{-\frac{C_0 \beta}{v_0}(x-v_0)} + e^{-\frac{A \beta}{v_0}x} - 1} & \text{dla } x - v_0 \leq 0 \\ 0 & \text{dla } x - v_0 > 0 \end{cases} \quad (5) \quad A = \frac{\epsilon_0}{4} \rho_c (a^2 - 1) \quad (7)$$

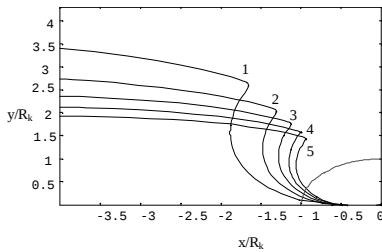
$$2R_k \lambda_0 = D \left(\frac{4d^2 \chi_c H_0 H_p S_c}{9\pi \eta v_0} \right)^{1/3} \quad a = \frac{r_{msr}}{R_k}$$

Pełny opis modelu matematycznego i objaśnienie użytych oznaczeń autor zaprezentował m.in. w [6].

W celu przeprowadzenia analizy wpływu czynników na efektywność pracy filtra, autor proponuje przekształcenie wzoru (5) (dla $x = L_m$) do postaci:

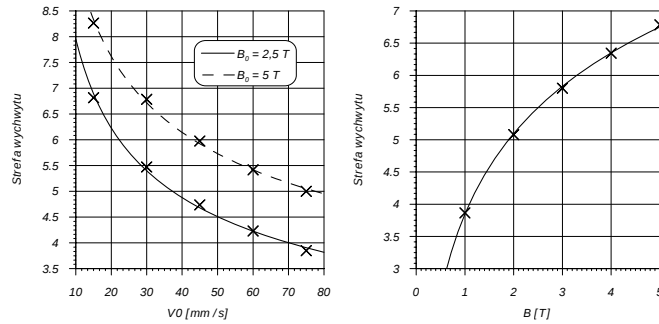
$$\frac{C(x,t)}{C_0} \Big|_{x=L_m} = \frac{C_{wy}(t)}{C_0} = N = \frac{1}{1+e^U(e^T-1)} \quad (8) \quad \text{gdzie: } U = \frac{C_0 \beta}{A} \left(\frac{x}{v_0} - t \right), \quad T = \frac{\beta x}{v_0}$$

Zależność (8) pozwala na wskazanie wielkości umożliwiających celową ingerencję w proces technologiczny jakim jest filtracja. Wielkościami tymi są: prędkość przepływu zawiesiny przez matrycę v_0 , współczynnik upakowania ośrodka porowatego elementami ferromagnetycznymi ε , średnica elementu gradientotwórczego (kolektora ferromagnetycznego) R_k . Wielkości te decydują o szerokości strefy wychwytu kolektora ferromagnetycznego $2R_k \lambda_0$. Wyznacza się ją określając torzy cząstek zmierzające do kolektora. Na rysunku 10 pokazano wyznaczone numerycznie fragmenty przykładowych torów ziaren, natomiast rys. 11 pokazuje zależność szerokość strefy wychwytu od wybranych parametrów.



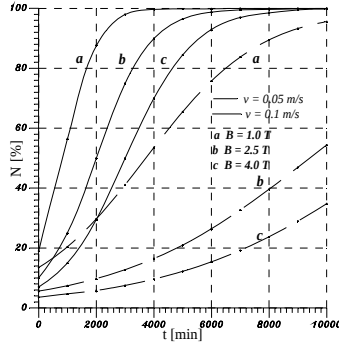
Rys. 10. Przykłady trajektorii ziaren dla różnych prędkości przepływu:

1 - $v_0 = 0.015 \text{ ms}^{-1}$, 5 - $v_0 = 0.075 \text{ ms}^{-1}$ (wartości co 0.015 ms^{-1}), przy indukcji $B_0 = 2,5 \text{ T}$.

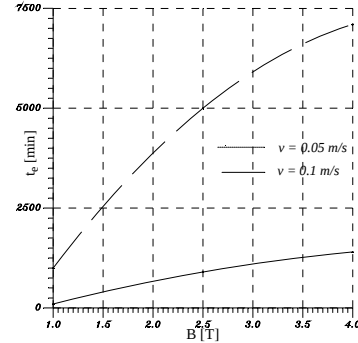


Rys. 11. Zależność szerokości strefy wychwytu ziaren od prędkości przepływu zawiesiny przez matrycę separatora dla $B_0 = 2,5 \text{ T}$ i $B_0 = 5 \text{ T}$ (a) i indukcji pola magnetycznego w matrycy separatora dla $v_0 = 0.03 \text{ ms}^{-1}$ (b).

Jednak najistotniejszą wielkością decydującą nie tylko o jakości procesu, lecz także o długości pracy urządzenia (efektywny czas pracy filtra) jest wartość indukcji pola magnetycznego. Potwierdzeniem powyższej tezy jest rysunek 12, na którym pokazano zależność $N = f(t)$ dla trzech wartości indukcji magnetycznej i dwóch wartości prędkości przepływu zawiesiny przez matrycę. Koncentracja cząstek na wyjściu separatora odniesiona do koncentracji wejściowej C_0 zmienia się dość znacznie z upływem czasu separacji. Jeżeli żądać się będzie określonej koncentracji zawiesiny na wyjściu separatora, to proces separacji należy przerwać po upływie czasu, który definiuje się jako efektywny czas pracy filtra i oznacza symbolem t_e . Po upływie czasu t_e współczynnik N przekroczy założoną wartość. Dla przykładu, przyjęto, że wartość N nie powinna przekroczyć 20% i na podstawie danych z rys. 12 sporządzono wykres zależności czasu t_e od indukcji pola magnetycznego (rys 13). Widać, że ze wzrostem B istotnie wydłuża się efektywny czas pracy separatora. Wzrasta zatem również wydajność procesu filtracji. Przedstawione dane jednoznacznie wskazują na celowość stosowania silnych pól magnetycznych w procesie filtracji, a zatem na zastosowanie do wzbudzania tych pól magnesów nadprzewodnikowych.



Rys. 12. Zmiana współczynnika N w funkcji czasu trwania filtracji t.



Rys. 13. Wpływ wielkości indukcji magnetycznej na długość efektywnego czasu filtracji t_e .

4. Cykliczny charakter pracy filtra

Po upływie czasu t_e , należy przywrócić matrycy jej własności akumulacyjne. Czyni się to przy odwzbudzonym magnesie, bądź wymieniając matryce w obecności pola magnetycznego. Pierwszy sposób wymaga szybkiego załączania i wyłączania elektromagnesu. W [7] autorzy opisują konstrukcję uzwojenia, która umożliwia zasilanie uzwojenia z prędkością narastania pola do 9 T/min. Wydaje się jednak, że dla dużych konstrukcji elektromagnesów uzyskiwanie takich prędkości narastania prądu będzie trudne do osiągnięcia. Wymagane jest bowiem skonstruowanie uzwojenia o małej indukcyjności i bardzo dobrej stabilizacji. Zatem drugi sposób przywracania matrycy jej zdolności akumulacyjnych znalazł powszechne zastosowanie.

Przy wymianie matryc w obecności pola magnetycznego należy pokonać siłę oddziaływania pola magnetycznego na ferromagnetyk. Siła ta opisana jest zależnością:

$$\vec{F} = \frac{dW}{dz} \vec{1}_z \quad (9)$$

gdzie: dW – zmiana energii pola magnetycznego spowodowana przemieszczeniem elementu ferromagnetycznego, dz – przesunięcie elementu.

Ze względu na symetrię układu z rys. 1. rozważa się siłę działającą na matrycę wzdłuż osi z. (patrz oznaczenia na rys. 5). Własności magnetyczne matrycy opisuje się wektorem magnetyzacji ferromagnetyka wypełniającego matrycę $\vec{M}$ [Am^{-1}]. W obszarze zajmowanym przez matrycę panuje pole magnetyczne o indukcji $\vec{B}$ i gradiencie $\nabla \vec{B}$. Zatem, siłę oddziaływania pola magnetycznego na ferromagnetyk można wyrazić następująco [8]:

$$\vec{F} = - \iiint_V (\vec{M} \nabla) \vec{B} dV \quad (10)$$

Dla ustalonych wymiarów matrycy: długość $2L_e$ i przekrój S , wzór (10) przyjmie postać:

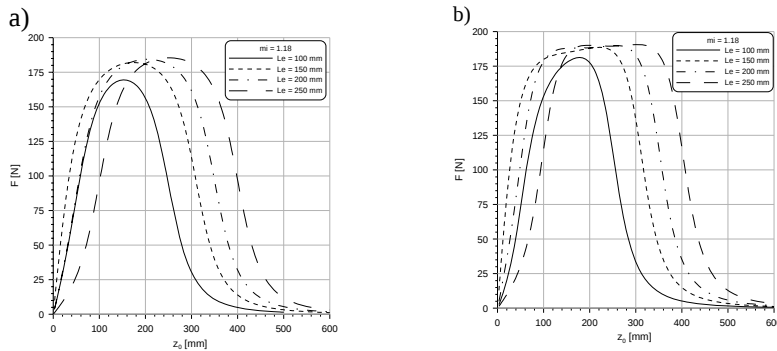
$$\vec{F} = -S \int_{B(z_2)}^{B(z_1)} \vec{M} d\vec{B} \quad (11)$$

Wyznaczenie całki we wzorze (11) jest trudne ze względu na zależność wektora magnetyzacji $\vec{M}$ od indukcji magnetycznej $\vec{B}$. Wyznaczenie takiej zależności dla ośrodka porowatego jakim jest matryca jest złożona i wymaga dodatkowych studiów. Autor przyjmuje do obliczeń siły, stałą - niezależną od $\vec{B}$ - wartość magnetyzacji: magnetyzację

nasycenia M_s , która dla badanego materiału ferromagnetycznego wynosi $2,16/\mu_0$ [Am⁻¹]. Zgodnie z modelem prezentowanym w [8] uzależniają tą wartość od współczynnika upakowania matrycy watą ferromagnetyczną κ . Ostatecznie więc wzór określający siłę przybiera postać:

$$\vec{F} = -AM_s(\kappa)[B(z_1) - B(z_2)]\vec{1}_z \quad (12)$$

Na podstawie zależności (12) określono siłę (wyrażoną w niutonach) działającą na matrycę o różnym stopniu upakowania przy jej przemieszczaniu w przestrzeni roboczej filtra, dla rozważanych w p. 3 geometrii uzwojenia. Rezultaty obliczeń przedstawiono na kolejnych rysunkach.



Rys. 14. Zależność siły działającej na matrycę filtra w zależności od długości matrycy:

- a) dla konfiguracji z rys. 3,
- b) dla konfiguracji z rys. 5

(dla matrycy, której $\mu_z = 1,18$).

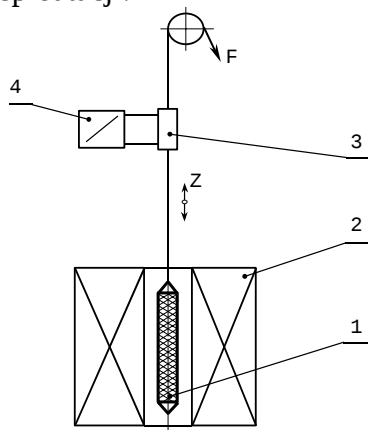
Przeprowadzono serię eksperymentów mających na celu pomiar siły działającej na matrycę. Na rys. 15 przedstawiono układ pomiarowy, natomiast na rysunku 16 - rezultaty pomiarów.

5. Podsumowanie

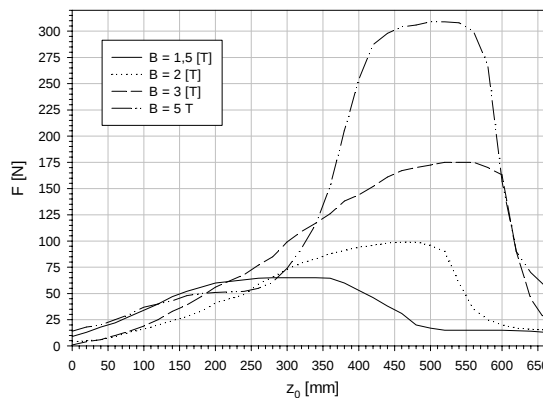
Zasadniczym wnioskiem płynącym z przedstawionego materiału jest, że uzasadnione jest stosowanie elektromagnesów nadprzewodnikowych do wzbudzania silnego pola magnetycznego w filtrach magnetycznych. Jednak w przypadkach stosowania dużych indukcji, oprócz wzrostu efektywnego czasu pracy, wzrasta także czas martwy w cyklu pracy filtra. Związane jest to z koniecznością stosowania małych prędkości zasilania elektromagnesu a także małych prędkości przemieszczania matrycy w kanale separatora.

Zaproponowany w pracy model pozwala na określenie rozkładu pola magnetycznego wewnątrz obszaru roboczego filtra oraz siły działającej na matrycę. Znajomość tej siły umożliwia wykonanie odpowiedniej konstrukcji uzwojenia i jego mocowania w kriostacie elektromagnesu. Istotnym problemem jest minimalizacja tej siły celem ograniczenia ewentualnych negatywnych skutków jej działania w postaci utraty nadprzewodnictwa przez uzwojenie nadprzewodzące. Zachodzi sprzeczność między koniecznością ustabilizowania warunków eksploatacji, czego wymaga wysoki stopień pewności pracy w stanie nadprzewodnictwa, a efektywnością procesu technologicznego, w którym użyto elektromagnesu z uzwojeniem nadprzewodnikowym. W realnych zagadnieniach technicznych konieczny jest kompromis między sprzecznymi wymogami. Osiągnięcie takiego kompromisu wymaga wszechstronnej optymalizacji elektromagnesu nadprzewodnikowego - począwszy od dobo-

ru przewodu nadprzewodnikowego, poprzez konstrukcję uzwojenia, aż do prawidłowej jego eksploatacji.



Rys. 15. Układ do pomiaru siły magnetycznej
1 – matryca filtra, 2 – uzwojenie elektromagnesu,
3 – tensometr, 4 – mostek pomiarowy.



Rys. 16. Rezultaty pomiarów siły magnetycznej.

Literatura

- [1] Svoboda J.: *Magnetic Methods for the Treatment of Minerals*. Elsevier Science Publishers B.V., 1987.
- [2] Brevis T. Magnetic Separation, *Mining Magazine*, Vol. 175, No. 4, October 1996, pp. 192 - 202.
- [3] Mathieu G. I., Sirois L. L., Advances in technology of magnetic separation. *Proceed. XVI International Mineral Processing Congress*. E. Forsberg, Ed., Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 1988, pp. 937 - 950.
- [4] Watson J.H.P: Status of Superconducting Magnetic Separation in the Mineral Industry. *Minerals Engineering*, Vol. 7, No.5/6, pp. 737 - 746, 1994.
- [5] Cieśla A., Garda B., Sykulski J.: Shaping of Magnetic Field Distribution in a High Gradient Magnetic Filter, *Proceed. 13 th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields Compumag*, Evian, Francja, July 2-5 2001r, vol. 2., pp.: 62 – 63
- [6] Cieśla A.: Analiza stanów pracy separatora matrycowego z elektromagnesem nadprzewodnikowym jako źródłem pola, *Wydawnictwa AGH, seria: Rozprawy, Monografie, Nr 44*, Kraków 1996.
- [7] Luguang Yan et al.: A Fast-ramp Superconducting Magnet for HGMS, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, no. 4, July 1996, pp: 2707 – 2709.
- [8] Cieśla A., Garda B.: Analiza ruchu porowatego ośrodka ferromagnetycznego w polu magnetycznym filtra nadprzewodnikowego, *Prace XXIV Międzynarodowej Konferencji z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC – SPETO 2001*, Gliwice – Ustroń 23 – 26.05 2001, str. 135 – 138.

Prezentowana praca była sponsorowana przez Komitet Badań Naukowych (badania własne za rok 2001)

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



STRATY MOCY W PRZEPUSTACH PRĄDOWYCH
URZĄDZEŃ NADPRZEWODNIKOWYCH

Dariusz Czerwiński, Tadeusz Janowski

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej
Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
E-mail: darekc@weber.pol.lublin.pl

Abstract

Main element of superconducting magnets and magnetic separators is superconducting magnet set into the liquid helium dewar environment. The winding coil of the superconducting magnet is working in the temperature of liquid helium at about 4 K. Current leads are used for energy transfer between superconducting magnet and power supplying system. In such cryogenic application, it is necessary to pass electrical current from a power source at room temperature to a particular device at cryogenic temperatures. During transient states of superconducting devices additional power losses, caused by magnetic field, are generated in current leads. The value of these losses depends on cryogenic system configuration and current leads design. Numerical model of power losses in current leads was developed and results of the analysis were presented in this paper.

Słowa kluczowe : przepusty prądowe, straty mocy, stany przejściowe, urządzenia nadprzewodnikowe.

1. Wstęp

Głównym elementem urządzeń nadprzewodnikowych takich jak: nadprzewodnikowe separatory magnetyczne, urządzenia do wytwarzania silnych pól magnetycznych oraz transformatory nadprzewodnikowe, jest uzwojenie nadprzewodnikowe umieszczone w kriostacie. Temperatura pracy uzwojenia wynosi ok. 4 K (chłodzenie ciekłym helem) lub 40 K (chłodzenie kontaktowe przy użyciu kriochłodziarki).

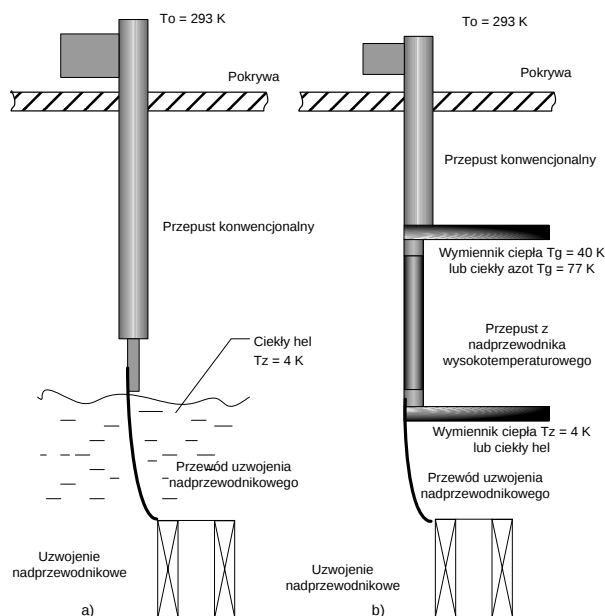
Przepusty prądowe są elementami doprowadzającymi energię elektryczną od źródła zasilania do uzwojenia nadprzewodnikowego i generują największe straty mocy. Uzwojenie nadprzewodnikowe pracuje najczęściej w temperaturze ciekłego helu to jest ok. 4 K. Przepust prądowy dostarcza prąd do uzwojenia z temperatury pokojowej to jest około 300 K do temperatury pracy czyli 4 K.

W nadprzewodnikowych urządzeniach silnoprądowych takich jak elektromagnesy i transformatory nadprzewodnikowe straty mocy w przepustach prądowych stanowią poważną część energii cieplnej, którą musi wyprowadzić układ chłodzenia aby utrzymać temperaturę urządzenia nadprzewodnikowego na właściwym poziomie.

Straty mocy powstałe w doprowadzeniach prądowych stanowią 30-50 % całkowitych strat mocy powstałych w kriostacie urządzenia nadprzewodnikowego. Zmniejszenie strat mocy generowanych w przepustach prądowych ma zasadnicze znaczenie dla obniżenia kosztów chłodzenia, zwiększenia stabilności pracy oraz ograniczenia kosztów eksploatacji urządzeń nadprzewodnikowych.

2. Konstrukcje przepustów prądowych

Przepusty prądowe posiadają szczególną konstrukcję z racji przewodzenia prądu i połączenia cieplnego uzwojenia i zasilania. Podstawowym wymaganiem, jakiemu mają sprostać przepusty prądowe, jest pokonanie wielkich gradientów temperatury, które powodują że właściwości fizyczne materiałów wykorzystywanych na przepusty bardzo się różnią na całej długości i wymuszają też z drugiej strony powstawanie różnych konstrukcji. Połączenie uzwojenia kriomagnesu nadprzewodnikowego z układem zasilającym jest wykonane za pomocą przepustów prądowych rysunek 1. Konstrukcja przepustu prądowego musi zatem wytrzymać przepływ prądu o dużej wartości przy dużym gradientie temperatury. Przepust prądowy powoduje wzrost temperatury w kriostacie ze względu na straty mocy od prądu płynącego w przepuście oraz przewodzenie ciepła z otoczenia do wnętrza kriostatu.



Rys. 1. Połączenie przepustów prądowych z cewką elektromagnesu nadprzewodnikowego:

- przepust konwencjonalny wykonany z miedzi lub brązu
- przepust wykonany z nadprzewodnika HTS i przepust konwencjonalny.

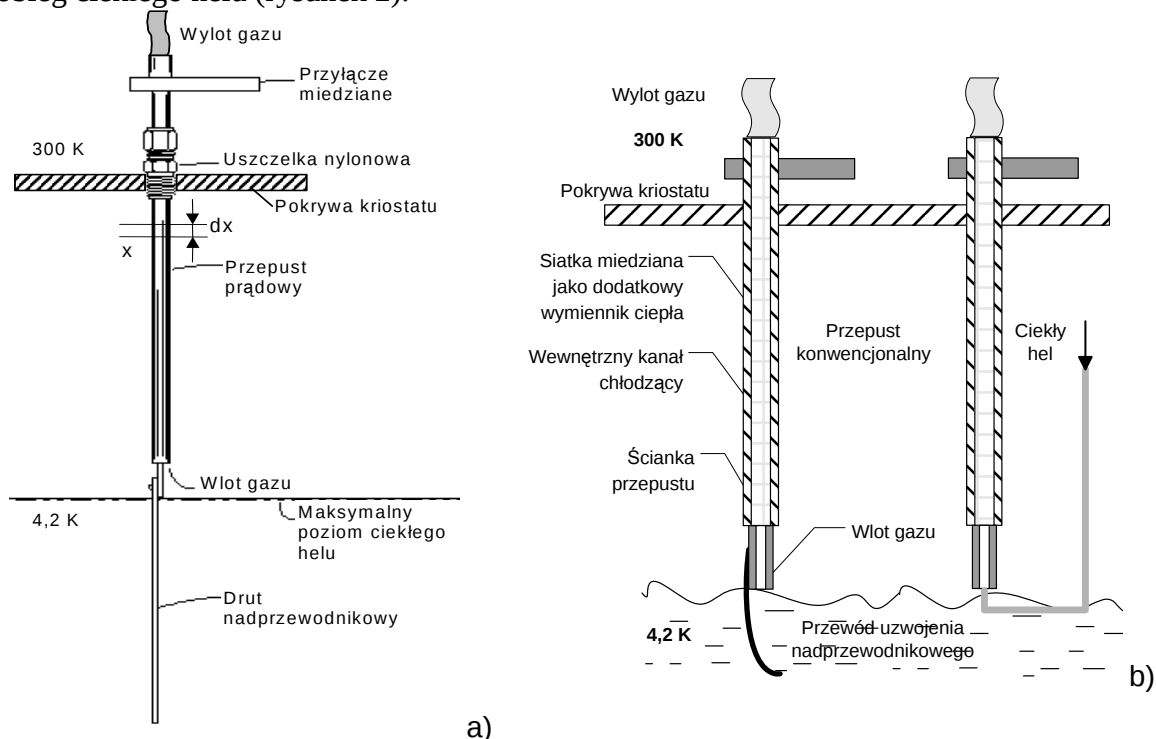
Konstrukcje przepustów prądowych możemy podzielić na dwie grupy: krioprzepusty chłodzone parami cieczy kriogenicznych oraz przepusty izolowane termicznie (cieplnie).

Wśród przepustów izolowanych cieplnie możemy wyróżnić przepusty z częścią pracującą w wyższej temperaturze chłodzoną kontaktowo lub za pomocą ciekłego azotu.

Rozwiązania konstrukcyjne jak również analiza pracy przepustów prądowych były przedmiotem wielu badań [1],[2],[3],[4],[5],[6].

Krioprzepusty chłodzone parami helu

W krioprzepustach chłodzonych parami cieczy kriogenicznych transport ciepła odbywa się zarówno w poprzek jak i wzdłuż przepustu. Powierzchnie boczne, w niektórych rozwiązaniach również wewnętrzne, przepustu chłodzone są (na całej jego długości) poprzez unoszące się pary cieczy kriogenicznych lub też poprzez wymuszony obieg ciekłego helu (rysunek 2).



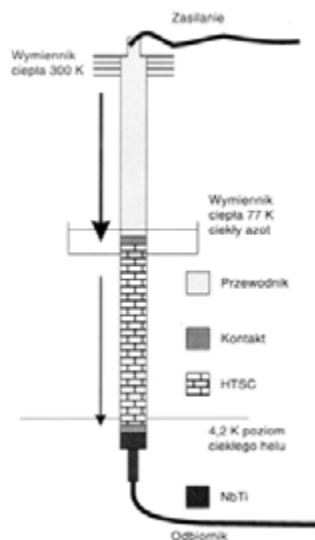
Rys. 2. Krioprzepust chłodzony parami cieczy kriogenicznej:

a) widok ogólny; b) przekrój przepustów ze swobodnym i wymuszonym chłodzeniem.

Przepusty buduje się na prądy od 25 do 75 000 amperów i są one wykonane najczęściej z rurki miedzianej lub brązu. Przewodzenie dużych prądów wymaga stosowania dużych przekrojów przepustów i wydajnego chłodzenia. Pojemność cieplna par helu jest wykorzystana do chłodzenia w celu zmniejszenia wymaganej ilości ciekłego helu, a co za tym idzie kosztów.

Przepusty izolowane termicznie

W przepustach izolowanych termicznie (rysunek 3) powierzchnie boczne toru prądowego są odizolowane cieplnie od oddziaływań zewnętrznych.



Rys. 3. Przepust izolowany termicznie [7].

Oznacza to, że przepust od wejścia w pokrywę kriostatu aż do wymiennika ciepła względnie między wymiennikami (w krioprzepustach o wielopoziomowym systemie chłodzenia toru prądowego) nie pobiera ani też nie oddaje ciepła na zewnątrz przez powierzchnie boczne. Uzyskuje się to przez umieszczenie przepustu w wysokiej próżni, przez srebrzenie, względnie polerowanie ścianek osłonowych przepustu oraz izolowanie cieplne tych ścianek superizolacjami I i II rodzaju (izolacje proszkowe i wielowarstwowe próżniowe). W tych warunkach ruch ciepła odbywa się wyłącznie wewnątrz przepustu.

Straty mocy w przepustach prądowych w stanach nieustalonych

Analiza strat jest bardzo trudna ze względu na duże gradienty temperatur w jakich pracują przepusty i obejmuje straty generowane w przepuszczeniu. Minimalizacja tych strat jest istotna w budowie wszystkich urządzeń nadprzewodnikowych. Mimo postępu w technice kriogenicznej ograniczenie strat mocy w przepustach prądowych, jak też odpowiedni system chłodzenia, są niezbędne do osiągnięcia zysku energetycznego wynikającego ze zjawiska nadprzewodnictwa.

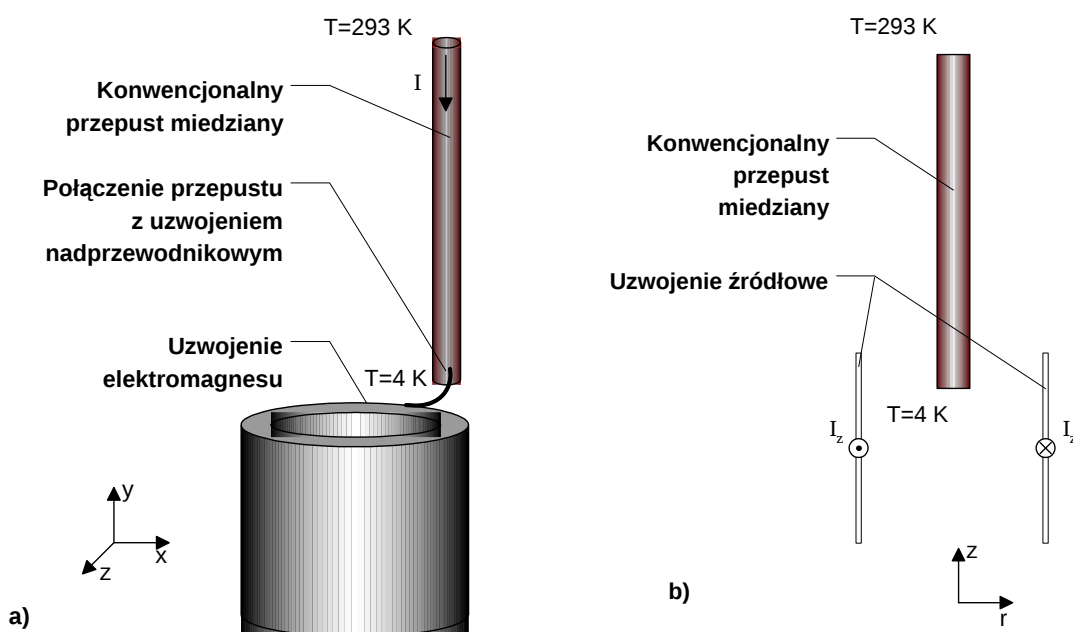
Stany przejściowe w elektromagnecie występują podczas załączania, wyłączania i procesu trenowania elektromagnesu nadprzewodnikowego. Załączanie oraz trenowanie są procesami bardziej kontrolowanymi a zjawiska przejściowe występujące w czasie trwania tych procesów są w pełni kontrolowane przez układy zasilania i zabezpieczeń. Przy załączaniu i trenowaniu elektromagnesu nie doprowadza się do gwałtownych zmian prądu zasilającego i powstałe indukowane straty możemy pominąć. Wyłączanie elektromagnesu nie jest już tak kontrolowane jak poprzednie procesy i często ma miejsce przy awarii układu elektromagnesu nadprzewodnikowego. Z tego powodu zajmiemy się stratami mocy powstałymi przy zaniku prądu w uzwojeniu elektromagnesu.

Obliczenia strat mocy w stanach nieustalonych zostały przeprowadzone dla trzech różnych przebiegów prądów w uzwojeniu elektromagnesu nadprzewodnikowego:

- prąd zanikający w uzwojeniu liniowo,
- prąd zanikający w uzwojeniu nieliniowo,
- prąd zanikający w uzwojeniu w sposób oscylacyjny.

Przepust prądowy znajduje się w pewnym oddaleniu w przestrzeni od uzwojeń elektromagnesu. Położenie przepustu względem uzwojeń może być różne i od umiejscowienia przepustu będzie zależać wartość generowanych strat mocy.

Wartość obliczonych w przepuście strat mocy nie będzie się różnić, jeżeli z przestrzennego trójwymiarowego układu przejdziemy do układu o symetrii osiowej zgodnie z zasadą jednakowych wymuszeń, co pokazano na rysunku 4. Straty mocy w stanach przejściowych indukuje zmienne pole magnetyczne, w którym znalazł się przepust prądowy a model przyjęty do obliczeń odwzorowuje typowy rozkład indukcji magnetycznej.

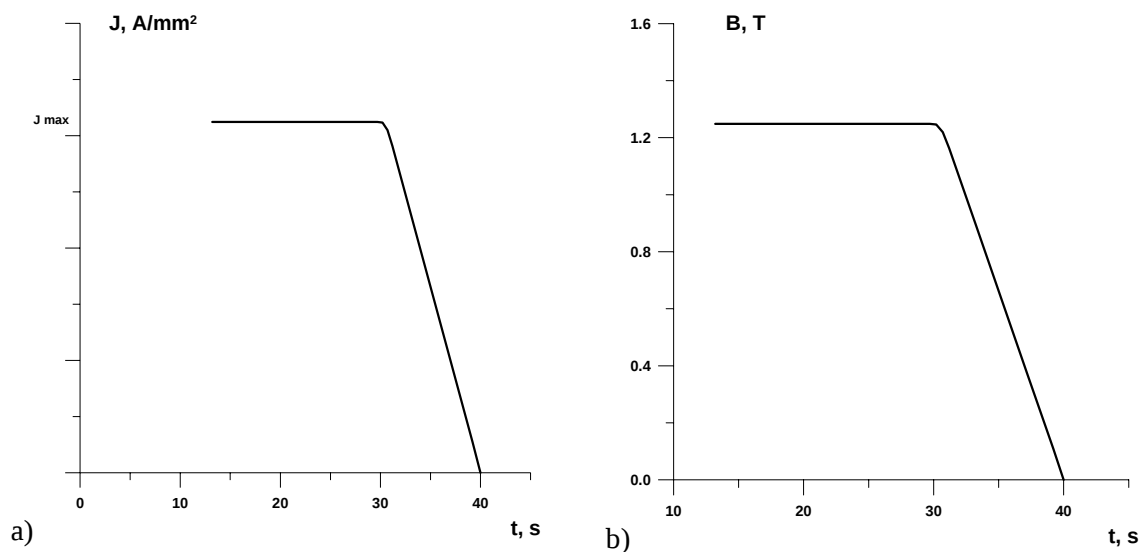


Rys. 4. Przepust prądowy w niejednorodnym polu magnetycznym elektromagnesu:
a) układ istniejący, b) model.

Nieliniowa zależność rezystywności przepustu od temperatury została aproksymowana funkcją sklejaną. Rozkład temperatury wzdłuż przepustu przyjęto taki, jaki występuje przy chłodzeniu ciekłym helem. Przy takim chłodzeniu przyjmuje się liniową zmianę współczynnika konwekcji w granicach $h = 1000 \div 2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ (1000 przy zimnym końcu przepustu a 2 przy gorącym) [8],[9].

Liniowe zanikanie prądu

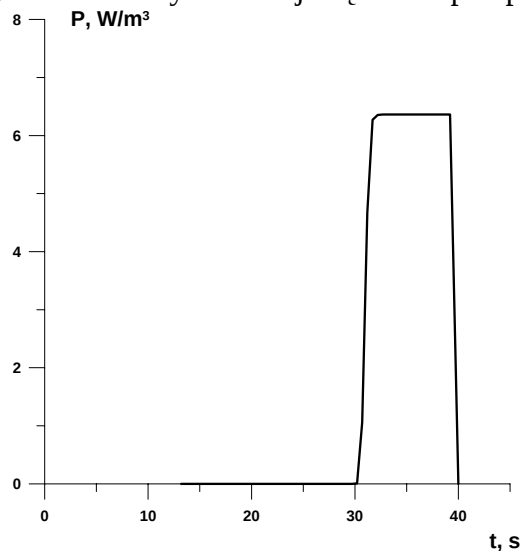
Jako pierwszy rozpatrzono przypadek liniowej zmiany prądu w uzwojeniu elektromagnesu. Prąd zmieniał się od wartości maksymalnej do zera w przeciągu czasu $t=10\text{ s}$ tak jak to przedstawiono na rysunku 5 a). Zanikanie prądu jest aproksymowane linią prostą. W celu uniknięcia nieciągłości na styku dwu obszarów stanu normalnego i stanu przejściowego proste zostały połączone funkcją wykładniczą. Dla takiego modelu została przeprowadzona analiza numeryczna strat mocy generowanych w przepuście przez zmienne pole magnetyczne.



Rys. 5. Przebiegi czasowe: a) prądu w uzwojeniu, b) indukcji magnetycznej przy zimnym końcu krioprzepustu.

Przebieg wartości indukcji w czasie w zimnej części krioprzepustu został przedstawiony na rysunku 5 b).

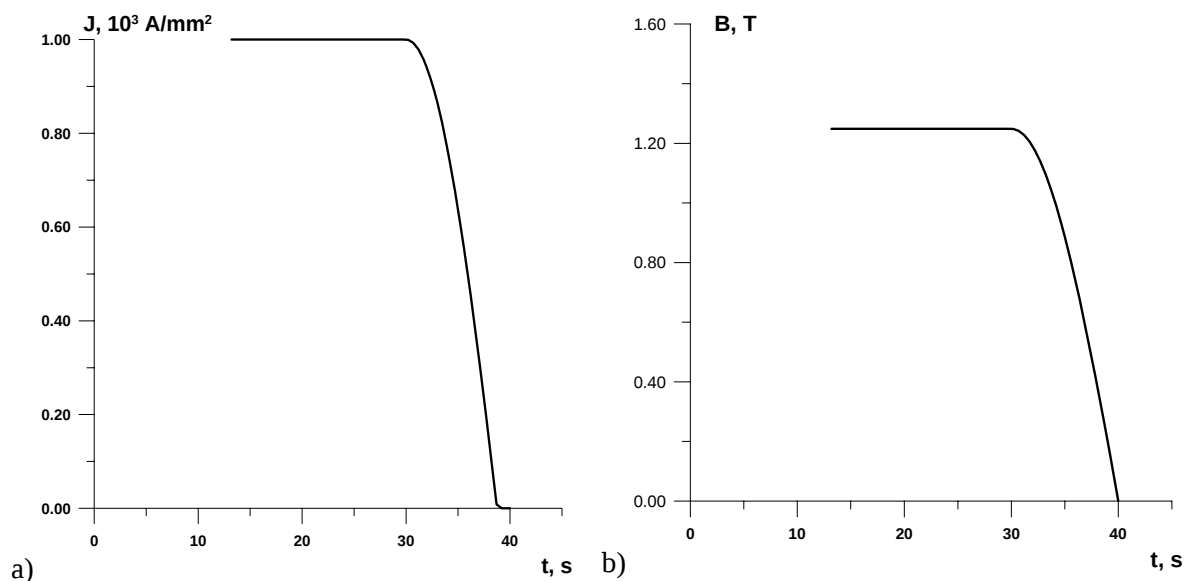
Dla tak dobranych parametrów modelu zostały wyznaczone: gęstość mocy objętościowej, linie pola, rozkład mocy w dolnej części krioprzepustu.



Rys. 6. Gęstość mocy objętościowej w dolnej części krioprzepustu.

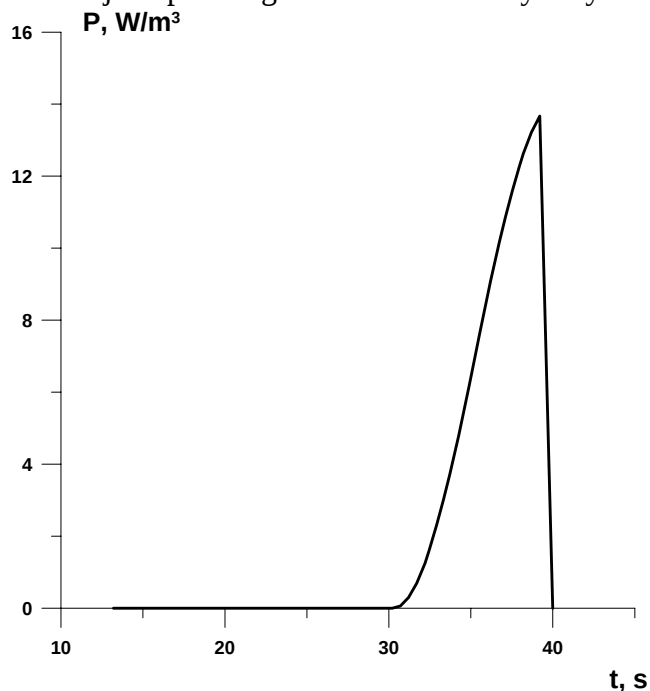
Nieliniowe zanikanie prądu

Drugim rozpatrywanym przypadkiem było nieliniowe zanikanie prądu w uzwojeniu elektromagnesu. W stanie normalnym prąd jest aproksymowany funkcją liniową a w stanie nieustalonym funkcją cosinusoidalną, rysunek 7 a). Ciągłość pierwszych pochodnych obydwu funkcji w punkcie sklejenia była warunkiem koniecznym do poprawnego rozwiązywania zagadnienia.



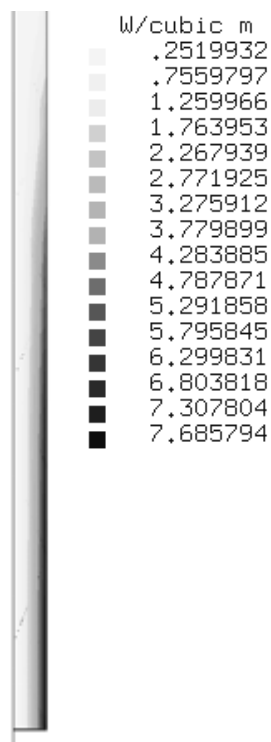
Rys. 7. Przebiegi czasowe: a) prądu w uzwojeniu, b) indukcji w dolnej części przepustu.

Dla tak przyjętych parametrów modelu obliczeniowego zostały policzone wartości indukcji magnetycznej oraz gęstości mocy objętościowej w dolnej części przepustu prądowego i przedstawione jako przebiegi wartości chwilowych rysunek 7 b) i 8.



Rys. 8. Gęstość mocy objętościowej części przepustu znajdującej się w temperaturze 4 K.

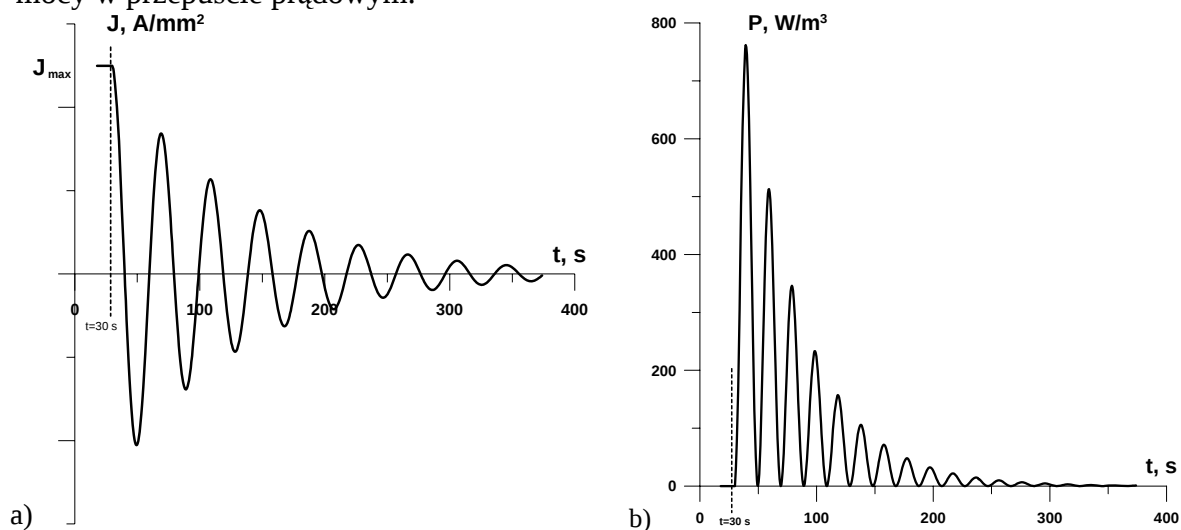
Rozkład indukcji oraz strat mocy w modelu zostały przedstawione w chwili czasowej $t=35,2 \text{ s}$, jako przykład zmian zachodzących w trakcie stanu przejściowego.



Rys. 9. Rozkład strat mocy w dolnej części krioprzepustu $t=35,2$ s.

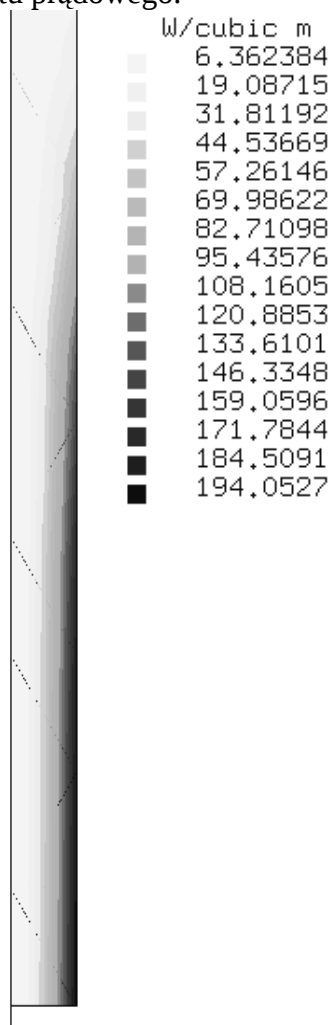
Oscylacyjne zanikanie prądu

Ostatnim przypadkiem jaki został rozpatrzony był przypadek oscylacyjnego zanikania prądu w uzwojeniu elektromagnesu (rysunek 10 a)). Częstotliwość oscylacji została dobrana tak aby odzwierciedlała zanikanie prądu w typowym układzie elektromagnesu nadprzewodnikowego. W analizowanym przypadku $J_{\max}=1000$ A/mm², $T=40$ s. Podobnie jak w poprzednich przypadkach został obliczony przebieg objętościowych strat mocy w przepływie prądowym.



Rys. 10. Przebieg czasowe: a) gęstości prądu w uzwojeniu, b) gęstości objętościowej mocy w dolnej części krioprzepustu.

W rozpatrywanym przypadku występują największe straty mocy w stosunku do dwu poprzednich przypadków, co jest uwidocznione na rysunku 10 b) i 11. Analizując rozkłady i wartości strat mocy generowanych w przepustach prądowych urządzeń nadprzewodnikowych w stanach nieustalonych widzimy, iż najbardziej zagrożonym punktem jest zimna część przepustu prądowego.



Rys. 11. Rozkład strat mocy w zimnym końcu krioprzepustu $t=32,78$ s

3. Wnioski

Niekontrolowany wzrost temperatury w zimnej części przepustu zazwyczaj prowadzi do awarii urządzenia nadprzewodnikowego. Aby temu zapobiec w przepustach chłodzonych parami cieczy kriogenicznych, stosuje się dodatkowe wymienniki ciepła w postaci siatki miedzianej. Mniej korzystna sytuacja występuje w przypadku przepustów izolowanych cieplnie, gdzie całość strat mocy musi być odebrana z przepustu na drodze przewodzenia przez wymienniki ciepła.

Zastosowana metoda analizy strat mocy w konwencjonalnym przepuście miedzianym pozwala na rozpatrzenie innych przypadków i jest na tyle ogólna, iż da się przy jej użyciu rozpatrzyć inne przepusty.

Rozważany przykład przepustu miedzianego jest jednym z najostrzejszych. Otrzymane w wyniku obliczeń wartości strat mocy są niewielkie i moc wydzielana wskutek procesów przejściowych ma małą wartość. Przedstawione podejście analizy strat mocy wykazuje, iż nie jest to newralgiczny punkt. W stanach ustalonych generowane straty mocy w przepustach są o wiele większe w stosunku do strat powstałych w stanach przejściowych.

Literatura

- [1] Buyanov Yu. L., *Current Leads for Use in Cryogenic Devices. Principle of Design and Formule for Design Calculations*, Cryogenics, vol. 25, February 1985.
- [2] Heller R., Friesinger G., Goldacker W., Kathol H., Ullman B., Fuchs A., Jakob B., Pasztor G., Vecsey G., Wesche R., *Development Program of a 60 kA Current Lead Using High Temperature Superconductors*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 7, No 2, June 1997, pp.692-695.
- [3] Jones M.C., Yoroshenko V.M., Starostin A., Yaskin L., *Transient Behavior of Helium-Cooled Current Leads for Superconducting Power Transmission*, Cryogenics, June 1978.
- [4] Maehata K., Kawasaki S., Ishibashi K., Wakuta Y., Kawamata H., Shintomi T., *Operational Performance of Spiral Fin Current Leads*, Cryogenics, vol. 33, No 7, 1993.
- [5] Maehata K., Ishibashi K., Wake M., Katase A., Kobayashi M., *Optimization Method for Superconducting Magnet Current Leads*, Cryogenics, vol. 28, November 1988.
- [6] Okumura H., Yamaguchi S., *One Dimensional Simulation for Peltier Current Leads*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 7, No 2, June 1997.
- [7] Czerwiński D., Janowski T., Surdacki P., *Wybrane zagadnienia projektowe krioprzepustów prądowych urządzeń nadprzewodnikowych*, Przegląd Elektrotechniczny 3/1997, s. 74-77.
- [8] Demko J., Carcagno R., Schiesser W., *A technical description and users manual for the cryogenic current lead analysis model program (CCLAMP)*, ASD Cryogenics, February 1994.
- [9] Małkow M., Daniłow I., Jeldowicz A., Fradkow A., *Sprawochnik po fizykotie-chnicznych osnovam kriogeniki*, Energoatomizdat, 1985.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



ZABEZPIECZENIE NADPRZEWODNIKOWEGO ELEKTROMAGNESU CHŁODZONEGO KONTAKTOWO

Henryk Malinowski

*Instytut Elektrotechniki w Warszawie
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki
Pracownia Krioelektromagnesów w Lublinie
Ul. Nadbystrzycka 38 A, 20 – 618 Lublin
henmal@eltecol.pol.lublin.pl*

Abstract

Special safety system is required for the superconducting magnet cooled by cryocoolers. The cold diodes are used in the protection system. In this paper basic investigation of using diffusion type diodes for magnet safety is presented.

Keywords: superconducting magnet safety system

1. Wstęp

Utrata nadprzewodnictwa w nadprzewodnikowym elektromagnecie niesie za sobą niebezpieczeństwo jego uszkodzenia wskutek przekroczenia dopuszczalnych, elektrycznych lub mechanicznych, parametrów. Prawdopodobieństwo uszkodzenia takiego elektromagnesu zależy przede wszystkim od technologii jego wykonania, jego wymiarów geometrycznych i rośnie wraz z wielkością energii, jaka jest w nim zgromadzona. Małe elektromagnesy mogą najczęściej pracować bez specjalnego systemu zabezpieczenia. Średnie i duże muszą posiadać, odpowiedni do wymagań, system zabezpieczenia. Dotyczy to szczególnie elektromagnesów chłodzonych kontaktowo. W systemach zabezpieczenia takich elektromagnesów najczęściej wykorzystywane są tzw. „zimne diody”. Diody te ze względu na specyfikę i warunki pracy muszą być poddane specjalnym badaniom i selekcji.

2. Praca nadprzewodnikowych elektromagnesów z niekonwencjonalnymi źródłami chłodzenia

Elektromagnesy chłodzone kontaktowo są bardziej narażone na uszkodzenie niż chłodzone w kąpeli. Wynika to stąd, że efektywność chłodzenia w kąpeli jest o wiele

większa od efektywności chłodzenia kontaktowego. Przy chłodzeniu w kąpeli wymiana ciepła zachodzi na całej powierzchni elektromagnesu; przy chłodzeniu kontaktowym, wymiana ogranicza się do powierzchni styku tzw. chłodnej głowicy cryocoolera z karkasem elektromagnesu. Dlatego też, parametry graniczne przyjmowane w konstrukcjach elektromagnesów chłodzonych kontaktowo, są 2-3 razy bardziej zaniżone niż w konstrukcjach analogicznych chłodzonych w kąpeli helowej.

3. Następstwa utraty nadprzewodnictwa

Przyczyną utraty nadprzewodnictwa w uzwojeniu krioelektromagnesu są najczęściej mechaniczne niestabilności przewodu oraz izolacji. Mikropęknięcia izolacji czy mikrodeformacje w materiale nadprzewodnika są najczęściej źródłem impulsów cieplnych, które doprowadzają do przejścia.

W stosowanych systemach nadprzewodnikowych chłodzonych ciekłym helem, znaczna część energii wyprowadzana jest na zewnątrz kriostatu poprzez miedziane przepusty prądowe. Efektywność układów ewakuacji energii elektromagnesów sięgała 90%. Niewielka część energii elektromagnesu pochłaniana była przez uzwojenie elektromagnesu, karkas i elementy przewodzące. Powodowało to zwiększenie temperatury uzwojenia elektromagnesu o kilkadziesiąt K, przy prądach zasilania bliskich krytycznej wartości prądu krioelektromagnesu. Taki wzrost temperatury uzwojenia elektromagnesu jest dopuszczalny – nawet przy założeniu, że część uzwojenia osiąga już temperaturę maksymalną a część ma jeszcze temperaturę ciekłego helu. Przyjmuje się, że gradient temperatur w uzwojeniu mniejszy niż 100K, nie powoduje jeszcze uszkodzeń elektromagnesu. Większy gradient temperatur uzwojenia powodować może mechaniczne, nieodwracalne uszkodzenia uzwojenia.

W systemach nadprzewodnikowych chłodzonych kriochłodziarkami, niezbędne stało się stosowanie ceramicznych przepustów prądowych. Łączy się to z koniecznością ograniczenia dopływu ciepła do elektromagnesu z powodu niewielkiej wydajności kriochłodziarki. Przez przepusty miedziane do elektromagnesu nadprzewodnikowego przepływała ponad połowa sumarycznej energii cieplnej, jaka dostarczana była do krioelektromagnesu. Przepusty miedziane uniemożliwiłyby schłodzenie uzwojenia krioelektromagnesu do temperatury, w której uzwojenie to mogłoby przejść w stan nadprzewodnictwa.

Przepusty ceramiczne umieszcza się zwykle w pobliżu elektromagnesu, aby całe uzwojenie nadprzewodnikowe utrzymywało stabilnie temperaturę bliską 4.2 K. Z doświadczenia wiadomo, że w krioelektromagnesach przejście do stanu rezystywnego często zaczyna się od słabo chłodzonych elementów uzwojenia przy przepustach prądowych.

Pole magnetyczne elektromagnesu znacznie redukuje krytyczną wartość prądu dla przepustu ceramicznego (określaną często w katalogach dla temperatury ciekłego azotu tj 77 K). Jednak obniżenie temperatury przepustu do wartości znacznie poniżej 77 K pozwala na przepływ prądu o znacznie większej, niż nominalna, wartości.

Przy przejściu krioelektromagnesu do stanu rezystywnego zwiększa się temperatura uzwojenia i jednocześnie temperatura przepustów ceramicznych. Powoduje to zmniejszenie ich wartości krytycznej prądu i w konsekwencji utratę nadprzewodnictwa. Przepływ prądu przez przepusty w stanie rezystywnym powoduje gwałtowny wzrost ich

temperatury, przekraczający znacznie dopuszczalne graniczne wartości temperatur i gradientu temperatur, w których przepusty te mogą bezpiecznie pracować. Spowodować to może mechaniczne uszkodzenie przepustów a konsekwencją będzie powstanie łuku elektrycznego i zniszczenie krioelektromagnesu.

Dla uniknięcia takiej awarii niezbędne jest

- zastosowanie układu zabezpieczenia z tzw. zimnymi diodami
- wykonanie uzwojenia o podwyższonej przewodności cieplnej.

Diody, przeciwsobnie połączone i włączone równolegle do cewki krioelektromagnesu ograniczają wartość napięcia jaka powstaje na końcach uzwojenia w wyniku przejścia. Jednocześnie umożliwiają zamknięcie prądu w obwodzie złożonym z uzwojenia elektromagnesu i diod.

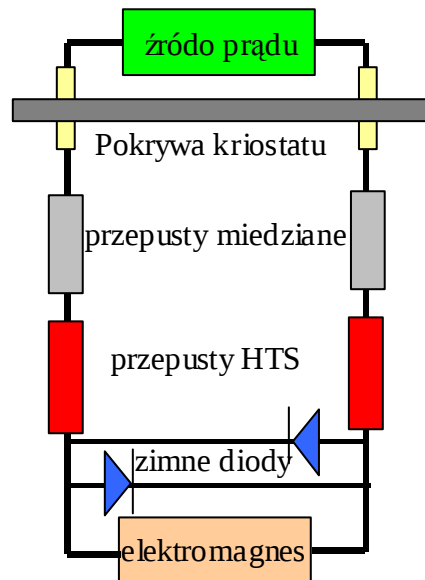
Duża wartość przewodności cieplnej uzwojenia umożliwia szybką dyssypację energii cieplnej w całej objętości uzwojenia. Gradient maksymalny temperatury nie przekracza zwykle wartości 100 K nawet dla prądów o wartości bliskiej krytycznej wartości prądu elektromagnesu. Taki sposób zabezpieczenia można stosować nawet dla elektromagnesów o energii kilku MJ.

Diody dostępne na rynku przeznaczone są do pracy w temperaturach pokojowych. Przeznaczenie ich do pracy w temperaturach niskich czy bardzo niskich wymaga badań ich parametrów w tych temperaturach (producenci nie podają takich parametrów). Diody wykazują stosunkowo małą naturalną przeciążalność prądową, co jest spowodowane ich niewielkimi rozmiarami i nieznaczną pojemnością cieplną. Włączone równolegle do uzwojenia elektromagnesu nadprzewodnikowego – jako elementy zabezpieczenia - w przypadku, kiedy elektromagnes traci stan nadprzewodnictwa, poddawane są znacznym obciążeniom. Można dobrać diody, dla których charakterystyki prądowo czasowe krioelektromagnesu będą leżały poniżej krzywej granicznej przeciążalności prądowej diody. Jednak przy bardzo szybkiej zmianie prądu obciążenia dochodzić może do miejscowego stopienia materiału diody i doprowadzić do jej zniszczenia. Już w temperaturach pokojowych dla czasów mniejszych niż 10 ms parametr przeciążeniowy diody I^2t powinien być znacznie większy niż przyjmowany dla typowych czasów przełączania. Przy niskich temperaturach w czasie procesu przejścia przy znacznej redukcji pojemności cieplnej materiałów, parametry diody muszą być szczególnie dobrze dobrane by dioda nie uległa mechanicznemu zniszczeniu lub stopieniu.

Najistotniejszymi parametrami, z których ocenić można przydatność diod do systemu zabezpieczenia krioelektromagnesu są wartość napięcia U_r i U_f w niskich temperaturach, wartość dI/dt oraz całkowita dopuszczalna moc strat.

Przy włączonych jak na rys. 1 diodach, napięcie U_f determinuje szybkość wprowadzania prądu dI/dt do uzwojenia elektromagnesu. Napięcie to dla temperatury pokojowej dla diody krzemowej wynosi ok. 1.1 V-1.3 V. Przy obniżaniu temperatury diody, wartość ta wzrasta. Dla różnych typów diod zmiana tego napięcia jest różna.

Przy obniżaniu temperatury diod do wartości 4.2 K, U_f - dla diod epitaksjalnych - zwiększa się o 80 – 90 %. Dla diod dyfuzyjnych zmiana U_f jest znacznie większa, zależy ponadto od typu domieszki – w diodach domieszkowanych galem zwiększa się 5-krotnie, a w domieszkowanych borem 3 do 3.5-krotnie.



Rys. 1. Schemat obwodu elektromagnesu nadprzewodnikowego z zimnymi diodami w systemie zabezpieczenia.

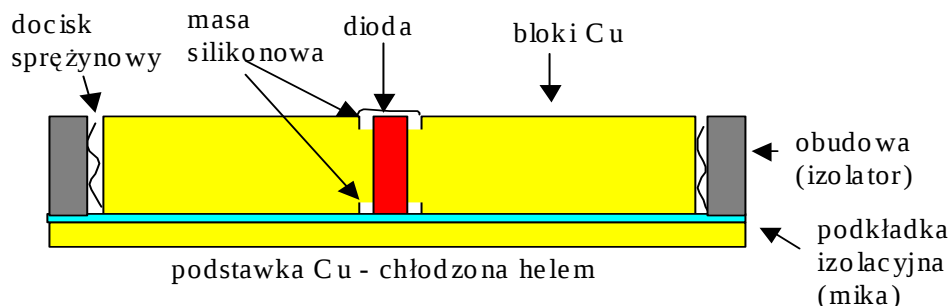
Zwiększenie napięcia zasilania ponad wartość U_f spowoduje przepływ prądu przez diodę i wydzielanie się energii cieplnej obciążając dodatkowo II stopień cryocoolera. Bilans cieplny dla systemu z nadprzewodnikowym elektromagnesem stanie się ujemny i uniemożliwi pracę krioelektromagnesu w stanie nadprzewodnictwa.

Szybka zmiana napięcia, jaka ma miejsce na końcach uzwojenia w procesie przejścia, powoduje też szybkie narastanie prądu obciążenia diody. Ilość ciepła, jaką absorbuje układ diod sięgać może kilkudziesięciu (i więcej) kJ. Istotnym więc czynnikiem dla bezpiecznej pracy diody jest szybkość odprowadzania ciepła ze złącza diodowego.

4. Eksperymenty

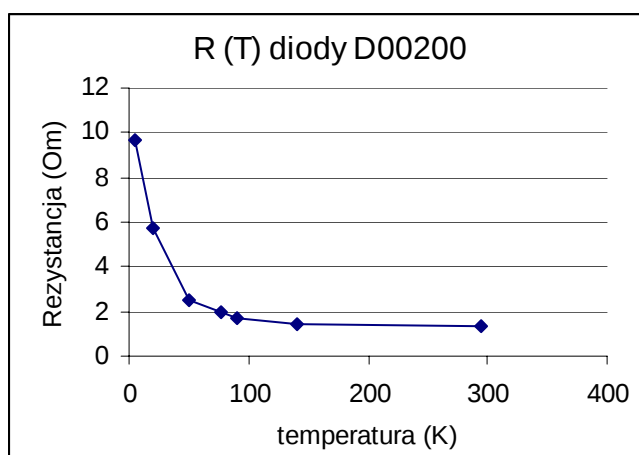
O zdolności rozpraszania ciepła decyduje rezystancja cieplna przyrządu półprzewodnikowego. Ze względu na to, że system diodowego zabezpieczenia elektromagnesu umieszczony jest w naczyniu próżniowym i obciąża cieplnie drugi stopień kriochłodziarki, jedynym możliwym sposobem zabezpieczenia diod przed przegrzaniem (a tym samym zniszczeniem) jest umieszczenie ich bezpośrednio na bloku miedzi o znacznej masie (znacznej pojemności cieplnej). Konstrukcję taką wykonaną do wstępnego badania diod pokazuje rysunek 2.

Miedzy dwa bloki miedziane o objętości po ok. 10 cm^3 umieszczono diodę – element prostowniczy wymontowany z obudowy diody D00200. Dla zmniejszenia rezystancji cieplnej złącze- obudowa, bloki miedzi dociśnięto do elementu prostowniczego z siłą ok. 50 kG, wykorzystując dwie sprężyste podkładki umieszczone między blokami miedzi i obudową z ertalonu. Dla lepszego odprowadzenia ciepła ze złącza diodowego, pokryto go z zewnątrz masą silikonową.



Rys. 2. Konstrukcja mechaniczna „zimnej diody” przeznaczona do pracy w układzie zabezpieczenia krioelektromagnesu.

Przeprowadzono badania charakterystyki $U_f(T)$ diody dyfuzyjnej D00200 domieszkowanej galem. Na wykresie przedstawiono rezultaty badań.



Rys. .3. Zależność rezystancji diody od wartości temperatury. Badania przeprowadzono dla temperatur od 4,2 do 295 K.

Znaczne napięcie U_f w temperaturze 4,2 K umożliwia zasilanie krioelektromagnesu przy dosyć dużym napięciu zasilania. Przy przepływie prądu o wartości 150A przez diodę, temperatura złącza szybko wzrasta do ponad 100K. Duże napięcie U_f przy rozładowaniu energii krioelektromagnesu powoduje znaczny wzrost temperatury diody. Niezbędne więc będzie zwiększenie masy miedzi pochłaniającej energię cieplną złącza diodowego.

5. Wnioski

Do celów zabezpieczenia elektromagnesu bardziej przydatne będą diody dyfuzyjne domieszkowane borem, posiadające znacznie niższe wartości U_f [1]. Podobnie niskie napięcie U_f posiadają diody epitaksjalne. Ich wartość U_f w temperaturze helowej jest dosyć niskia i wynosi ok. 1.7 V.

Wstępne badanie diod Shotkego wskazują również na możliwość zastosowania ich w układzie zabezpieczenia. Zaletą ich jest szybkość działania. Jednak ich wadą jest niskie

napięcie U_f (ok. 0,5 V w temperaturze helowej) co dla efektywnej szybkości wprowadzania prądu do elektromagnesu (niezbędne utrzymanie napięcia kilku V) wymagałoby łączenia w szereg kilku takich diod.

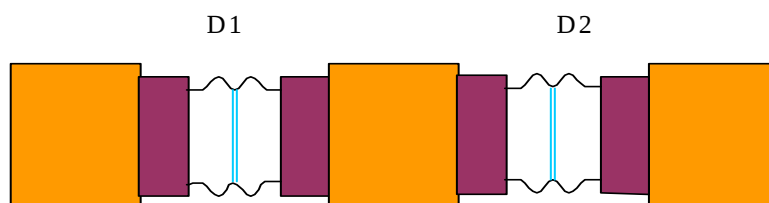
Do konstrukcji diodowych systemów zabezpieczenia użyć można również diod chłodzonych dwustronnie, dostępnych na rynku, bez konieczności ich rekonstrukcji. Przy ich zastosowaniu należy zwracać uwagę by masa umieszczona wewnątrz obudowy nie była pochodzenia mineralnego. Najlepsze są wypełnienia syntetyczne.

Po wstępnym wyborze diod niezbędne jest przeprowadzenie testów na szok termiczny i na graniczne obciążenia prądowe.

Ze względu na możliwość degeneracji złącza w procesach szokowych zmian temperatur i dużych impulsów prądowych należy wykonać do kilkuset eksperymentów w temperaturze azotowej i oddzielnie w temperaturze helowej dla każdej diody.

Przykładem zastosowania diodowego układu zabezpieczającego może być przyjęty system zabezpieczenia w elektromagnesach nadprzewodnikowych DESY w Hamburgu. Przeprowadzono tam wiele testów z diodami od różnych dostawców. Przyjęto ostatecznie zmodyfikowaną wersję diody DS. 6000 oraz specjalnie wykonane przez firmę Siemens chłodne diody „DESY-special”.

Ze względu na niepowtarzalność charakterystyk diod, każda z nich była wyselekcjonowana i poddana wielokrotnym testom na szok temperaturowy i przeciążenia prądowe. Podstawowy zestaw diod stanowiących zabezpieczenie sekcji elektromagnesu DESY przedstawia rysunek 4



Rys. 4. Element diodowego układu zabezpieczającego elektromagnesu DESY.

Literatura

- [1] L. Coull, R.Denz, D.Hagedorn, High current diffusion type diodes at cryogenic temperatures for the LHC superconducting magnet protection, CERN, CH-1211 Genewa, Plenum Press, New York 1998, pp. 371-376.
- [2] K.H.Mes, Quench protection at HERA, IEEE, CH 2287-9/87/0000, pp. 1474-1477.
- [3] R.E Kunz, E.Scholl, Solid State Electronics, 1996, Vol.39, pp. 1155-1164.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



ZASTOSOWANIE NADPRZEWODNICTWA
W TERMOMETRII

Leszek Lipiński, Henryk Manuszkiewicz, Anna Szmyrka-Grzebyk

Polska Akademia Nauk

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych

50-422 Wrocław, ul. Okólna 2

Adres pocztowy: 50-950 Wrocław 2, skrytka poczt. 1410

E-mail: lipinski@int.pan.wroc.pl; manuszk@int.pan.wroc.pl; szmyrka@int.pan.wroc.pl

Abstract

The application of superconducting transitions as temperature fixed points of international temperature scales are presented in the paper. Briefly, a history of the research are described. Moreover, some problems dealing with realisation of the superconducting transition, results of the authors investigations and new items in this area are discussed.

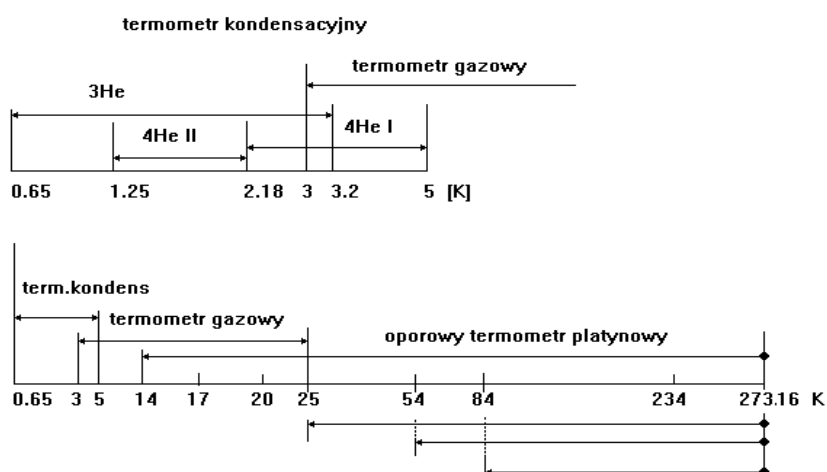
Keywords: superconductivity, temperature scale, temperature fixed points

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, skala temperatury, punkty stałe temperatury

1. Wstęp

Podstawowym zastosowaniem nadprzewodnictwa w termometrii niskotemperaturowej jest wykorzystanie związanego z nim przejścia fazowego w charakterze stałego punktu termometrycznego. Pojęcie punktu stałego jako elementu skali temperatury obejmuje substancję o określonych parametrach fizykochemicznych oraz metodę realizacji stanu równowagi międzyfazowej, który musi być dobrze odtwarzalny i mieć dokładnie zdefiniowaną temperaturę. Każda skala międzynarodowa definiuje własne punkty stałe, którymi poniżej 0 °C są zazwyczaj punkty potrójne - oraz termometry interpolacyjne i matematyczne zależności służące wyznaczaniu temperatury między punktami z pomiarów parametru termometrycznego, np. oporu elektrycznego czy ciśnienia. Podstawowym termometrem interpolacyjnym rekomendowanym w szerokim zakresie temperatur (od 13 K do kilkuset stopni Celsjusza) jest termometr platynowy. Zbyt mała ilość punktów stałych i ich nierównomierne rozłożenie na skali temperatury nie pozwalają na uzyskanie wymaganej dokładności realizacji skali wyłącznie przy użyciu tego termometru. Aktualnie

obowiązująca Międzynarodowa Skala Temperatury z 1990 r (MST-90) [1-3] - w części niskotemperaturowej (poniżej 0 °C) bazuje na zaledwie sześciu punktach potrójnych umożliwiających kalibrację termometru platynowego z dokładnością ± 0.1 mK tylko w zakresie 13.8 K ÷ 273.16 K. Z tego względu MST-90 w przedziale 0.65 K ÷ 13.8 K, charakteryzującym się brakiem punktów potrójnych - a jednocześnie bardzo interesującym z punktu widzenia zastosowań kriogenicznych, do wyznaczania temperatury zaleca stosowanie znacznie trudniejszych w użyciu termometrów kondensacyjnych (0.5 K ÷ 5 K) i interpolacyjnych termometrów gazowych (3 K ÷ 24.5 K). Na rysunku 1 schematycznie przedstawiono zakresy stosowalności termometrów interpolacyjnych zdefiniowane w MST-90.



Rys.1. Zakresy stosowalności termometrów interpolacyjnych zdefiniowane w MST-90.

Obowiązująca przez dwadzieścia lat przed wprowadzeniem MST-90 Tymczasowa Skala Temperatury z roku 1976 r (TST-76) [4] w zakresie od 0.5 K do 7.2 K definiowała punkty stałe realizowane na przejściach w stan nadprzewodzący wyselekcjonowanych nadprzewodników I rodzaju. Obecnie punkty nadprzewodnikowe zaliczane są do wtórnych punktów MST-90.

2. Nadprzewodnikowe punkty stałe

Idea punktów nadprzewodnikowych zrodziła się w Narodowym Biurze Standardów (NBS*; obecnie NIST* – Narodowy Instytut Standardów i Technologii) w USA w latach siedemdziesiątych [5] i zaowocowała opracowaniem dwóch komercyjnych zestawów nadprzewodników o nazwie SRM 767 i SRM 768 odpowiednio dla zakresów temperatur 0.5 K ÷ 7.2 K (Cd, Zn, Al, In, Pb) i 15 mK ÷ 208 mK (W, Be, Ir, AuAl₂, AuIn₂). Parametry metrologiczne zestawu SRM 767 były na tyle dobre, że Komitet Doradczy Termometrii

* skróty pochodzą od nazw w języku oryginalnym

(CCT*) Międzynarodowego Biura Miar (BIPM*) zarekomendował zestaw SRM 767 jako wzorcowy do realizacji punktów nadprzewodnikowych TST-76. W toku dalszych badań nad punktami nadprzewodnikowymi prowadzonymi w innych ośrodkach (m.in. przez autorów tej pracy w INT i BS PAN [6, 7], a także w instytucie metrologicznym PTB* w Berlinie [8]) okazało się, iż nie jest możliwe podanie technologii sporządzania próbek zapewniającej osiągnięcie wymaganej odtwarzalności temperatury - nie gorszej niż 1mK. Tym samym została naruszona zasada uniwersalności skali międzynarodowej, gdyż definicyjne wartości temperatury odnosiły się już tylko do wyselekcjonowanego materiału wzorca, a nie do określonej substancji.

Odrębnym zagadnieniem było zachowanie długoczasowej stabilności parametrów zestawów SRM. Wyniki badań [5, 9] wskazywały, że technologia SRM 767 nie gwarantowała utrzymania pierwotnych parametrów przez odpowiednio długi okres czasu. Z powyższych względów nadprzewodnikowe punkty stałe zostały zdefiniowane z dokładnością $2.5 \text{ mK} \div 3 \text{ mK}$ i zaliczono je do grupy wtórnych punktów stałych MST-90.

2. Punkty nadprzewodnikowe – ważniejsze problemy realizacji

Temperatura przejścia w stan nadprzewodzący T_c i temperaturowa szerokość przejścia W - podstawowe parametry termometryczne - zależą silnie od czystości chemicznej substancji oraz jakości sieci krystalicznej. Istotny jest rodzaj i koncentracja zanieczyszczeń, dyslokacje i defekty punktowe, naprężenia, skład izotopowy, jednorodność próbki. Największy wpływ na zmianę T_c mają zanieczyszczenia metalami magnetycznymi. Średnie wartości pochodnej dT_c/dc_i (c_i – koncentracja zanieczyszczeń) są rzędu $(0.1 \text{ mK} \div 1\text{mK})/\text{at.ppm}$, ale sięgają też kilkudziesięciu mK/at.ppm (np. dla domieszki Mn w Zn wartość ta wynosi 32 mK/at.ppm). W przypadku niemagnetyków należy uwzględnić składową oddziaływania elektron-fonon oraz efekt anizotropowy - ich łączny wkład do ΔT_c , gdzie $\Delta T_c = T_{c \text{ ideal.}} - T_{c \text{ zanieczyszcz.}}$, jest szacowany na 1mK/at.ppm . Obecność w próbce dyslokacji o „naturalnej” gęstości rzędu $10^5 \text{ cm}^{-2} \div 10^7 \text{ cm}^{-2}$ może zwiększyć szerokość W nawet do 1 mK. Z kolei duże pola naprężeń w próbce powstałe w procesie krystalizacji, wywołane zmianami temperatury, deformacjami montażowymi powodują silną zmianę T_c i W dla nadprzewodników o dużej anizotropii współczynnika rozszerzalności (np. przy schłodzeniu próbki indu w zakresie od 300 K do 4.2 K, $\Delta T_c \approx 25 \text{ mK}$). Udział efektu izotopowego w ΔT_c nie przekracza 0.1 mK dla naturalnych fluktuacji jego składu. W trakcie procesu technologicznego nie ma możliwości wpływu na większość z tych czynników, a ponadto zależności teoretyczne wiążące je z T_c są zbyt złożone i mało dokładne. Podjęte próby oszacowania odchylenia ΔT_c dla próbek Al, Zn i Cd na podstawie znajomości ich oporu resztkowego ρ i szerokości przejścia W dały wynik $\Delta T_c \leq 1 \text{ mK}$ i to przy założeniu braku zanieczyszczeń magnetycznych [8]. W praktyce rozrzut wartości T_c próbek wykonanych w tej samej technologii z materiałów o tej samej czystości nominalnej, ale pochodzących z różnych źródeł może dochodzić nawet do kilku milikelvinów.

* skróty pochodzą od nazw w języku oryginalnym

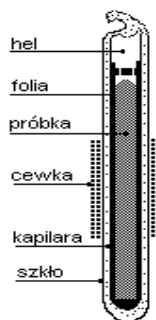
3. Dane eksperymentalne

Metoda pomiaru

Dla celów termometrycznych parametrem detekcji przejścia w stan nadprzewodzący jest podatność magnetyczną. Zaletą tej metody w stosunku do oporowej jest lepsza odtwarzalność T_c , bezkontaktowy pomiar i technologicznie prosty kształt próbki. Wadą jest pomiar zmiany podatności tylko zewnętrznej warstwy próbki o grubości określonej różnicą głębokości wnikania strumienia w stanie normalnym i nadprzewodzącym $\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_o$ (gdzie λ_n – głębokość wnikania pola zależna od konduktywności właściwej i częstości pomiarowej, λ_o – londonowska głębokość wnikania), co w dużym stopniu uzależnia parametry próbki od stanu powierzchni. W praktyce dla częstości ok. 400 Hz $\lambda_n/\lambda_o \approx 10^3$. Badane w INT i BS próbki były umieszczone w czujniku indukcyjności wzajemnej o wspólnym uzwojeniu magnesującym dla kilku próbek. Uzwojenie czujnika stanowiło element mostka Maxwella równoważonego sześciodekadowym dzielnikiem indukcyjnym [10]. Drugie ramię mostka stanowiła wzorcowa indukcyjność wzajemna 2 mH. Jako wskaźnik zera użyto woltomierza homodynamicznego. Temperatura T_c jest silną funkcją pola magnetycznego H (dT_c/dH dla badanych próbek wynosi kilka mK/Oe), tak więc uzyskanie niepewności wyznaczania T_c na poziomie kilkudziesięciu mikrokelwinów wymagało zredukowania pola H do 0.01 Oe w objętości czujnika oraz stosowania przemiennego pola magnesującego o zbliżonej wartości. Redukcję tę osiągnięto przez aktywną kompensację pola magnetycznego umieszczonymi na zewnątrz kriostatu cewkami Helmholtza. Do regulacji temperatury próbki zastosowano specjalnie do tego celu opracowany przemiennoprądowy regulator temperatury typu PID współpracujący z czujnikiem germanowym. Regulator ten zapewniał stabilizację temperatury nie gorszą niż $\pm 50 \mu K$.

Preparatyka próbek

Próbki sporządzano zazwyczaj metodą próżniowego odlewania formując je ze względu na efekt rozmagnesowania w kształcie walca o typowej średnicy (1.5 ÷ 3) mm i długości (25 ÷ 35) mm. Po uformowaniu poddawano je długotrwałemu wygrzewaniu w temperaturze bliskiej temperaturze topnienia w celu redukcji naprężeń. Z uwagi na metodę detekcji bardzo ważne jest zredukowanie dyslokacji w warstwie powierzchniowej próbki.



Rys. 2. Próbka nadprzewodnika w ampule szklanej.

W INT i BS zastosowano w tym celu procesy chemicznego (w przypadku Pb) bądź elektrochemicznego (dla In) polerowania powierzchni. Ponadto oryginalnym rozwiązaniem

autorów jest metoda hermetycznego kapsułowania próbek w ampułkach szklanych w atmosferze ^4He (rys. 2). Kontakt mechaniczny próbki z osłoną miał charakter punktowy dzięki czemu wyeliminowano źródło potencjalnych naprężeń. Hel zapewniał dobry kontakt cieplny i neutralną atmosferę chemiczną.

W technologii SRM767 próbki były klejone do podstawy czujnika bez osłon ochronnych.

Punkty nadprzewodnikowe indu i ołowiu

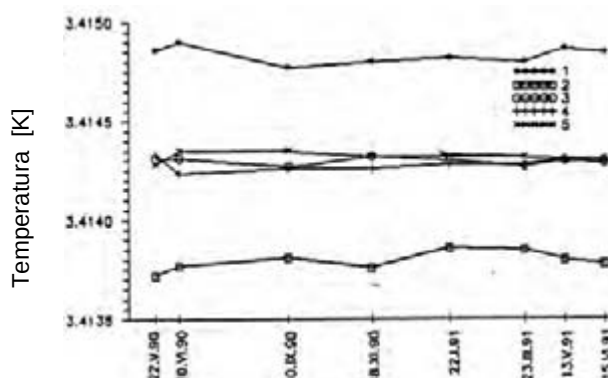
W INT i BS skoncentrowano się przede wszystkim na badaniach próbek indu i ołowiu [11, 12]. Parametry próbek spreparowanych według opisanej technologii (kapsułowanie) w porównaniu z ich odpowiednikami z pierwotnego zestawu SRM-767 i jednej z ostatnich wersji o nazwie „Lima” pokazano w tabeli 1.

Tablica 1. Parametry termometryczne nadprzewodnikowych punktów stałych

	Substancja	Czystość [%]	Szerokość W [mK]	Odtwarzalność T_c [mK]	Unifikacja ²⁾ [mK]
SRM 767	Pb	99.9999	$0.6 \div 2^{1)}$	± 1	± 1
	In	99.9999	$0.5 \div 2.5^{1)}$	± 1	± 1
SRM 767 Lima	Pb	99.9999	-	± 0.042	0.14
	In	99.9999	-	± 0.054	0.52
INTiBS	Pb	99.9999	$0.3 \div 0.4$	± 0.05	0.07
	In	99.9999	$0.3 \div 0.5$	± 0.06	0.08

¹⁾ – zakres wartości W z pomiarów w różnych ośrodkach wykonanych w kilkuletnim okresie czasu (z danych literaturowych)

²⁾ - parametr unifikacji jest maksymalnym rozrzutem T_c próbek wykonanych w tej samej technologii z materiału z tego samego źródła



Rys. 3. Odtwarzalność temperatury T_c próbek indu kapsułowanego w szkle.

Długoczasową odtwarzalność T_c dla pięciu próbek indu kapsułowanego w szkle przedstawiono na rysunku 3. Szerokość W próbek indu w kapsule szklanej nie uległa mierzalnej zmianie po 2 latach.

Punkt nadprzewodnikowy rtęci*

Chociaż zjawisko nadprzewodnictwa odkryte zostało w trakcie badań oporu elektrycznego rtęci, przejście w stan nadprzewodzący rtęci o temperaturze $T_c \approx 4.15$ K nigdy nie zostało wykorzystane jako stały punkt temperatury, mimo że zasługuje on na szczególną uwagę ze względu na potencjalnie ważne zastosowanie dla kalibracji interpolacyjnego termometru gazowego w zakresie temperatur od 3 K do 5 K. Dostępne w literaturze wyniki wskazywały jednak na dużą nieodtwarzalność jego parametrów w kolejnych cyklach termicznych. W INT i BS przeprowadzono badania przejścia nadprzewodzącego rtęci [13, 14] wykorzystując doświadczenia nabyte przy kapsułowaniu innych nadprzewodników, przede wszystkim indu i ołowiu. Próbkę rtęci kapsułowano w ampulkach szklanych o średnicy zewnętrznej 3 mm ÷ 4 mm i długości 40 mm. Ampułkę napełniano rtęcią do około 3/4 jej pojemności, odpompowywano i zatapiało w atmosferze ^4He pod ciśnieniem 4×10^4 Pa.

Pomiary prowadzono dla próbek rtęci o różnej czystości pochodzącej od trzech producentów:

- firmy Goodfellow z Wielkiej Brytanii o czystości 99.9999 %
- firmy Rhone-Alpes z Francji o czystości 99.9999 %
- firmy POCH z Gliwic o czystości 99.999 %.

Wyznaczano dwa podstawowe parametry termometryczne - temperaturę szerokość W i wartość temperatury T_c - przejścia w stan nadprzewodzący. W tabelicy 2 przedstawiono wartości W otrzymane w trzech cyklach pomiarowych dla trzech badanych próbek rtęci pochodzącej z różnych źródeł kapsułowanych bezpośrednio w ampulkach szklanych.

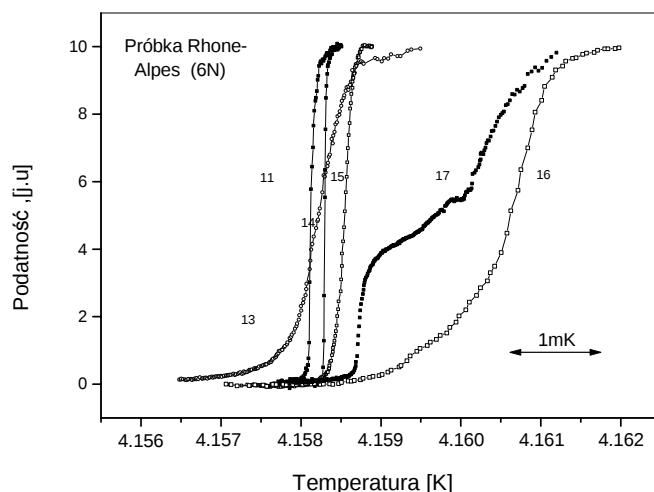
Tabela 2. Szerokość przejścia W próbek rtęci w trzech cyklach chłodzenia

Producent	Czystość [%]	W_1 [mK]	W_2 [mK]	W_3 [mK]
POCH	99.999	0.6	1.1	1.7
Rhone-Alpes	99.9999	1.2	6.0	7.0
Goodfellow	99.9999	15.0	6.8	6.2

Zaobserwowana w trakcie badań zależność temperatury T_c od szerokości W świadcząca o dużej gęstości dyslokacji w materiale była podstawą tezy, że w procesie krystalizacji i chłodzenia w warstwie powierzchniowej rtęci kontaktującej się ze szkłem ampułki mogą powstawać silne naprężenia spowodowane różnymi wartościami współczynników rozszerzalności termicznej rtęci i kapsuły szklanej oraz klejeniem się rtęci do ścianek tej kapsuły. Podjęto próbę redukcji tych naprężeń przez wprowadzenie materiału dystansującego rtęć od szkła charakteryzującego się elastycznością w szerokim zakresie temperatur. Do tego celu użyto folii kaptonowej i mylarowej, oleju silikonowego, wiskozy,

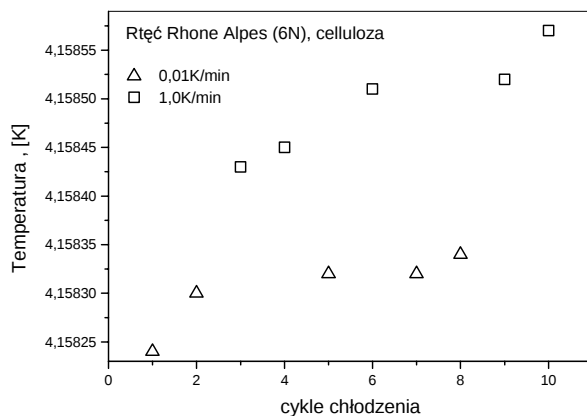
* Badania finansowane z grantu Komitetu Badań Naukowych Nr 8T10C 007 15

papieru oraz kapilar z pianki poliuretanowej i celulozy. Zastosowanie materiałów przekładkowych w różnym stopniu wpłynęło na poprawę parametrów termometrycznych przejścia w stan nadprzewodzący rtęci zmieniając szerokość przejścia W od 2.5 mK dla papieru do 0.06 mK w przypadku kapilar z pianki celulozowej (rys.5).



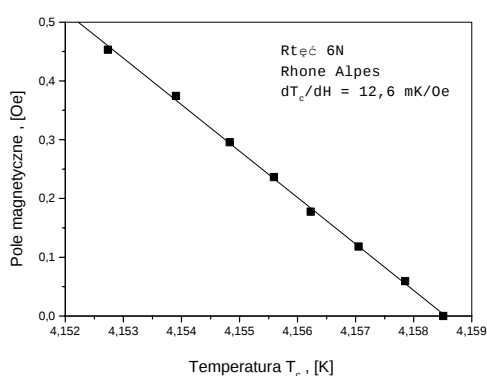
Rys 5. Przejście w stan nadprzewodzący rtęci dla różnych przekładek dystansowych między próbką a ampulką szklaną: 11 – pianka poliuretanowa, 13 – szkło, 14 – rurka celulozowa, 15 - olej silikonowy, 16 – papier, 17 – wiskoza.

Ponieważ istotny wpływ na parametry przejścia nadprzewodzącego mogą mieć naprężenia powstające w procesie krystalizacji rtęci przeprowadzono pomiary wpływu szybkości schładzania (krystalizacji) na wartość T_c tej samej rtęci (Rhone-Alpes) kapsułowanej z wykorzystaniem przekładki celulozowej. Pomiary wykonano dla kilku cykli chłodzenia. Zaobserwowano nieznaczną zależność T_c od szybkości chłodzenia dT/dt (rys. 6). Wzrost wartości T_c przy zmianie dT/dt od 0.01 mK/min do 1 K/min może świadczyć o zwiększeniu naprężeń wewnątrz próbki.

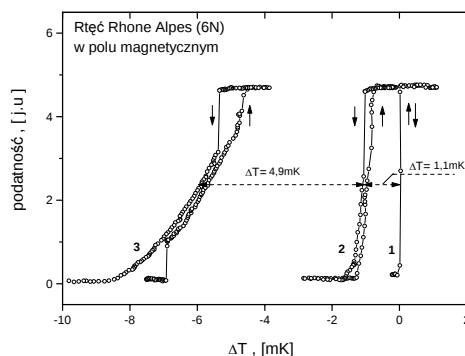


Rys. 6. Zależność temperatury T_c od szybkości chłodzenia próbki rtęci.

Pomiary wpływu pola magnetycznego na temperaturę T_c , temperaturową szerokość przejścia W i wielkość histerezy są niezbędne dla oszacowania wielkości błędów wnoszonych przez to pole, jak również zastosowania skutecznych metod jego kompensacji. Rysunek 7 przedstawia zależność T_c rtęci Rhone Alpes od stałego pola magnetycznego o wektorze skierowanym wzdłuż osi podłużnej próbki. W zakresie wartości nie przekraczających pola ziemskiego (do 0,5 Oe) zależność tę można aproksymować z dobrą dokładnością funkcją liniową. Czułość $dT/dH \big|_{T=T_c}$ wynosi 12,6 mK/Oe.



Rys. 7. Zależność temperatury T_c rtęci od stałego pola magnetycznego.

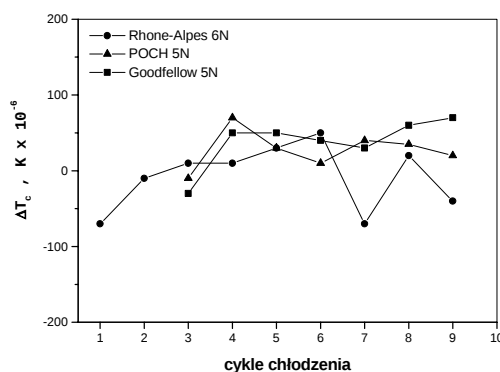


Rys. 8. Wpływ składowych ziemskiego pola magnetycznego na zmianę T_c , szerokość przejścia W i efekt histerezy dla rtęci Rhone-Alpes w szkło z przekładką celulozową.

- 1 – składowe pola ziemskiego H_z skompensowane do wartości $< 0,01\text{Oe}$
- 2 – składowa pozioma H_z
- 3 – składowa pozioma i pionowa H_z .

Na rysunku 8 pokazano wpływ ziemskiego pola magnetycznego H_z (składowa pozioma: 0.19050 Oe, składowa pionowa: 0.45307 Oe) na temperaturę T_c , szerokość przejścia W i histerezę dla rtęci Rhone Alpes. Zaobserwowano zmianę temperatury T_c pod wpływem składowej poziomej pola ziemskiego o 1.1 mK, a w obecności obu składowych o 6 mK w stosunku do wartości dla pola skompensowanego. Wystąpił wzrost W od wartości 0.1 mK (dla $H < 0.01\text{Oe}$) do 0.3 mK w obecności składowej poziomej H_z i do 2.3 mK dla obu składowych pola H_z . Efekt histerezy dla rtęci w ziemskim polu nie jest niewielki.

Dla próbek rtęci pochodzących od różnych producentów kapsułowanych w ampułkach szklanych przy użyciu kapilar celulozowych wyznaczono odtwarzalność T_c w czasie w zredukowanym polu magnetycznym. Wyniki przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Odtwarzalność temperatury T_c próbek rtęci kapsułowanych w szkłe z przekładkami z kapilary celulozowej w kolejnych cyklach pomiarowych.

Wszystkie próbki zmierzone w dziewięciu cyklach wykazały odtwarzalność T_c w granicach ± 0.1 mK. Jest to wynik o tyle istotny, iż jednym z zastrzeżeń wysuwanych wobec koncepcji wykorzystania rtęci jako stałego punktu była „niedefiniowalność” własności próbki poddawanej procesom krystalizacji i topnienia w każdym cyklu pomiarowym. Można zauważyć, że wartości temperatury T_c próbek wykonanych z różnych materiałów nie różnią się także więcej niż ± 0.1 mK. Jest to wynik znacznie lepszy od możliwego do uzyskania dla takich materiałów jak ind czy ołów.

Taką odtwarzalnością temperatury charakteryzują się punkty MST-90.

Punkty nadprzewodnikowe w najniższych temperaturach

Rozwijające się badania w zakresie najniższych temperatur – poniżej 1 K - wymagają opracowania właściwych dla tego zakresu metod pomiarowych i odpowiednich w tym zakresie wzorców. Na jednym z ostatnich posiedzeń Generalnej Konferencji Miar ustanowiono tymczasową skalę temperatury dla zakresu od 1 K do 10 mK bazującą na zależności ciśnienia topnienia zestalonego ^3He od temperatury [15]. Zależność ta jest zależnością termodynamiczną opisywaną równaniem Clausiusa-Clapeyrona. W praktyce jednak z równania tego nie można w prosty sposób wyznaczyć wystarczająco dokładnie przebiegu krzywej ciśnienia topnienia ^3He . Krzywa ta została wyznaczona doświadczalnie. Weryfikacji poprawnego przebiegu krzywej dokonuje się m.in. przy użyciu nadprzewodnikowych punktów stałych opracowanych w laboratoriach w Holandii [16]. Zestawienie tych punktów zawiera tablica 3.

Tablica 3. Zestawienie niskotemperaturowych punktów nadprzewodnikowych

Material	W	$\text{Ir}_{0.8}\text{Rh}_{0.2}$	$\text{Ir}_{0.92}\text{Rh}_{0.08}$	Ir	AuAl_2	AuIn_2	Cd	Zn	Al
T_c [mK]	15.34	33.9	65.4	103.7	159.2	209	540	850	1134
$\text{Err}(T_c)/T_c$	?	0.6	0.2	0.2	0.2	0.3	0.6	0.4	0.1

4. Podsumowanie

Badań nadprzewodnikowych punktów stałych spowodowany był głównie potrzebą opracowania wzorców temperatury w zakresie najniższych temperatur. Zaletą ich jest duża odtwarzalność temperatury przejścia. Małe gabaryty ułatwiają transfer skal między laboratoriami, umożliwiają także weryfikację wzorcowania termometrów wtórnych. Dalszy rozwój prac związanych z wykorzystaniem nadprzewodnictwa w termometrii uzależniony będzie od postępu w technologii uzyskiwania materiałów nadprzewodnikowych o najwyższej czystości fizycznej i chemicznej.

Literatura

1. Preston-Thomas H., International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, vol. 27, 1990, pp 3 – 10
2. Międzynarodowa Skala Temperatury z 1990 (MST-90), Zarządzenie nr 161. Prezesa GUM z dnia 25. października 1996 r, Dz. Urzędowy Miar i Probiernictwa Nr 27/96, poz. 28
3. Szmyrka-Grzebyk A., Lipiński L., Manuszkiewicz H., Realizacja Międzynarodowej Skali Temperatury 1990 poniżej 0°C, *Normalizacja* nr 10, 1993, str. 19 – 13
4. The 1976 Provisional 0.5 to 30 K Temperature Scale, *Metrologia* vol. 15, 1979, 651 – 654
5. Schooley J.F., Soulen R.J.Jr, *Advances in Cryogenic Engineering*, vol 17, New York and London 1972, pp 169 – 174
6. Manuszkiewicz H., Opracowanie wzorców skali temperatury poniżej 13,81 K, praca doktorska, INTiBS PAN, Wrocław 1994
7. Lipiński L., Manuszkiewicz H., Szmyrka-Grzebyk A., Odtwarzalność temperatury przejścia nadprzewodnikowego próbek indu; *Chłodnictwo* no 1, 1992, str. 32 - 34
8. Fellmuth B., Temperature fixed-points using high-purity superconductors, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol 6, American Institute of Physics, Toronto 1992, pp. 233 - 238
9. Inaba A., Mitsui K., Reproducibility of Superconductive Transition Temperature of Lead and Indium, *Document CCT/80-19*, BIPM, Paryż 1980
10. Lisowski M., Pomiar indukcyjności wzajemnej jako parametru czujników podatności magnetycznej w niskich temperaturach; *Prace naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej*, Seria Monografie, Wrocław 1990
11. Lipiński L., Manuszkiewicz H., Szmyrka-Grzebyk A., Long-term stability of the temperature of indium superconducting transition, Workshop on Uncertainties in Temperature Measurements, Paryż 1992, Preprints pp. 29 - 31
12. Lipiński L., Manuszkiewicz H., Szmyrka-Grzebyk A., Reproducibility of superconducting transition temperature of encapsulated samples of indium used as thermometric fixed point, *Cryogenics* vol. 33, no10, 1993, pp. 9 – 11
13. Lipiński L., Manuszkiewicz H., Szmyrka-Grzebyk A., Temperatura przejścia w stan nadprzewodzący rtęci - nowy punkt termometryczny, Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk, Materiały Konferencyjne tom 4, 1998, str. 137 - 141
14. Lipiński L., Manuszkiewicz H., Szmyrka-Grzebyk A., Superconducting transition of mercury for used as a temperature fixed point, *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, tom VI, zeszyt 1-2, 1999, str. 47 – 52
15. Szmyrka-Grzebyk A., Lipiński L., Manuszkiewicz H., Międzynarodowa skala temperatury zmierza do 10 mK, *Metrologia i Probiernictwo*, nr 4/9, 1999, str. 6 – 9
16. Storm A.J., Search for superconducting fixed points for the new ultra-low temperature scale, praca doktorska, Rijksuniversiteit Leiden, 1998.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



**WSPÓŁCZESNE TECHNOLOGIE I KIERUNKI BADAŃ
NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU**

Tadeusz Janowski, Paweł Surdacki

Politechnika Lubelska

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin

E-mail: pawels@eltecol.pol.lublin.pl

Abstract

This paper presents the review of the contemporary concept, design and technology approaches to the superconducting fault current limiters (SFCL). The essential features of each type of the SFCL have been highlighted and the research problems to solve in the near future have been suggested. The SFCL device application advantages and the ongoing and accomplished projects have been summarized.

Keywords: superconducting fault current limiter (SFCL), superconducting power devices, high temperature superconductors (HTS).

Słowa kluczowe: nadprzewodnikowe ograniczniki prądu (NOP), energetyczne urządzenia nadprzewodnikowe, nadprzewodniki wysokotemperaturowe.

1. Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz konkurencyjność producentów i dostawców wymagają coraz lepszej jej jakości i niezawodności dostawy. Wzrastający wraz z postępującym rozwojem elektroenergetyki poziom prądów zwarcia powoduje, że stosowane dotychczas środki mające na celu ograniczenie skutków zwarć, tzn. wyłączniki, bezpieczniki, dławiki powietrzne, transformatory o dużej impedancji oraz sekcjonowanie układu elektroenergetycznego, przestają być efektywne i zwiększają koszty przesyłania energii elektrycznej [1,16,17].

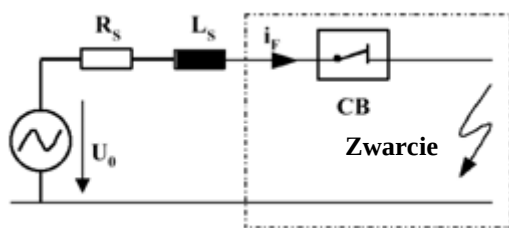
Koncepcja ograniczania prądów zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych, która powstała na bazie układów nadprzewodnikowych, opiera się na nieliniowej właściwości

gwałtownego przejścia elementu nadprzewodnikowego od stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego po przekroczeniu jego wartości krytycznej prądu [18,21]. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych mogą zwiększyć wydajność sieci i zapewnić jej elastyczne rozszerzanie bez kosztownej wymiany dotychczas stosowanych urządzeń i aparatury łączeniowej. Zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu może przynieść duże korzyści ekonomiczne, ponieważ wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną nie będzie konieczności dostosowywania generatorów, transformatorów, aparatury łączeniowej i zabezpieczeń do wzrastających poziomów prądów zwarciovych [7,17,19,20].

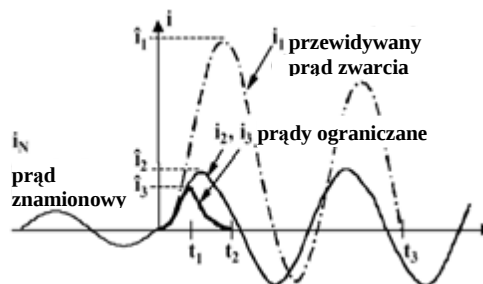
Warunki do realizacji nadprzewodnikowych ograniczników prądowych powstały dopiero przed kilku laty, kiedy opracowano technologię przemysłowego wytwarzania silnopiędowych elementów z nadprzewodników wysokotemperaturowych oraz kontaktowych układów chłodzenia (kriochłodziarek) [10,11]. Prowadzone są na świecie intensywne badania i powstają pierwsze oferty dostawy takich urządzeń [3,15]. W Polsce problematykę badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu podjęto ostatnio w lubelskim ośrodku zastosowań nadprzewodnictwa [12,22].

2. Koncepcja ograniczania prądu zwarcia

W przypadku wystąpienia zwarcia w układzie elektroenergetycznym (rys. 1), wzrost powstałego prądu zwarcia zależy od przyłożonego napięcia U_0 , impedancji obwodu $Z_s = R_s + jX_s$ oraz kąta fazowego, przy którym wystąpiło zwarcie. Najprostszą metodą ograniczenia przewidywanego prądu zwarcia i_1 (rys. 2), mającego wartości kilkadziesiąt razy większe od prądu znamionowego I_N sieci, może być znaczne zwiększenie impedancji Z_s źródła zasilającego. Takie rozwiązanie wpłynęłoby jednak niekorzystnie na prąd przy



Rys. 1. Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego podczas zwarcia.



Rys. 2. Przebiegi prądu podczas zwarcia [21].

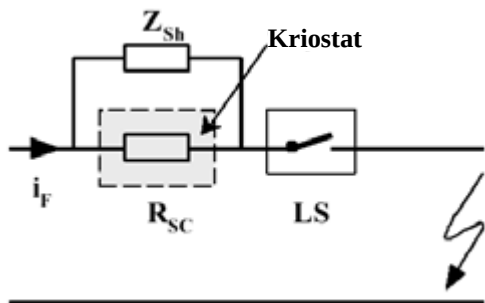
zwiększaniu obciążenia odbiorców podczas pracy znamionowej. Bez zastosowania dodatkowego ograniczenia prądu, konwencjonalny wyłącznik prądowy CB rozłączy obwód w chwili t_3 przechodzenia prądu przez wartość zerową dopiero po kilku okresach od chwili powstania zwarcia. W tym czasie nadmierne wartości amplitudy prądu zwarcia, jak też szybkie zmiany jego wartości chwilowej mogą spowodować uszkodzenie lub zniszczenie urządzeń elektroenergetycznych i aparatury łączeniowej, wywołane powstającymi siłami elektrodynamicznymi, naprężeniami mechanicznymi i cieplnymi, jak też gwałtownym wydzielaniem się energii cieplnej w miejscu wystąpienia zwarcia [21]. W celu ograniczenia pierwszej amplitudy prądu i_1 urządzenie ograniczające powinno zadziałać w czasie t_1 i ograniczyć wzrost prądu di/dt przynajmniej do zera. Można to

zrealizować, eliminując napięcie na reaktancji źródła L_s poprzez skokowe wprowadzenie dużego napięcia w obwodzie na elemencie nieliniowym, który ograniczy prąd zwarcia (przebieg i_2) lub wyłączy go w chwili t_2 (przebieg i_3) [21]. Nadprzewodniki, które mają silnie nieliniową charakterystykę napięciowo-prądową, są doskonałymi materiałami, które mogą ograniczać nadmierne prądy w obwodach elektrycznych.

Koncepcja nadprzewodnikowych ograniczników prądu (NOP) typu rezystancyjnego powstała w latach osiemdziesiątych w kilku zagranicznych ośrodkach badawczych zajmujących się zastosowaniami nadprzewodnictwa [5,17,18,19]. Początkowo opierała się ona na wykorzystaniu nadprzewodników niskotemperaturowych, których technologia rozwinęła się w stopniu wystarczającym do wprowadzenia ich do zastosowań przemysłowych. Jednak wysokie koszty wytwarzania nadprzewodników niskotemperaturowych i konieczność stosowania skomplikowanej i kosztownej technologii kriogenicznej, opartej na ciekłym helu o temperaturze wrzenia ok. 4 K, spowolniły prace badawcze nad nadprzewodnikowymi ogranicznikami prądu. Odkrycie w 1986 r. wysokotemperaturowych nadprzewodników ceramicznych spowodowało powstanie nowych koncepcji rozwiązań nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego. Jednak dopiero w latach dziewięćdziesiątych, wraz z ulepszaniem technologii nowych materiałów ceramicznych o coraz wyższych temperaturach krytycznych i obniżaniem kosztów ich wytwarzania, rozwinęły się możliwości badań nad układami nadprzewodnikowych ograniczników typu indukcyjnego [2,18]. Ze względu na znacznie niższy koszt technologii chłodzenia ciekłym azotem o temperaturze wrzenia 77 K, ograniczniki z nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi mają szerokie potencjalne możliwości zastosowań, szczególnie w układach elektroenergetycznych.

3. Ograniczniki typu rezystancyjnego

Układy nadprzewodnikowych ograniczników prądu (NOP) typu rezystancyjnego (rys. 3) opierają się na bezpośrednim włączeniu elementu nadprzewodnikowego do zabezpieczanej linii energetycznej [5,6]. Ograniczenie prądu zwarciovego następuje, gdy osiąga on wartość prądu krytycznego nadprzewodnika, który samoczynnie i gwałtownie przechodzi wtedy do stanu o dużej rezystancji.



Rys. 3. Schemat nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego w linii elektroenergetycznej.

Prąd przejmowany jest przez bocznikujący rezystor [23], cewkę [6] lub warystor o mniejszej impedancji. Wszystkie układy NOP typu rezystancyjnego charakteryzują się małym ciężarem i objętością, wymagają jednak użycia kosztownych przepustów prądowych, które doprowadzają prąd z linii energetycznej do układu kriogenicznego. Podczas pracy zwarcioviej przepusty stanowią źródło ciepła doprowadzanego do układu chłodzenia, co zwiększa koszty jego eksploatacji.

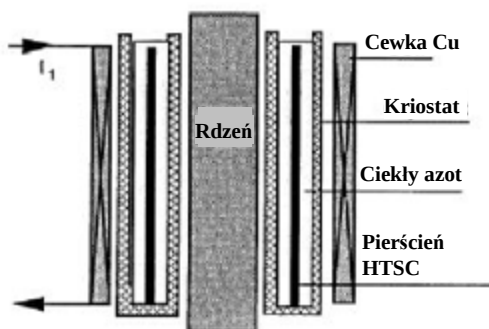
Konstrukcje [6] i [23] wykorzystują kosztowny włóknisty nadprzewodnik niskotemperaturowy NbTi ze stabilizatorem CuNi o wysokiej rezystywności, zaprojektowany do pracy przy prądach przemiennych rzędu kA, chłodzony ciekłym heliem.

Problemy projektowe wymagające rozwiązania, to: zbyt niskie wartości prądu krytycznego wielożyłowego przewodu przy prądzie przemiennym w stosunku do wartości przy prądzie stałym, niekontrolowane zanikanie nadprzewodzenia, wywołane przemieszczaniem się przewodu pod wpływem sił elektrodynamicznych oraz znaczne odparowywanie ciekłego helu w czasie pracy zwarciowej, co wymaga współpracy z kriochłodziarką. W coraz liczniejszych pracach mających na celu zastosowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych w rezystancyjnych układach NOP istotnym problemem jest zmniejszenie strat przy prądach przemiennych, co zostało już wcześniej rozwiązane dla nadprzewodników niskotemperaturowych.

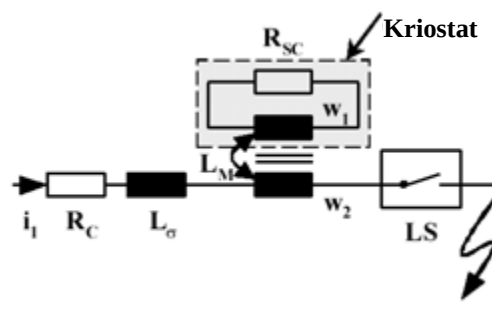
Zaletą NOP typu rezystancyjnego jest bardzo duża wartość rezystywności nadprzewodników wysokotemperaturowych, przekraczająca $10 \mu\Omega$, co prowadzi do zmniejszenia objętości elementu nadprzewodnikowego. Po zadziałaniu ogranicznika następuje zbyt duży wzrost temperatury elementu, związany z niewielką pojemnością cieplną ceramiki nadprzewodnikowej. W celu zwiększenia pojemności cieplnej, w konstrukcji [5] użyto cienkich warstw ($0.2 - 2 \mu\text{m}$) nadprzewodnika wysokotemperaturowego na podłożu szafiru lub cyrkonu stabilizowanego itrem (YSZ), co jednak podwyższa złożoność i koszt rozwiązania.

4. Ograniczniki typu indukcyjnego

Układ NOP typu indukcyjnego (rys. 4 i 5) składa się z nieuwarstwionego rdzenia ferromagnetycznego, miedzianego uzwojenia pierwotnego i pierścienia nadprzewodnikowego w kształcie tuby [2,13]. Uzwojenie pierwotne jest połączone szeregowo z zabezpieczoną linią energetyczną lub urządzeniem. Uzwojeniem wtórnym jest nadprzewodnikowy pierścień, pracujący jako zwój zwarty.



Rys. 4. Przekrój układu NOP typu indukcyjnego.



Rys. 5. Schemat układu NOP typu indukcyjnego w linii elektroenergetycznej.

Pierścień nadprzewodnikowy znajduje się w kriostacie z ciekłym azotem. Gdy nadprzewodnikowy pierścień jest w stanie nadprzewodzenia, rdzeń ferromagnetyczny jest ekranowany od strumienia magnetycznego uzwojenia pierwotnego i impedancja tego uzwojenia jest mała. Gdy prąd w pierścieniu zwiększa się do wartości krytycznej nadprzewodnika, następuje gwałtowne przejście ze stanu nadprzewodzenia do stanu

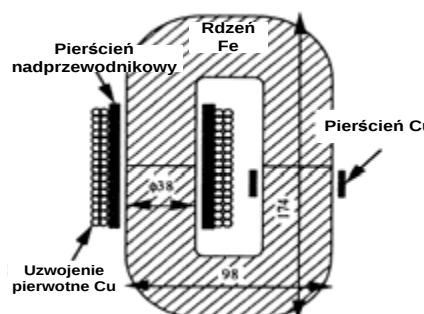
rezystywnego. Powstająca rezystancja jest transformowana do uzwojenia pierwotnego i poprzez zwiększenie impedancji układu NOP ogranicza prąd zwarcia. Gwałtowny wzrost strumienia magnetycznego w rdzeniu powoduje jego nasycenie. Zaletami indukcyjnych układów NOP są: separacja elektryczna elementu nadprzewodnikowego od obwodu linii energetycznej oraz brak przepustów prądowych. Wadami tych układów są stosunkowo duży ciężar i objętość związane z koniecznością użycia rdzenia ferromagnetycznego.

Kilka zespołów na świecie [14,15,19] zajmuje się badaniem tego typu rozwiązania, wskazując na obiecujące perspektywy jego działania i zastosowania, co znalazło wyraz w pierwszym działającym obwodzie transformatora hydroelektrowni [19]. Zagadnienia projektowe, które wymagają dalszego zbadania i rozwiązania, to: możliwość wykorzystania niemetalicznych kriostatów w celu redukcji indukowanych prądów wirowych, przeciwdziałanie rozrywającym lub ściskającym siłom elektrodynamicznym działającym na pierścień nadprzewodnikowy, powstającym w stanach przejściowych ogranicznika, redukcja przejściowej niejednorodności cieplnej układu, optymalizacja czasu ponownego schłodzenia i odzyskania właściwości nadprzewodzenia oraz możliwość wykorzystania dodatkowego (trójnego) uzwojenia do sterowania poziomem prądu wyzwalania, jak też pierścienia miedzianego pochłaniającego część energii wydzielonej podczas zwarcia (rys. 6).

W związku z udoskonaleniem przekładników mikroprocesorowych, które mogą wykrywać zwarcia już w pierwszym półokresie, należy również zbadać możliwość zastosowania zewnętrznych układów wyzwalania ograniczników. Dałoby to możliwość uniezależnienia sterowania poziomem prądu wyzwalania od właściwości nadprzewodnika i zmienności jego punktu pracy w warunkach kriogenicznych. Obecnie większość prac koncentruje się jednak wciąż na układach samowyzwalających NOP.

W czasie ograniczania prądu zwarciaowego niektóre części elementu nadprzewodnikowego mogą wcześniej niż inne wchodzić w stan przejściowy zanikania nadprzewodzenia, w wyniku niejednorodnego rozkładu parametrów materiałowych, temperatury i pola magnetycznego [2,19]. Niejednorodność ta jest szczególnie istotna, gdy prąd wyzwolenia ogranicznika jest bliski szczytowemu prądowi zwarcia, co może prowadzić do wydłużenia czasu trwania stanu przejściowego przechodzenia do stanu rezystywnego, połączonego z niekompletną komutacją prądu zwarcia do elementu bocznikującego.

W badaniach układów NOPZ należałoby określić poziom temperatury, pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych, przy których możliwa byłaby niezawodna i efektywna praca ogranicznika w warunkach znacznej niejednorodności parametrów. Dla nadprzewodników niskotemperaturowych, przy dużej prędkości propagacji zaburzenia



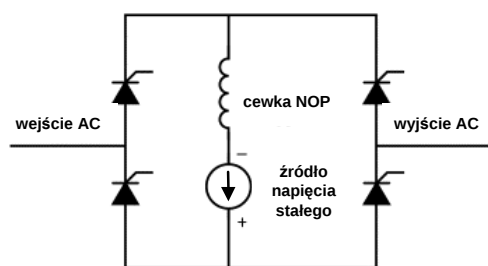
Rys. 6. Konstrukcja układu NOPZ typu indukcyjnego z pierścieniem miedzianym pochłaniającym część energii wydzielonej podczas zwarcia w celu zmniejszenia czasu schładzania pierścienia ekranującego [3].

rezystywnego rzędu $10\text{-}10^3$ m/s, następuje stosunkowo szybkie wyrównywanie niejednorodności rozkładu temperatury. Jednak dla układów z nadprzewodnikiem wysokotemperaturowym, dla którego prędkość propagacji jest zaledwie rzędu 10^{-2} m/s, zagadnienie pracy przy niejednorodnościach do czasu otwarcia wyłącznika w chwili osiągnięcia zerowej wartości chwilowej prądu, wymaga analizy i pogłębionych badań projektowych.

Analizy wymaga również zagadnienie minimalizacji czasu schłodzenia i powrotu elementu nadprzewodnikowego do pracy znamionowej w sieci, który jest rzędu sekund [19]. Jednym z możliwych rozwiązań jest połączenie równoległe kilku elementów NOP, przy którym zimny element jest dostępny natychmiast po zadziałaniu układu ogranicznika. Wadą tego rozwiązania jest znaczna złożoność i koszt konstrukcji, brak cieplnego sprzężenia pomiędzy elementami i konieczność stosowania układu przełączania.

5. Inne typy ograniczników

Obok omawianych rozwiązań układów NOP, których działanie oparte jest na procesie zanikania nadprzewodzenia, w pracach [8,9,14] zaproponowano nadprzewodnikowy



Rys. 7. Schemat NOP w układzie mostka tyrystorowego.

ogranicznik prądu w układzie mostkowego prostownika tyrystorowego (rys. 7). Cewka nadprzewodnikowa w tym układzie pracuje znamionowo w stanie nadprzewodzenia przy prądzie stałym, nie wnosząc do zabezpieczanej linii żadnej impedancji. Przy pracy zwarciowej nagły wzrost prądu powoduje pojawienie się w obwodzie impedancji cewki nadprzewodnikowej, ograniczającej prąd zwarcia. W powyższym rozwiązaniu cewka stale pracuje w stanie nadprzewodzenia i stany przejściowe związane z utratą tego stanu nie są istotne przy analizie pracy układu.

6. Stany przejściowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu

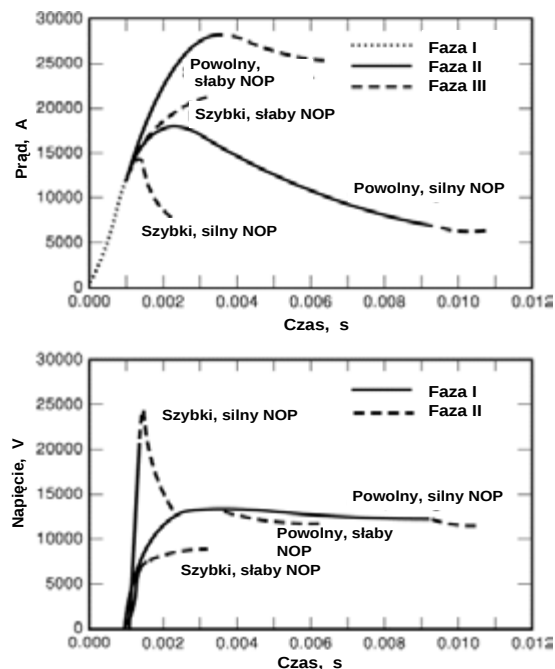
W analizie i projektowaniu układów NOP typu rezystancyjnego i indukcyjnego istotną rolę odgrywa praca elementu nadprzewodnikowego w stanach przejściowych [19]. W stanach tych można wyróżnić *trzy fazy czasowe* (rys. 8): 1) praca bezpośrednio przed rozpoczęciem ograniczania prądu, 2) narastanie rezystancji od wartości zerowej do maksymalnej, 3) praca przy pełnym zaniku nadprzewodzenia aż do zadziałania wyłącznika prądowego.

Element nadprzewodnikowy zwiększa swą rezystancję od zera do znacznej wartości, która może ograniczyć prąd zwarcia. Zachodzący proces propagacji strefy rezystywnej jest trudny do opisu matematycznego, ze względu na szybko zmieniający się w czasie prąd, rezystancję i napięcie, które są sprzężone z bardzo niejednorodnymi niestacjonarnymi rozkładami indukcji magnetycznej, krytycznej gęstości prądu, temperatury rzeczywistej i krytycznej oraz zmieniającymi się w czasie i przestrzeni przewodnością cieplną i ciepłem właściwym materiału.

W zależności od wartości uzyskiwanej rezystancji elementu nadprzewodnikowego, analizowane układy NOP można podzielić na układy o działaniu *słabym* lub *mocnym*. W zależności od szybkości wzrostu tej rezystancji można wyróżnić układy o działaniu *szybkim* lub *powolnym*.

Siła i szybkość działania układu NOP zależy od parametrów układu energetycznego jak też od parametrów samego ogranicznika: rezystancji, ciepła właściwego, prądu zadziałania i różnicy pomiędzy temperaturami krytycznymi i rzeczywistymi. W działaniu układów NOPZ można wyróżnić cztery uproszczone przypadki (rys. 8): a) silne szybkie, b) silne powolne, c) słabe szybkie, d) słabe powolne.

Ogranicznik o działaniu silnym i szybkim daje najmniejszą wartość szczytową ograniczanego prądu, jednak powoduje znaczne przepięcia na zaciskach. Osłabienie szybkiego ogranicznika zmniejszy wartości przepięć kosztem zwiększenia wartości ograniczanego prądu. Spowolnienie silnego ogranicznika zwiększy poziom ograniczania prądu i może zwiększyć przepięcia. Zarówno siła i szybkość ogranicznika są pożądane dla jego skutecznego działania, jednak muszą one być optymalnie zaprojektowane, aby zminimalizować poziom przepięć na zaciskach układu. Gdy wymagane jest tylko słabe ograniczanie prądu, wartości przepięć układu mogą być sterowane prędkością działania elementu nadprzewodnikowego. Istotnym zagadnieniem przy doborze parametrów działania układu jest również sterowanie wydzielaniem energii w warunkach zwarciovych, w celu przeciwdziałania niepożądanym przegrzaniom i uszkodzeniu układu.



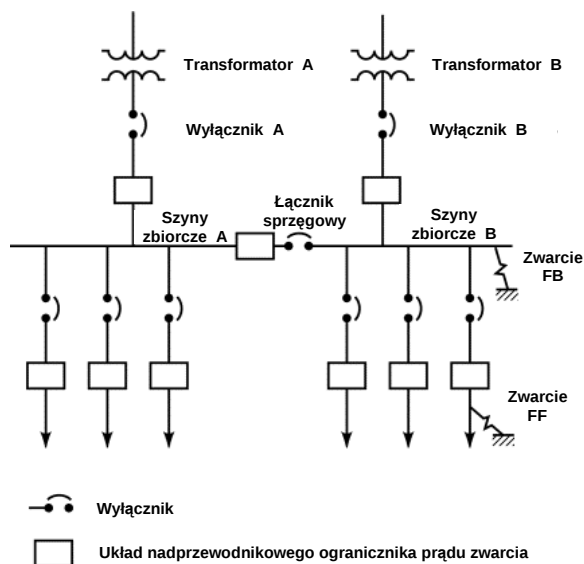
Rys. 8. Przebiegi prądu i napięcia dla różnych układów NOP w zależności od wartości rezystancji i szybkości jej przyrostu.

7. Możliwości zastosowania ograniczników nadprzewodnikowych

Aktualnie badane są możliwości ograniczania prądów zwarcia przez ograniczniki nadprzewodnikowe, umieszczone szeregowo z klasycznymi wyłącznikami prądowymi w różnych miejscach podstacji energetycznej (rys. 9) [14,17,19]:

1) po stronie wtórnej transformatora B, co ograniczy prąd zwarcia FB na szynach zbiorczych, 2) w przewodzie zasilającym, w przypadku zwarcia FF, 3) szeregowo z łącznikiem sprzęgowym szyn zbiorczych.

Połączenie szyn zbiorczych transformatorów A i B polepsza możliwość regulacji napięcia obciążenia i ogólną niezawodność układu, kosztem znacznie podwyższonych prądów zwarcia, pochodzących od obu transformatorów. W przypadku takiego zwarcia FB szyn zbiorczych, ogranicznik prądowy współpracujący z klasycznym łącznikiem sprzęgowym może zapewnić dalszą bezpieczną pracę układu.



Rys. 9. Możliwości lokalizacji układów NOPZ w podstacji energetycznej.

Dzięki zastosowaniu układów NOP do ograniczania prądów zwarcia do niskiego poziomu, można będzie zwiększyć bezpieczeństwo, niezawodność i sprawność układu elektroenergetycznego, jak też poprawić jakość przesyłanej energii elektrycznej. W związku z pojawieniem się wielu konkurencyjnych dostawców na rynku energii elektrycznej, postępująca deregulacja energetyki wymusza konieczność łączenia niezależnych producentów energii oraz jej importu. Przy włączeniu do sieci układów NOP, rosnące wartości prądów zwarcia połączonych układów elektroenergetycznych nie będą wymagały stosowania

transformatorów i dławików o zwiększonej impedancji, budowy nowych podstacji przesyłowych lub dostosowania ich wyposażenia do znacznie większych prądów zwarcia. Nie będzie też konieczne sekcjonowanie układu elektroenergetycznego dla zapobieżenia nadmiernym wartościom prądów zwarcia. Zabezpieczenie przed nadmiernymi prądami zwarcia umożliwi z kolei wprowadzenie do układu elektroenergetycznego innych urządzeń nadprzewodnikowych: generatorów, silników, transformatorów i kablowych linii przesyłowych, które są wrażliwe na działanie prądów zwarcia.

Obecnie nie opracowano jeszcze standardów, które układy nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcia, podobnie jak transformatory i klasyczne wyłączniki prądowe, powinny spełniać w celu zastosowania ich w układach użytkowych, spełniających wymagania bezpieczeństwa (zagrożenia związane ze znacznymi polami rozproszenia) oraz niezawodności i dostępności, przy pracy zwarciowej, znamionowej i przy przeciążeniach. Układy NOP powinny mieć jednak możliwość natychmiastowej reakcji na wystąpienie zwarcia w sieci, szybkiego (poniżej jednego okresu) ograniczania prądu zwarcia do pożądanej wartości, w tym również ograniczania prądu do wartości zerowej w sytuacjach krytycznych. Powinny także mieć zdolność ograniczania serii następujących po sobie zwarć, samoczynnego powrotu (bez konieczności obsługi) do początkowego stanu pracy znamionowej po zadziałaniu. Ponadto powinny charakteryzować się zwartą budową, niewielką masą, niezawodnością działania i niskim kosztem [1,16,17].

Zastosowania układów NOP na skalę przemysłową wiązałyby się również z koniecznością rozwiązania złożonych problemów, specyficznych dla technologii urządzeń nadprzewodnikowych. Zagadnienia te są dopiero na etapie badań naukowych, projektów technologicznych będących w fazie opracowywania oraz nielicznych jeszcze ukończonych i wdrożonych konstrukcji.

8. Projektowane i zrealizowane konstrukcje układów NOP

W ostatnich latach zbudowano kilka przemysłowych rozwiązań układów NOP w USA, m.in. przez firmę General Atomic [1,7] (ograniczniki typu rezystancyjnego o napięciach znamionowych 2,4 kV oraz 15 kV), a także w Japonii [3] (ograniczniki o napięciach 6,6 kV oraz 22 kV). W Europie zrealizowano lub realizuje się kilka dużych i szereg małych projektów nadprzewodnikowych ograniczników prądu [15].

Firma szwajcarsko-szwedzka ABB zainstalowała w elektrowni wodnej w Szwajcarii indukcyjny trójfazowy układ NOP o mocy 1,2 MVA [18]. Następnie testowała ona bardziej zwarty prototyp o mocy 1,6 MVA typu rezystancyjnego przy użyciu nadprzewodnika wysokotemperaturowego z materiału Bi-2212 zastosowanego też wcześniej w jednostce 1,2 MVA. Objętość urządzenia zmniejszyła się do ok. 25% objętości jednostki 1,2 MVA typu indukcyjnego. Firma Siemens (Niemcy) badała ograniczniki typu rezystancyjnego [5]. Skoncentrowała się na pracach nad elementami przełączającymi o wymiarach 20 x 20 cm², pokrytych cienkimi (ok. 1,2 μm) warstwami nadprzewodnika YBCO. Elementy przełączające wykazywały wartości krytycznej gęstości prądu ponad 10⁹ A/m² z gęstościami mocy przekraczającymi 3 MW/m². Model o mocy 100 kVA z pięcioma elementami przełączającymi posłużył do zbudowania jednostki trójfazowej o mocy 1 MVA, która została pomyślnie przetestowana. Planowany jest do testowania w sieci elektroenergetycznej układ trójfazowy o mocy 30 MVA. W celu znacznego zredukowania strat przemiennoprądowych, firma Siemens projektuje układ z wieloma elementami nadprzewodnikowymi połączonymi równolegle. Projekt kierowany przez firmę ACCEL [15] ma na celu zbudowanie i testowanie w 2002 r. jednostki demonstracyjnej o mocy 10 MVA ogranicznika typu rezystancyjnego opartego na materiałach Bi2212 i YBCO.

W ramach projektu BYFAULT (Barcelona, Hiszpania) [4] badany jest hybrydowy układ ogranicznika, w którym ograniczenia prądu dokonują sztabki YBCO, które zwierają uzwojenie wtórne transformatora. Projekt ten, wspierany przez Unię Europejską, ma na celu zbudowanie jednostki o mocy 17 MVA.

We współpracy Uniwersytetu w Budapeszcie, Ben Gurion University (Izrael) oraz IPHT Jena (Niemcy) [15] opracowywany jest projekt stanowiska do testowania generatora synchronicznego o mocy 12 kVA zabezpieczonego wysokotemperaturowym ogranicznikiem prądu. Jest on związany z przygotowywanym projektem „mini elektrowni” o mocy ok. 10 kVA, w której skład wchodziłyby wyłącznie urządzenia zbudowane z nadprzewodników wysokotemperaturowych: generatora, transformatora, indukcyjnego zasobnika energii, wirującego koła zamachowego (opartego na łożyskach nadprzewodnikowych), silnika oraz ogranicznika prądu.

Badania wysokotemperaturowych ograniczników prądu są również prowadzone w Wielkiej Brytanii (IRC in SC – Cambridge, EA Technology), we Włoszech (CISE S.p.A.), Francji (GEC Alstom) i Niemczech (Forschungszentrum Karlsruhe).

Literatura

- [1] Bobrowski W., Nadprzewodniki w elektrotechnice, *Wiadomości Elektrotechniczne*, Rok LXIX, 2001 nr 7-8, str. 280-288.
- [2] Cave J. R., et al., Testing and modelling of inductive superconducting fault current limiters. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 7: 832-835, 1997.

- [3] Fukagawa H., Matsumura T., Ohkuma T., Sugimoto S., Genji T., Uezono H., Current state and future plans of fault current limiting technology in Japan, *CIGRE'2000*, 13-208.
- [4] Granados X., Puig T., Teva J., et al., Quench Behavior of the Switching Elements of a Hybrid HTS Current Limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 11 (2001) 2406-2409.
- [5] Gromoll B., et al., Resistive current limiters with YBCO films, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, pp. 828-831, 1997.
- [6] Hara T., et al., Development of a new 6.6kV/1500A-class superconducting fault current limiter for electric power systems. *IEEE Trans. Power Delivery*, 8, pp. 182-192, 1993.
- [7] Hassenzahl W.V., Superconductivity, an Enabling Technology for 21st Century Power Systems?, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 11, 2001, pp. 1447-1453.
- [8] Hoshino T., Salim K.M., Nishikawa M., Muta I., Nakamura T., DC Reactor Effect on Bridge Type Superconducting Fault Current Limiter During Load Increasing, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 11, 2001, pp. 1944-1947.
- [9] Ise T., Nguyen H., Kumagai S., Reduction of Inductance and Current Rating of the Coil and Enhancement of Fault Current Limiting Capability of a Rectifier Type Superconducting Fault Current Limiter", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 11, 2001, pp. 1932-1935.
- [10] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G., Postępy w zastosowaniach nadprzewodników, *Prace Nauk. Inst. Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnol. Polit. Wrocławskiej* nr 37, Konferencje nr 12, 2000, str.261-268.
- [11] Janowski T., Recent development and perspectives of superconductivity applications, *The 3rd Int. Conf. Electromagn. Devices and Processes in Environment Protection ELMECO*, Nałęczów, 4-6 June 2000, pp.166-173.
- [12] Janowski T., Surdacki P., Konstrukcje i zastosowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu, *Prace Trzeciej Krajowej Konferencji "Postępy w Elektrotechnice Stosowanej" PES-3*, PTETiS, Wyd. Elektr. Pol. Warsz., Zakopane Kościelisko, 18-22.06.2001, str. 397-404.
- [13] Kado H., M. Ichikawa, Performance of a high-T_c superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 7, 993-996, 1997.
- [14] Leung E., Surge protection for power grids, *IEEE Spectrum*, 34 (7): 26-30, 1997.
- [15] Mikkonen R., Highlights of SC Power Applications in Europe, *17th Int. Conf. on Magnet Technology*, CERN, Geneva, 24-28 Sept. 2001, TUIN2B2-03, p. 64.
- [16] Noe M., Oswald B.R., Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems, *Applied Superconductivity Conference*, Palm Desert (USA) 1998.
- [17] Norris W.T., Power A., Fault current limiters using superconductors, *Cryogenics*, vol. 37, 1997, No. 10, pp. 657-665.
- [18] Paul W., Chen M., Lakner M., Rhyner J., Braun D., Lanz W., Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications, *Physica C* 354 (2001) 27-33.
- [19] Salasoo L., Boenig H. J., *Superconducting Fault Current Limiters*, Webster J.G. (ed.), Wiley Encyclop. of Electr. and Electronics Eng., vol. 20, John Wiley & Sons, Inc., New York 1999.
- [20] Sjöström M., Politano D., Technical and Economical Impacts on a Power System by Introducing an HTS FCL, *IEEE Trans. on Applied Supercond.*, vol. 11, 2001, pp. 2042-2045.
- [21] Steurer M., Froehlich K., Current limiters –state of the art, *Fourth Workshop & Conference on EHV Technology*, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 15-16 July 1998.
- [22] Surdacki P., Janowski T., Wojtasiewicz G., Investigation of an inductive high-T_c superconducting fault current limiter experimental model, *Proc. of the 5th European Conference on Applied Superconductivity*, EUCAS, Copenhagen, Technical University of Denmark, August 26-30, 2001, E4.2-16, pp. 165-166.
- [23] Verhaege T., et al., Experiments with a high voltage (40 kV) superconducting fault current limiter, *Cryogenics*, no. 36, 1996, pp. 521-526.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



**POMIARY CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH MODELU
NADPRZEWODNIKOWEGO OGRANICZNIKA PRĄDU
TYPU INDUKCYJNEGO**

Grzegorz Wojtasiewicz, Sławomir Kozak
*Instytut Elektrotechniki w Warszawie,
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki,
Pracownia Krioelektromagnesów – Lublin,
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
E-mail: tadeuszj@eltecol.pol.lublin.pl
E-mail: grzegorz@eltecol.pol.lublin.pl
E-mail: slawko@eltecol.pol.lublin.pl*

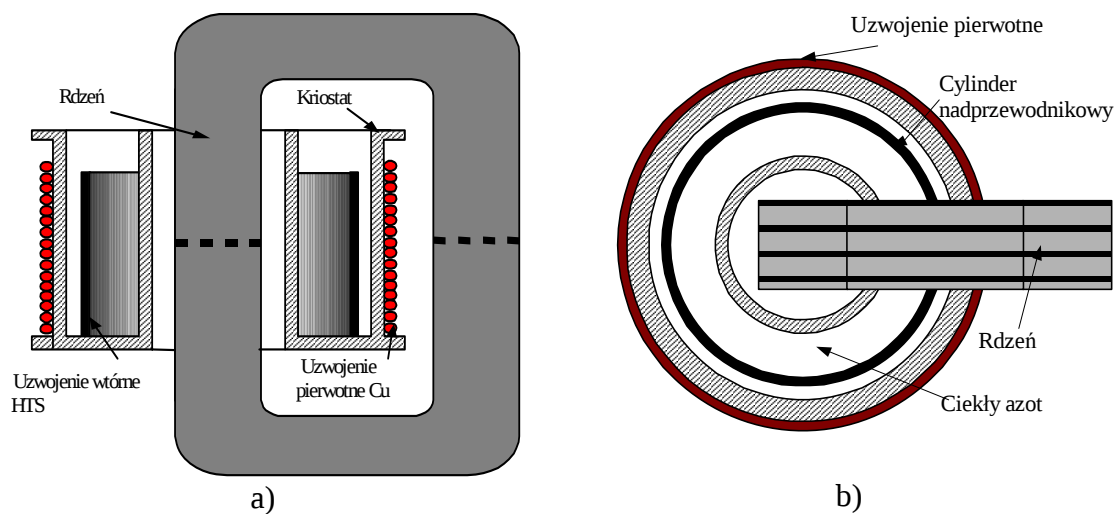
Abstract

A physical model of that SFCL was made in Cryomagnet Laboratory. This paper presents the experimental results of the measurement of the voltage-current characteristics in room temperature (295 K) and in cryogenic temperature (77K) .

Słowa kluczowe: nadprzewodnikowy ogranicznik prądu, pomiary, charakterystyki

1. Wstęp

Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu (FCL) typu indukcyjnego ma budowę transformatora ze zwartym uzwojeniem wtórnym w postaci cylindra z nadprzewodnika wysokotemperaturowego (HTS). Uzwojenie to podczas znamionowych warunków pracy ogranicznika (w stanie nadprzewodzącym) pełni rolę ekranu magnetycznego, uniemożliwiając wnikiwanie strumienia magnetycznego indukowanego przez uzwojenie pierwotne do magnetowodu ogranicznika. Uzwojenie pierwotne, wykonane z miedzi, włączone jest bezpośrednio do zabezpieczanego obwodu elektrycznego [1]. Na rysunku 1 przedstawiony został schemat modelu nadprzewodnikowego ogranicznika zbudowanego w Pracowni Krioelektromagnesów. W tabeli 1 zawarte zostały podstawowe parametry zbudowanego ogranicznika.



Rys. 1. Schemat modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu:
a – przekrój podłużny, b – przekrój poprzeczny.

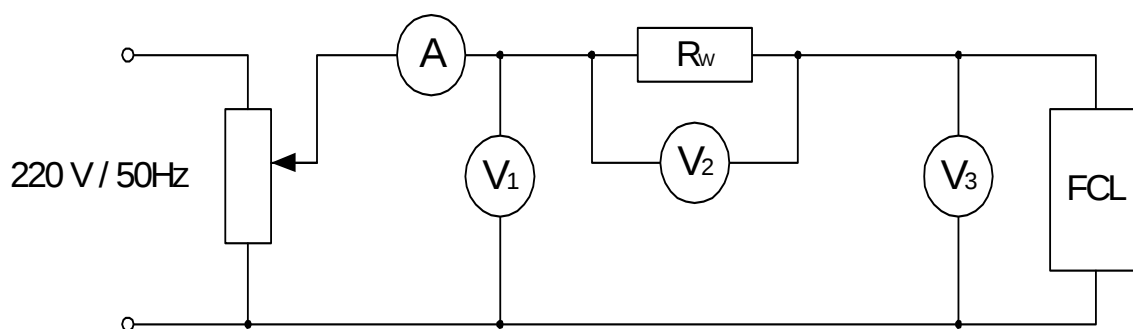
Tab. 1. Parametry modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.

Uzwojenie pierwotne Cu	
Średnica przewodu	0,85 mm
Liczba zwojów	236
Wysokość uzwojenia	49 mm
Średnica wewnętrzna uzwojenia	73 mm
Nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne (cylinder BSCCO 2223)	
Temperatura krytyczna	108 K
Średnica wewnętrzna	59 mm
Wysokość	50 mm
Grubość ścianki cylindra	2,5 mm
Prąd krytyczny w temperaturze 77 K	625 A
Rdzeń magnetyczny (stal krzemowa)	
Przekrój rdzenia	20 x 20 mm ²
Wysokość kolumny	103 mm
Szerokość okna	36 mm
Elektryczne parametry ogranicznika	
Napięcie strony pierwotnej	30 V
Napięcie strony wtórnej	0,133 V
Prąd ograniczania	2,65 A

2. Pomiary w układzie z trzema woltomierzami (295 K)

Pomiary wykonano w układzie z trzema woltomierzami przedstawionym na rysunku 2. Do pomiaru napięć używane były mierniki cyfrowe a do pomiaru prądu miernik

analogowy. Układ pomiarowy oraz ogranicznik znajdowały się w temperaturze pokojowej (295 K). Wyniki pomiarów zamieszczono w tabelach 2, 3 i 4 oraz w tabelach 5 i 6.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego z trzema woltomierzami.

Mierniki:

1. $V_1 - U - V 560$
2. $V_2 - U_R - V 541 (PL-EA-43-3/190)$
3. $V_3 - U_{FCL} - V 543 (EP 43.3/2130)$
4. $A - I - \text{elektromagnetyczny Kl } 0,5 \text{ LE-3P } (EP 43.3/1630)$

Rezystor wzorcowy $R_W - 3,9 \Omega / 4,3 \text{ A}$.

Tab. 2. Pomiary z rdzeniem i z pierścieniem HTS w temperaturze pokojowej (295 K).

$I [\text{A}]$	$U [\text{V}]$	$U_R [\text{V}]$	$U_{FCL} [\text{V}]$
0,1	10,55	0,404	10,44
0,15	15,94	0,604	15,82
0,2	20,75	0,799	20,67
0,25	24,74	0,992	24,62
0,3	28,08	1,196	27,98
0,35	30,41	1,38	30,33
0,4	32,29	1,578	32,18
0,5	34,50	1,958	34,5
0,6	35,85	2,31	36
1	38,84	3,79	39,37
1,5	41,63	5,67	42,35
2	44,37	7,54	44,80
2,5	47,13	9,44	47,01
3	50,04	10,97	49,07
3,5	53,22	13,4	51,01
4	56,3	15,3	53
4,5	59,3	17,19	54,77

Tab. 3. Pomiary bez rdzenia w temperaturze pokojowej (295 K).

$I [\text{A}]$	$U [\text{V}]$	$U_R [\text{V}]$	$U_{FCL} [\text{V}]$
0,1	0,660	0,406	0,273
0,15	0,985	0,602	0,412
0,2	1,308	0,8	0,550
0,25	1,62	0,990	0,687
0,3	1,956	1,197	0,828
0,35	2,289	1,396	0,968
0,4	2,611	1,596	1,104
0,5	3,269	1,995	1,381
0,6	3,901	2,375	1,653
1	6,501	3,957	2,769
1,5	9,81	5,95	4,174
2	13,12	7,948	5,574
2,5	16,39	9,942	7,016
3	19,9	11,94	8,541
3,5	23,14	13,84	10
4	26,79	15,87	11,61
4,5	30,29	17,72	13,28

Tab. 4. Pomiary bez rdzenia i bez pierścienia HTS w temperaturze 295 K.

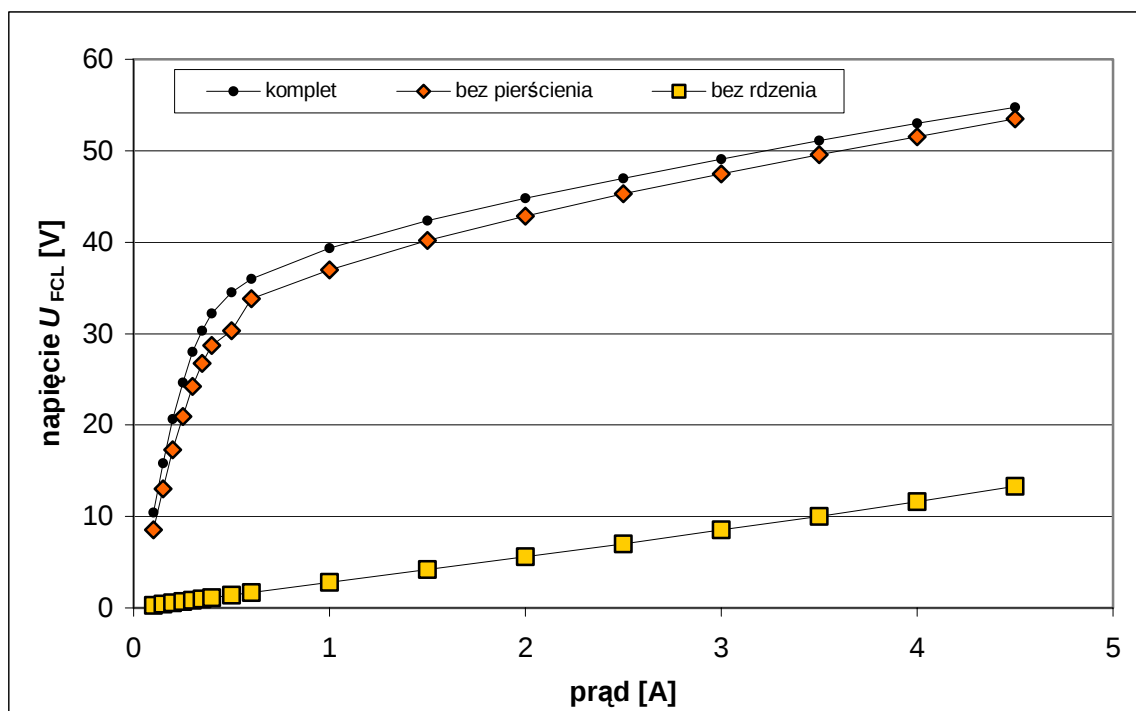
I [A]	U [V]	U_R [V]	U_{FCL} [V]
0,1	0,683	0,413	0,289
0,15	0,994	0,60	0,425
0,2	1,344	0,810	0,566
0,25	1,647	0,996	0,707
0,3	1,98	1,193	0,850
0,35	2,39	1,389	0,987
0,4	2,63	1,593	1,126
0,5	3,291	1,988	1,408
0,6	3,948	2,386	1,69
1	6,591	3,982	2,825
1,5	9,902	5,991	4,260
2	13,2	7,932	5,657
2,5	16,47	9,911	7,096
3	19,91	11,94	8,599
3,5	23,28	13,88	10,14
4	26,78	15,84	11,63
4,5	30,18	17,74	13,25
bez rdzenia (295 K)			
2	13,32	7,80	5,76
z rdzeniem (295 K)			
2	13,25	7,804	5,825

Tab. 5. Pomiary z rdzeniem i z pierścieniem HTS w temperaturze pokojowej (295 K).

I [A]	U [V]	U_R [V]	U_{FCL} [V]
0,1	10,87	0,29	10,87
0,15	16,37	0,48	16,34
0,2	21,38	0,68	21,34
0,25	25,54	0,87	25,47
0,3	28,74	1,06	28,69
0,35	30,97	1,25	30,90
0,4	32,74	1,43	32,72
0,5	34,85	1,80	34,94
0,6	36,17	2,18	36,40
1	39	3,64	39,90
1,5	41,80	5,54	43,06
2	44,60	7,50	45,69
2,5	47,40	9,36	47,98
3	50,27	11,22	50,03
3,5	53,40	13,29	52,13
4	56,60	15,23	54,19
4,5	59,80	17,20	56,02

Tab. 6. Pomiary z rdzeniem i bez pierścienia HTS w temperaturze pokojowej (295 K).

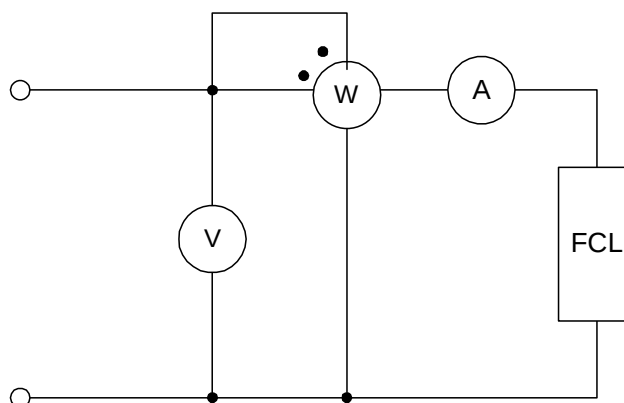
I [A]	U [V]	U_R [V]	U_{FCL} [V]
0,1	8,49	0,3	8,52
0,15	12,96	0,49	12,99
0,2	17,30	0,68	17,31
0,25	20,90	0,87	20,93
0,3	24,18	1,06	24,22
0,35	26,65	1,26	26,71
0,4	28,64	1,44	28,71
0,5	30,17	1,62	30,30
0,6	32,90	2,18	33,80
1	36,20	3,67	36,97
1,5	39,22	5,56	40,19
2	42,15	7,46	42,85
2,5	45,27	9,40	45,28
3	48,3	11,28	47,44
3,5	51,44	13,32	49,56
4	54,66	15,26	51,56
4,5	57,91	17,20	53,50



Rys. 3. Charakterystyki napięciowo-prądowe modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego oraz bez pierścienia HTS albo bez rdzenia magnetycznego w temperaturze pokojowej 295 K (tabele 2, 3, 6).

3. Pomiary w układzie z watomierzem (295 K)

Pomiary wykonano w układzie z watomierzem przedstawionym na rysunku 4. Do pomiaru napięć używane były mierniki cyfrowe a do pomiaru prądu i mocy mierniki analogowe. Układy pomiarowe oraz ogranicznik znajdowały się w temperaturze pokojowej (295 K). Wyniki pomiarów zamieszczono w tabelach 7 i 8.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego z watomierzem.

Mierniki:

1. $V - U$ - V560,
2. $A - I$ - elektromagnetyczny LE-3P, Kl 0,5 EP 43.3/1630,
3. $W - P$ - LW 1 Kl 0,5 EP34.3/168.

Tab. 7. Pomiary z rdzeniem i z pierścieniem HTS w temperaturze pokojowej (295 K).

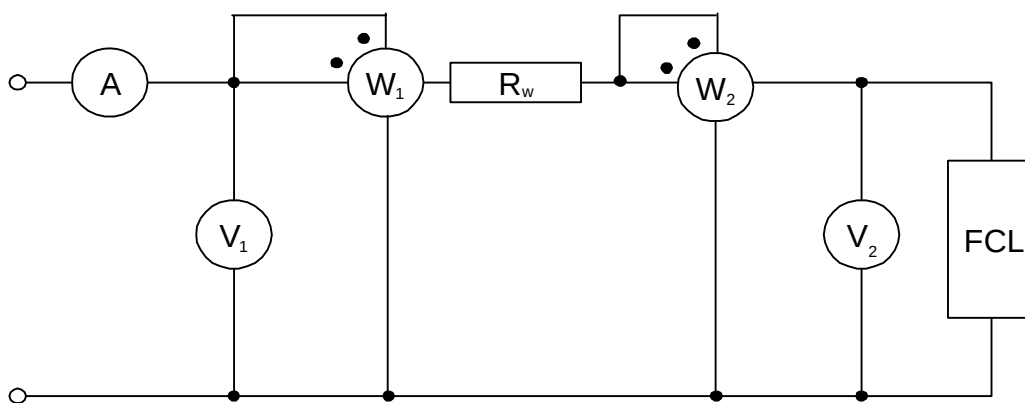
I [A]	U [V]	P [W]
0,5	34,51	4,5
1,0	37,98	9,75
1,5	39,76	11,25
2,0	41,21	16,75
2,5	42,65	23,75
3,0	44,11	32,25
3,5	45,1	49
4,0	46,65	52,5
4,5	48,19	65,5

Tab. 8. Pomiary z rdzeniem i bez pierścienia HTS w temperaturze pokojowej (295 K).

I [A]	U [V]	P [W]
0,5	34,35	3
1,0	38,03	5,5
1,5	39,82	9,75
2,0	41,30	15
2,5	42,75	21,5
3,0	44,20	30
3,5	45,28	39
4,0	46,8	55
4,5	48,34	63,5

3. Pomiary w układzie z dwoma watomierzami (295 K)

Pomiary wykonano w układzie z dwoma watomierzami przedstawionym na rysunku 5. Do pomiaru napięć używane były mierniki cyfrowe a do pomiaru prądu i mocy mierniki analogowe. Układy pomiarowe oraz ogranicznik znajdowały się w temperaturze pokojowej (295 K). Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 9.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego.

Mierniki:

1. $V_1 - U_1$ - V543,
2. $V_2 - U_{FCL}$ - V560,
3. $W_1 - P_1$ - LW1, KL 0,5 EP43.3/118,
4. $W_2 - P_2$ - LW1, KL 0,5 EP43.3/119,
5. $A - I$ - LE-3, KL 0,5 EP43.3/1610.

Rezystor wzorcowy $R_W - 3,9 \Omega / 4,3 A$.

Tab. 9. Pomiary z rdzeniem i pierścieniem HTS w temperaturze pokojowej (295 K).

I [A]	U_1 [V]	P_1 [W]	U_{FCL} [V]	P_2 [W]
0,5	35,52	4,5	34,37	3
1,0	40,76	10,25	37,97	5,75
1,5	44,48	18,75	39,68	9,75
2,0	47,77	32,25	41,07	14,75
2,5	51,03	47,25	42,32	21,25
3,0	54,1	65,75	43,57	28,25
3,5	56,24	84,50	44,80	35
4,0	59,35	109,5	46,16	45
4,5	62,40	140	47,76	59,5

4. Pomiary w układzie z trzema woltomierzami (77 K)

Pomiary wykonano w układzie z trzema woltomierzami przedstawionym na rysunku 2. Do pomiaru napięć używane były mierniki cyfrowe a do pomiaru prądu miernik analogowy. Układ pomiarowy znajdował się w temperaturze pokojowej (295 K). Cylinder nadprzewodnikowy ogranicznika umieszczony był w kąpeli ciekłego azotu – 77 K. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 10.

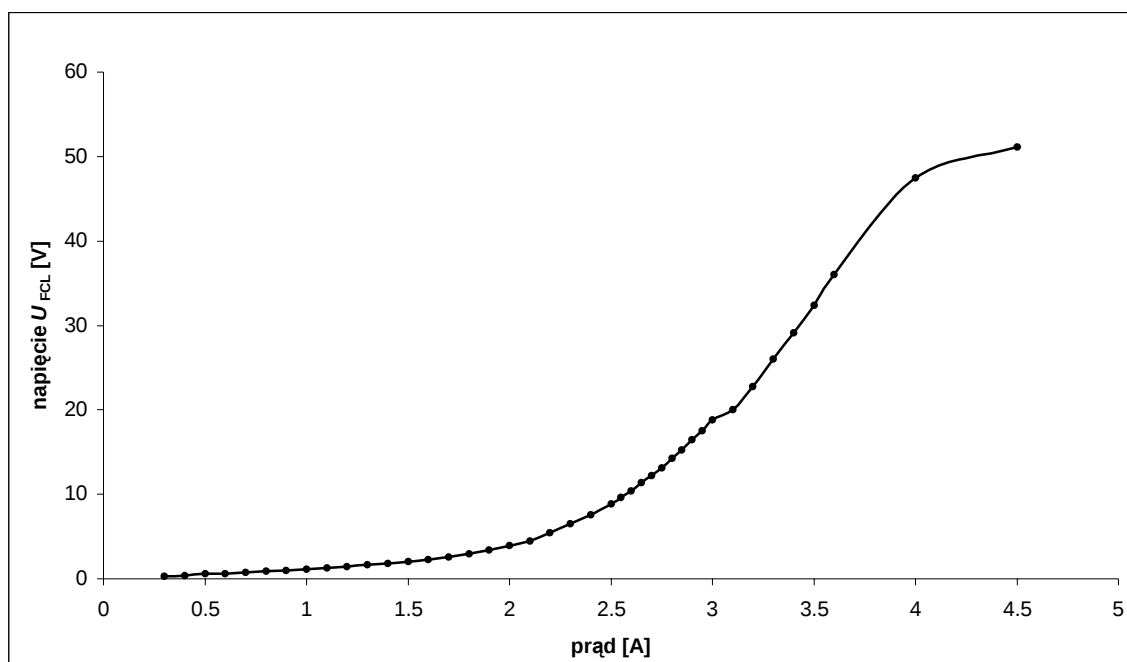
Tab. 10. Pomiary z rdzeniem i pierścieniem HTS w temperaturze kriogenicznej (77 K) – chłodzenie w kąpeli ciekłego azotu.

I [A]	U [V]	U_R [V]	U_{FCL} [V]		I [A]	U [V]	U_R [V]	U_{FCL} [V]
0,5	2,45	1,96	0,59		2,5	17,67	9,59	8,87
0,6	2,91	2,32	0,61		2,55	18,8	9,77	9,67
0,7	3,39	2,7	0,73		2,6	19,5	9,95	10,4
0,8	3,9	3,09	0,89		2,65	20,52	10,15	11,36
0,9	4,4	3,48	0,99		2,7	21,43	10,33	12,2
1	4,9	3,85	1,14		2,75	22,49	10,51	13,13
1,1	5,41	4,24	1,29		2,8	23,7	10,73	14,28
1,2	5,95	4,64	1,45		2,85	24,9	10,9	15,22
1,3	6,54	5,06	1,65		2,9	26,18	11,11	16,48
1,4	7,03	5,38	1,81		2,95	27,3	11,27	17,52
1,5	7,61	5,77	2,03		3	28,73	11,46	18,81
1,6	8,25	6,18	2,3		3,1	30	11,6	20
1,7	8,88	6,56	2,59		3,2	33	11,93	22,72
1,8	9,65	6,96	2,98		3,3	36,5	12,34	25,98
1,9	10,48	7,35	3,44		3,4	39,84	12,7	29,12
2	11,3	7,7	3,95		3,5	43,28	13,06	32,41
2,1	12,26	8,08	4,48		3,6	47,05	13,41	36,02
2,2	13,5	8,49	5,49		4	59,17	15,16	47,48
2,3	14,86	8,88	6,52		4,5	62,5	16,86	51,1
2,4	16,13	9,23	7,59					

Mierniki:

1. $V_1 - U - V 560$,
2. $V_2 - U_R - V 541$ (PL-EA-43-3/190),
3. $V_3 - U_{FCL} - V 543$ (EP 43.3/2130),
4. $A - I$ - elektromagnetyczny Kl 0,5 LE-3P (EP 43.3/1630).

Rezystor wzorcowy $R_W - 3,9 \Omega / 4,3 A$.



Rys. 6. Charakterystyka napięciowo-prądowa nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego w temperaturze kriogenicznej 77 K (tabela 10).

5. Pomiary porównawcze w układzie z trzema woltomierzami (295 K)

Pomiary wykonano w układach z trzema woltomierzami (rysunek 2). Do pomiaru napięć używane były mierniki cyfrowe albo analogowe a do pomiaru prądu miernik analogowy. Układ pomiarowy oraz ogranicznik znajdowały się w temperaturze pokojowej (295 K). Wyniki pomiarów zamieszczono w tabelach 11 i 12.

Mierniki:

I. Pomiar analogowy:

1. $V_1 - U$ - elektromagnetyczny kl 0,5 (EP 43.3.125),
2. $V_2 - U_R$ - elektromagnetyczny kl 0,5 LE-1 (EP 43.3/79),
3. $V_3 - U_{FCL}$ - elektromagnetyczny kl 0,5 (EP 43.4/6),
4. $A - I$ - elektromagnetyczny Kl 0,5 LE-3P (EP 43.3/1630).

Rezystor wzorcowy $R_W - 3,9 \Omega / 4,3 A$.

II. Pomiar cyfrowy:

1. $V_1 - U - V 543$ (EP 43.3/2130),
2. $V_2 - U_R - V 560$,
3. $V_3 - U_{FCL} - V 541$ (PL-EP-43-3/190),

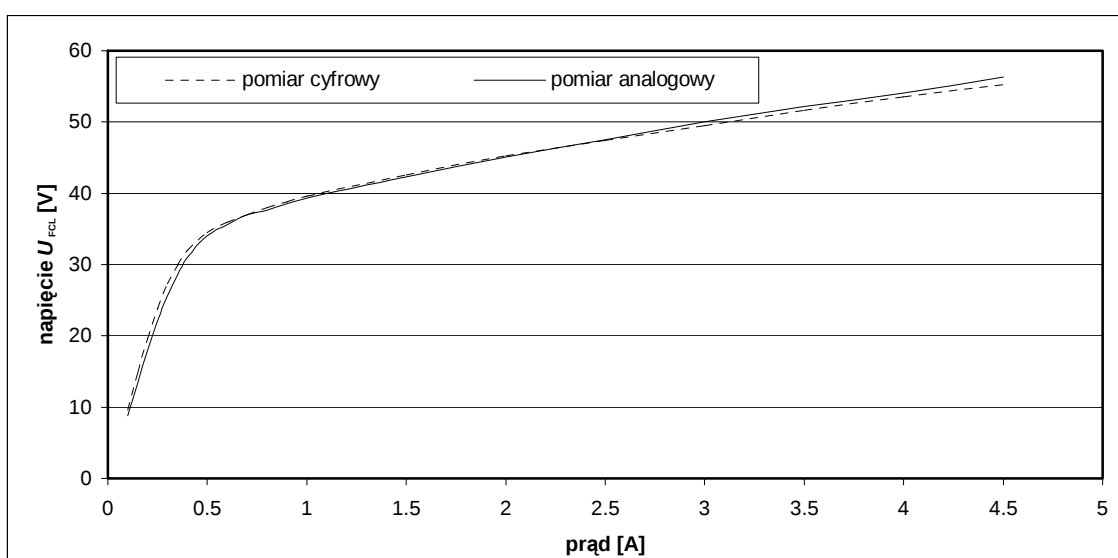
4. A – I - elektromagnetyczny K1 0,5 LE–3P (EP 43.3/1630).
Rezystor wzorcowy $R_W - 3,9 \Omega / 4,3 A$.

Tab. 11. Pomiary z rdzeniem i z pierścieniem HTS w temperaturze pokojowej (295 K) - **pomiar cyfrowy**.

$I [A]$	$U [V]$	$U_R [V]$	$U_{FCL} [V]$
0,1	9,63	0,34	9,61
0,15	15,05	0,55	14,92
0,2	19,74	0,73	19,56
0,25	23,99	0,93	23,88
0,3	27,56	1,11	27,27
0,35	30,29	1,30	29,90
0,4	32,32	1,47	31,94
0,5	34,99	1,79	34,50
0,6	36,52	2,08	35,97
0,7	37,72	2,37	37,01
0,8	38,78	2,65	37,99
0,9	39,64	2,95	38,81
1	40,49	3,24	39,60
1,5	44,07	4,63	42,58
2	47,59	6,23	45,24
2,5	50,65	7,77	47,45
3	53,63	9,33	49,51
3,5	56,66	11,17	51,66
4	59,72	12,84	53,52
4,5	62,41	14,57	55,28

Tab. 12. Pomiary z rdzeniem i z pierścieniem HTS w temperaturze pokojowej (295 K) - **pomiar analogowy**.

$I [A]$	$U [V]$	$U_R [V]$	$U_{FCL} [V]$
0,1	8,9		8,8
0,15	13,8		13,5
0,2	18,3	0,6	18
0,25	22,6	0,8	22,2
0,3	26	1,02	25,6
0,35	29	1,2	28,6
0,4	31,3	1,4	31
0,5	34,6	1,7	34
0,6	36,3	2,05	35,6
0,7	37,8	2,45	37
0,8	38,6	2,75	37,6
0,9	39,5	3,15	38,5
1	40,5	3,5	39,3
1,5	44	5,3	42,3
2	47,2	7,1	45,1
2,5	50,3	8,8	47,5
3	53,3	10,6	50
3,5	56,5	12,5	52,2
4	59,7	14,2	54,1
4,5	63,2	17	56,3



Rys. 7. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego w temperaturze pokojowej 295 K (tabele 11, 12).

6. Podsumowanie

Pomiary charakterystyk napięciowo-prądowych nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego przeprowadzone były w różnych układach pomiarowych i przy użyciu mierników różnych typów w celu określenia błędów pomiarowych wynikających z niesinusoidalnych przebiegów prądowych w ograniczniku. Prowadzone były pomiary charakterystyk ogranicznika bez rdzenia magnetycznego i bez cylindra nadprzewodnikowego. Pomiary te pozwoliły na porównanie wpływu poszczególnych elementów składowych ogranicznika na charakterystykę napięciowo-prądową. Pomiary prowadzone były w temperaturze pokojowej (295 K) oraz w temperaturze ciekłego azotu (77 K). Wyniki eksperymentalne zostały wykorzystane do weryfikacji modelu numerycznego ogranicznika [2].

Literatura

- [1] Kozak S., Wojtasiewicz G., Wybrane zastosowania nadprzewodnictwa w energetyce, *XXIV-SPETO 2001*, Gliwice - Ustroń 2001, str.131-134.
- [2] Kozak S., Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego., *III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników*, Lublin - Nałęczów 2001.
- [3] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G., Postępy w zastosowaniach nadprzewodników, *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej*, nr 37, seria: Konferencje nr 12, Jamrozowa Polana, 2000, str.261-268.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



MODEL NUMERYCZNY NADPRZEWODNIKOWEGO
OGRANICZNIKA PRĄDU TYPU INDUKCYJNEGO

Sławomir Kozak

*Instytut Elektrotechniki w Warszawie,
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki,
Pracownia Krioelektromagnesów – Lublin,
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
e-mail: slawko@eltecol.pol.lublin.pl*

Abstract

The paper describes a numerical model of an inductive type of superconducting fault current limiter (SFCL). A physical model of that SFCL was made in Cryomagnet Laboratory and its voltage-current characteristic in room temperature (295 K) was used to verify the numerical model. The numerical model of the inductive SFCL was made using the magnetodynamics (MD) physical domain of the CAD package FLUX2D coupled with circuit equations.

Słowa kluczowe: nadprzewodnikowy ogranicznik prądu, model numeryczny, FLUX2D.

1. Wstęp

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych (SFCL) wykazują małą impedancję podczas pracy w warunkach znamionowych oraz dużą impedancję w warunkach zwarcia.

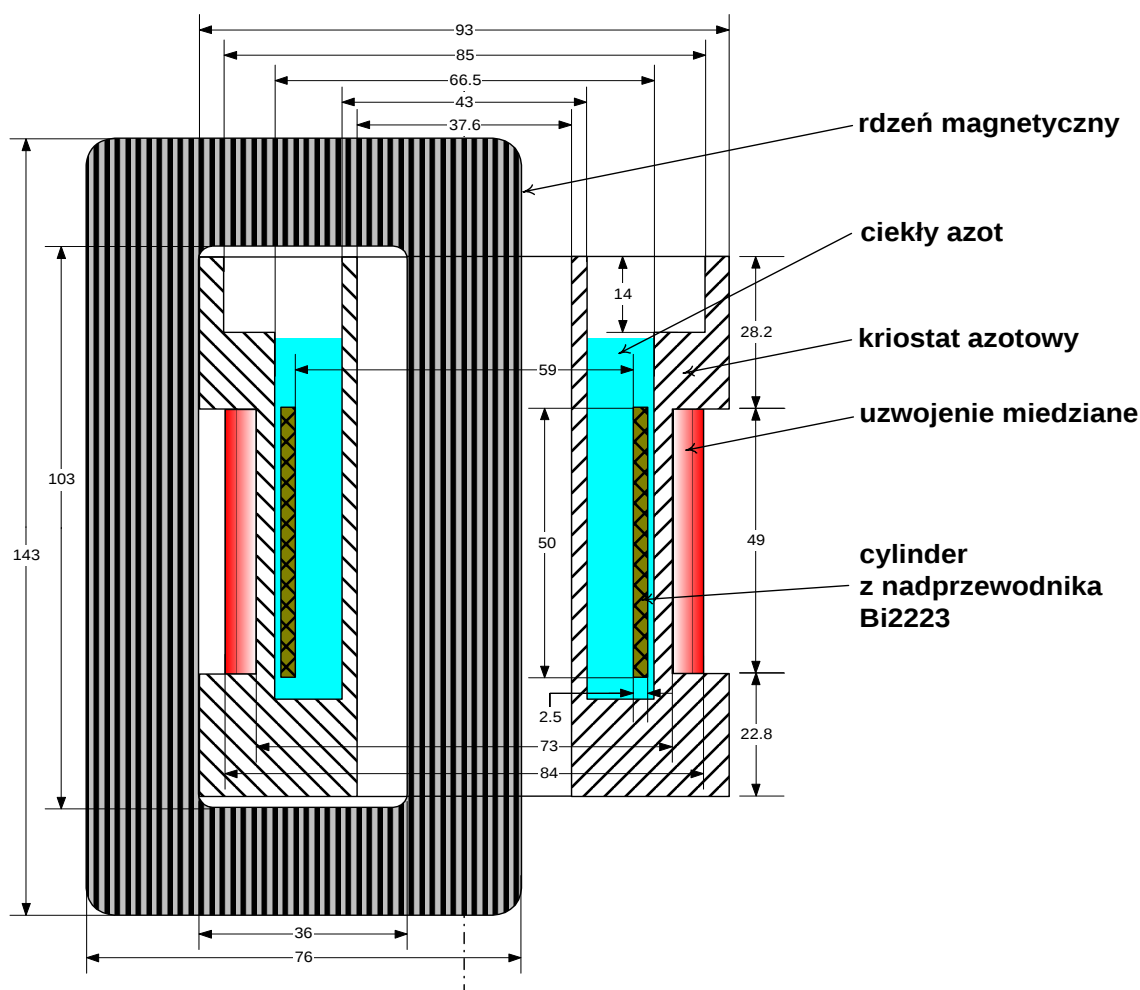
Istnieją dwa podstawowe typy nadprzewodnikowych ograniczników prądów zwarciovych. Są to ograniczniki rezystancyjne, których praca opiera się na zmianie rezystancji elementu nadprzewodnikowego, oraz indukcyjne, działające na zasadzie ekranowania strumienia magnetycznego [1][3].

W rezystancyjnych ogranicznikach prądowych, ograniczanie prądu zwarciovego zachodzi w wyniku wzrostu rezystancji obwodu elektrycznego. Elementem ograniczającym prąd jest element nadprzewodnikowy włączony szeregowo w obwód, który w znamionowych warunkach pracy (tj. w stanie bezzwarciovym) znajduje się w stanie nadprzewodzącym, a więc stanowi zerową rezystancję dla przepływu prądu [1].

Indukcyjne ograniczniki nadprzewodnikowe mają budowę transformatora ze zwartym uzwojeniem wtórnym. Wykonane jest ono w postaci cylindra z nadprzewodnika

wysokotemperaturowego, który podczas znamionowych warunków pracy ogranicznika (w stanie nadprzewodzącym) pełni rolę ekranu magnetycznego, uniemożliwiając strumieniowi magnetycznemu indukowanemu w cewce pierwotnej wnikanie do rdzenia ogranicznika. Uzwojenie pierwotne, wykonane z miedzi, włączone jest bezpośrednio do obwodu elektrycznego [1].

2. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego



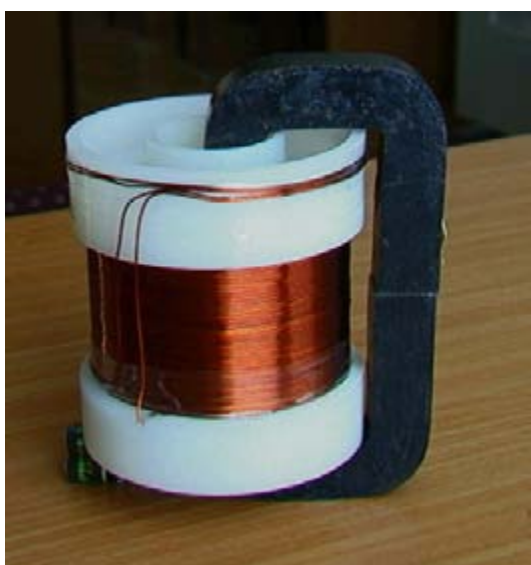
Rys. 1. Przekrój nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego (wymiały w milimetrach).

Na rysunku 1 przedstawiony jest przekrój nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego, zbudowanego w Pracowni Krioelektromagnesów w Lublinie. Podstawowe części składowe ogranicznika to:

1. cylinder z nadprzewodnika wysokotemperaturowego Bi2223 (Can Superconductors) (rysunki 1, 2 i 3) o średnicy wewnętrznej 0.059 m, wysokości 0.05 m i grubości ścianki 0.0025 m i prądzie krytycznym = 625 A w temperaturze 77 K,

2. kriostat azotowy wykonany z ertalonu (ternamid) z nawiniętym uzwojeniem miedzianym (rysunki 1, 2 i 3),
3. rdzeń magnetyczny o przekroju $0.02 \times 0.02 \text{ m}^2$, wysokości kolumny 0.103 m i szerokości okna 0.036 m (rysunki 1, 2 i 3).

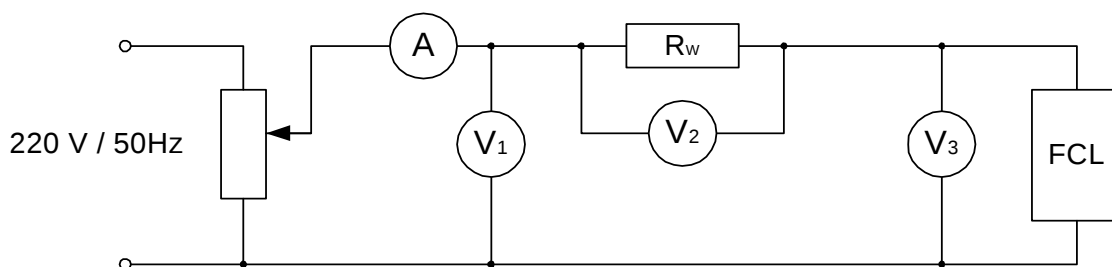
Na rysunku 4 przedstawiony został układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk statycznych indukcyjnego ogranicznika prądu. Jest to typowy układ z 3 woltomierzami i amperomierzem, umożliwiający wyznaczenie spadku napięcia oraz przesunięcia fazowego na ograniczniku.



Rys. 2. Widok modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego.



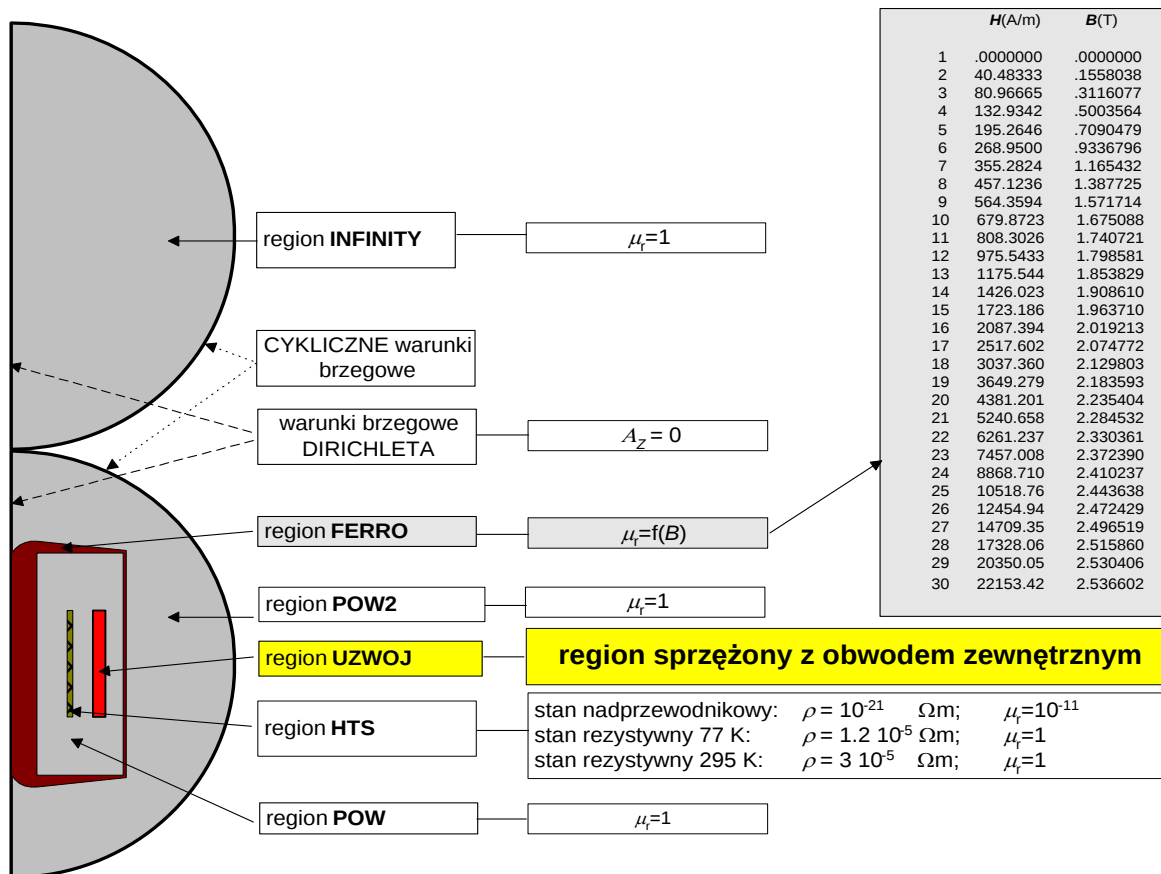
Rys. 3. Części składowe ogranicznika prądu:
1 – rdzeń magnetyczny,
2 – kriostat azotowy z uzwojeniem miedzianym,
3 – cylinder z nadprzewodnika Bi2223.



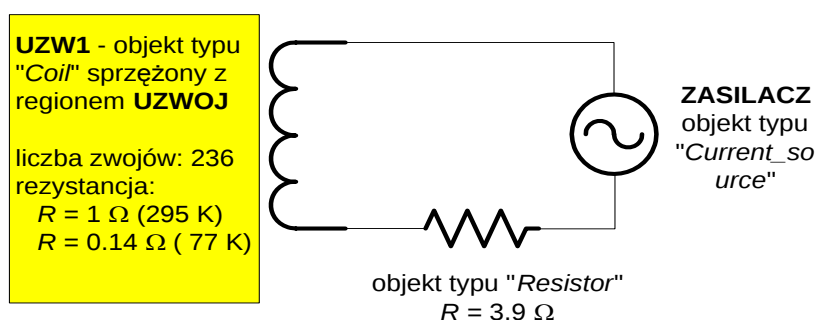
Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk statycznych ogranicznika prądu (FCL) [2].

Szczegółowe wyniki badań eksperymentalnych oraz parametry układu pomiarowego zamieszczono w [2]. Ogranicznik badany był w temperaturze pokojowej 295 K oraz w temperaturze ciekłego azotu – 77 K . Wyniki badań eksperymentalnych w temperaturze 295 K wykorzystane zostały do weryfikacji modelu numerycznego ogranicznika.

3. Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego



Rys. 5. Geometria i właściwości regionów części polowej modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego – Flux2D.



Rys. 6. Schemat część obwodowej modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego – FLUX2D.

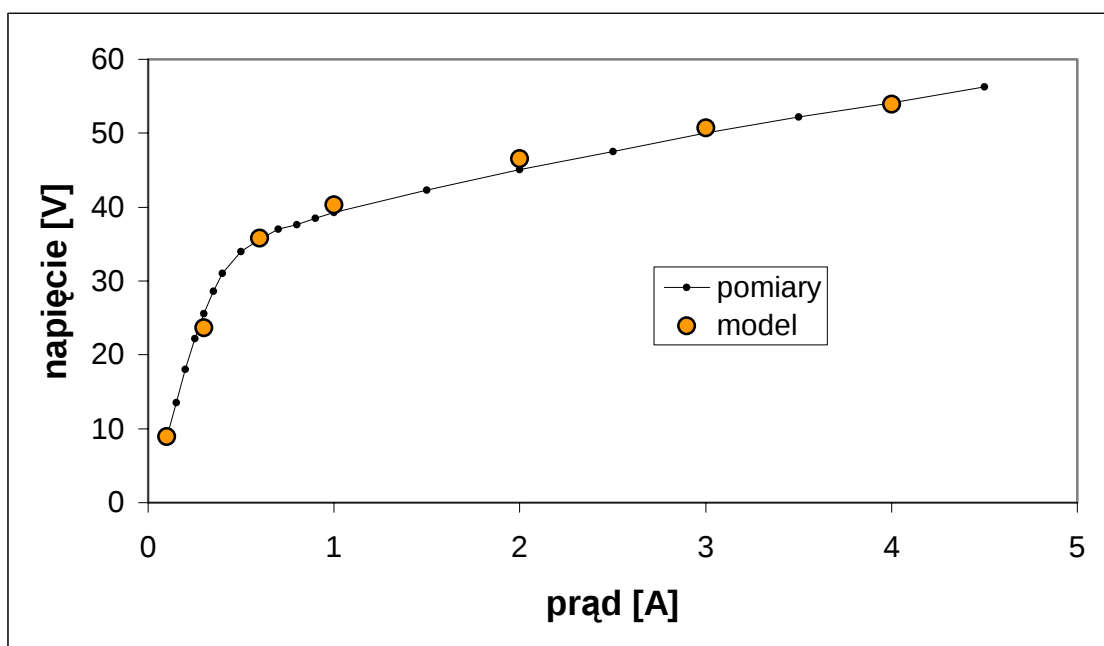
Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego opracowany został przy wykorzystaniu moduły magnetodynamicznego MD sprzężonego z obwodem zewnętrznym w programie polowym FLUX2D. Geometria układu rzeczywistego z rysunku 1 zastąpiona została uproszczoną geometrią osiowosymetryczną

w przestrzeni 2D – rysunek 5. Model obliczeniowy składa się 6 obszarów i 4 brzegów, na których zdefiniowane są warunki brzegowe:

- CYKLICZNE – brzegu otwarty,
- DIRICHLETA – oś obrotu.

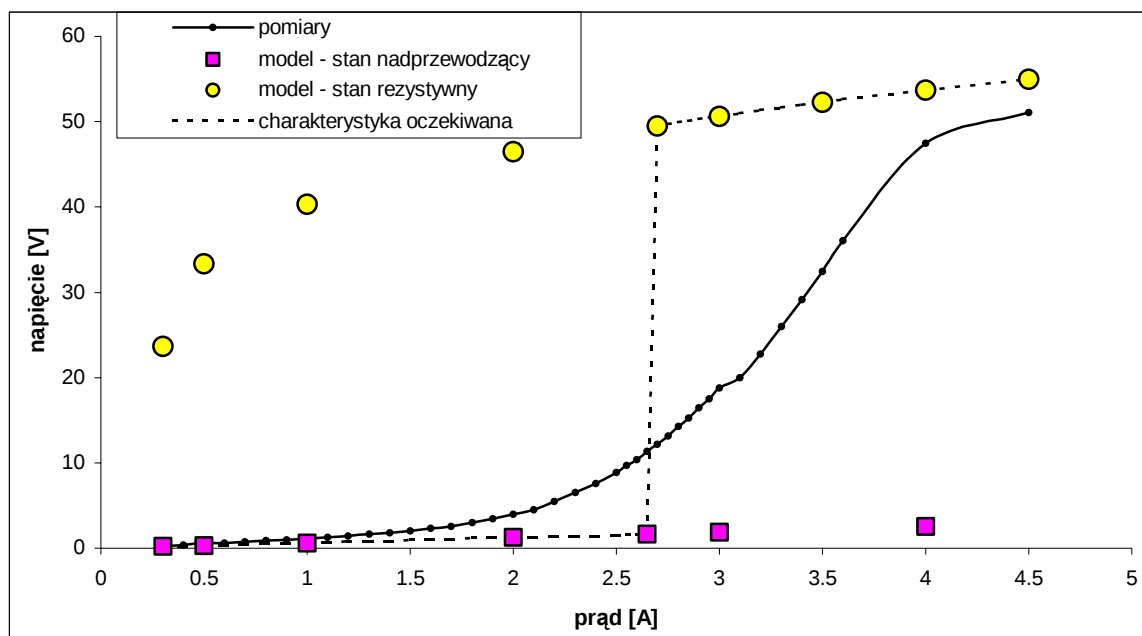
Na rysunku 6 przedstawiono schemat części obwodowej modelu numerycznego ogranicznika prądu (FLUX2D), który odpowiada funkcjonalnie schematowi z rysunku 4. Przesunięcie fazowe na ograniczniku obliczanie jest przez program FLUX2D, więc można było zrezygnować z układu z 3 woltomierzami.

Do weryfikacji geometrii oraz właściwości fizycznych regionów w modelu numerycznego wybrane zostały wyniki pomiarów w temperaturze pokojowej. Na rysunku 7 przedstawione zostały wyniki pomiarów spadku napięcia na ograniczniku w funkcji prądu w temperaturze pokojowej [2] oraz wyniki obliczeń przy wykorzystaniu modelu numerycznego.



Rys. 7. Charakterystyka statyczna nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w temperaturze pokojowej (295 K).

Na rysunku 8 przedstawione zostały wyniki pomiarów spadku napięcia na ograniczniku w funkcji prądu w temperaturze 77 K oraz wyniki obliczeń przy użyciu modelu numerycznego w stanie nadprzewodzącym oraz rezystywnym. Linia przerywaną zaznaczony został teoretyczny przebieg zmian napięcia na ograniczniku w funkcji prądu przy założeniu, że cylinder nadprzewodnikowy przechodzi skokowo, w całości, ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. Rzeczywista charakterystyka ogranicznika odbiega od charakterystyki oczekiwanej, co spowodowane może być faktem, że cylinder (przypuszczalnie) przechodzi stopniowo ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego zaczynając od miejsc, w których pole magnetyczne działające na nadprzewodnik jest największe.



Rys. 8. Charakterystyka statyczna nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w temperaturze ciekłego azotu (77 K).

4. Podsumowanie

Opracowany model numeryczny ogranicznika zweryfikowany został eksperymentalnie pod kątem parametrów konstrukcyjnych oraz magnetycznych. Dalszych prac wymaga uwzględnienie w modelu numerycznym zjawiska stopniowego a nie skokowego przechodzenia cylindra nadprzewodnikowego ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego umożliwi badanie wpływu parametrów konstrukcyjnych, elektromagnetycznych i materiałowych na charakterystykę napięciowo-prądową ogranicznika. Model numeryczny ogranicznika będzie wykorzystany w module TM (transient magnetics) programu polowego FLUX2D, sprzężonym z obwodem zewnętrznym do badania stanów przejściowych w obwodach zwarciovych z nadprzewodnikowymi ogranicznikami prądu.

Literatura

- [1] Kozak S., Wojtasiewicz G., Wybrane zastosowania nadprzewodnictwa w energetyce, *XXIV-SPETO 2001*, Gliwice - Ustroń 2001, str.131-134.
- [2] Janowski T., Wojtasiewicz G., Kozak S., Pomiary charakterystyk statycznych modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego, *III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników*, Lublin - Nałęczów 2001.
- [3] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G., Postępy w zastosowaniach nadprzewodników, *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej*, nr 37, seria: Konferencje nr 12, Jamrozowa Polana, 2000, str.261-268.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



TRÓJFAZOWE NADPRZEWODNIKOWE OGRANICZNIKI PRĄDU

Michał Łanczont, Tadeusz Janowski

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38a

E-mail: michal@weber.pol.lublin.pl

Abstract

This paper presents current studies on three phase superconducting fault current limiters. These devices appear as the explication to the construction of conventional SFCL (resistive and inductive). These devices were designed as research models. Their operation cost in electrical network is still relatively high. Three phase SFCL were designed as the alternative solution due to the high implementation cost of the conventional SFCL into the network and they definitely improve the operating system.

Słowa kluczowe: Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, Sieci energetyczne.

1. Wstęp

Wśród zmiennoprądowych zastosowań nadprzewodników wysokotemperaturowych, największe szanse na zastosowanie komercyjne mają nadprzewodnikowe ograniczniki prądu (NOP). Znaczący wpływ na rozwój tej technologii ma wzrost poziomu prądów zwarciovych, spowodowany stałym rozwojem sieci energetycznej.



Rys. 1. NOP pracujący w sieci energetycznej.

Zastosowanie NOP w systemie energetycznym (elektrownie, rozdzielnie, linie transmisyjne i dystrybucyjne), jak pokazano na Rys. 1, zapewni sprowadzenie prądów zwarciovych do bezpiecznego poziomu.

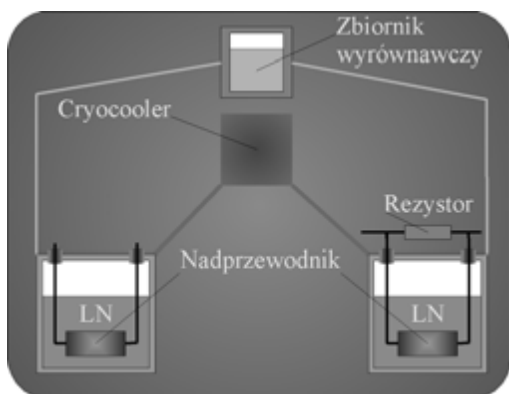
Dotychczasowe badania nad NOP doprowadziły do opracowania kilku rozwiązań [1]:

- Rezystancyjne
- Indukcyjne
- Ekranowe
- Urządzenia z nasyconym rdzeniem
- Różne kombinacje wymienionych powyżej

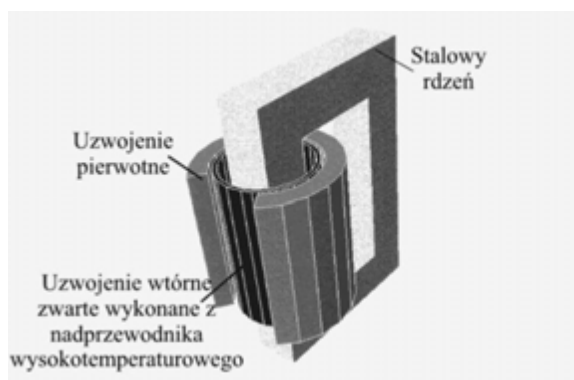
Część z tych rozwiązań jest dostępna jako komercyjnie dostępne urządzenia.

2. Jednofazowe konstrukcje nadprzewodnikowych ograniczników prądu

Pierwszą konstrukcją ogranicznika prądu zbudowaną w oparciu o materiały nadprzewodnikowe był rezystancyjny nadprzewodnikowy ogranicznik prądu [2], jak pokazano na Rys. 2. Konstrukcja ta opiera się na wykorzystaniu podstawowej właściwości nadprzewodnika, duży gradient zmian rezystancji przy przejściu ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. Najczęściej stosowane są dwie konstrukcje; z elementem nadprzewodnikowym bezpośrednio włączonym w chronioną linię i z równoległym połączeniem elementu nadprzewodzącego z rezystorem (Rys. 2).



Rys. 2. Zasada budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego.



Rys. 3. Zasada budowy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego.

Opracowanie technologii wytwarzania nadprzewodników wysokotemperaturowych pozwoliło na przyśpieszenie prac nad nowymi rozwiązaniami technicznymi NOP. Efektem badań było opracowanie indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu, o budowie zbliżonej do konstrukcji jednofazowego transformatora ze zwartym uzwojeniem wtórnym. Uzwojenie pierwotne w indukcyjnym NOP wykonywane jest z miedzi, a uzwojenie wtórne z nadprzewodnika wysokotemperaturowego jako zwarty pierścień (Rys. 3).

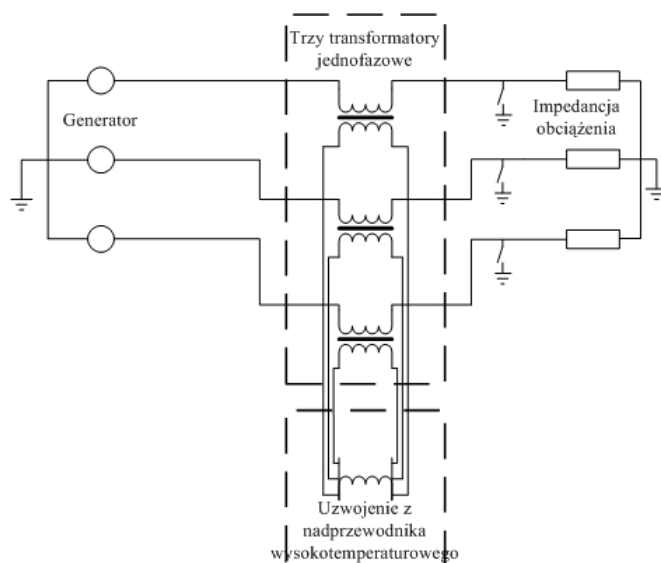
3. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu w układach trójfazowych

Adaptacja jednofazowych NOP do sieci i urządzeń trójfazowych ze względów technicznych i ekonomicznych jest nieuzasadniona. Rozwiązania te powstały jako modele badawcze i były projektowane do sieci jednofazowych. Koszt zastosowania ich w sieciach trójfazowych ze względu na duże ilości wykorzystanego w nich drogiego materiału nadprzewodnikowego i trzy oddzielne kriostaty jest wysoki.

Wiele ośrodków badawczych na świecie rozpoczęło prace badawcze nad opracowaniem konstrukcji nadprzewodnikowych ograniczników prądu przeznaczonych do pracy w sieciach trójfazowych.

Trójfazowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z jedną cewką wykonana z nadprzewodnika wysokotemperaturowego

Zespół badawczy z Instytutu Inżynierii Elektrycznej w Chińskiej Akademii Nauk opracowali i przetestowali model NOP przeznaczonego dla sieci trójfazowej [3]. Na Rys. 4 pokazano schemat wysokotemperaturowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu (WNOP). Cewka nadprzewodnikowa jest połączona z uzwojeniami wtórnymi trzech jednofazowych transformatorów włączonych w poszczególne przewody linii trójfazowej.



Rys. 4 Trójfazowy NOP z jednym uzwojeniem nadprzewodnikowym.

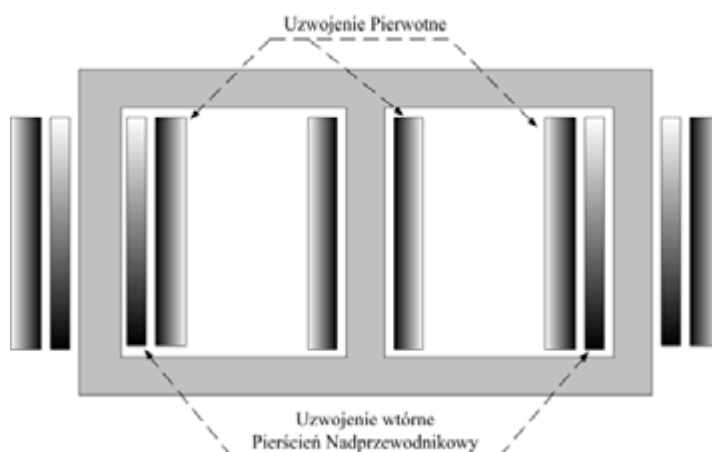
Przy obciążeniu symetrycznym suma prądów uzwojeń wtórnych jest równa zero i w elemencie nadprzewodnikowym prąd nie płynie. Symetria układów trójfazowych nie jest w praktyce całkowita i podczas normalnej pracy płyną przez uziemione punkty neutralne generatora i transformatorów prądy wywołane asymetrią. Suma prądów w uzwojeniu wtórnym transformatorów ogranicznika wynikająca z dopuszczalnej asymetrii musi być mniejsza od prądu krytycznego elementu nadprzewodnikowego.

Przy zwarcu niesymetrycznym, a w szczególności przy jednofazowym zwarciu doziemnym, suma prądów strony wtórnej przepływająca przez element

nadprzewodnikowy, po przekroczeniu prądu krytycznego, wymusza gwałtowne przejście do stanu rezystywnego. Powoduje to zanik przepływu uzwojenia wtórnego, kompensującego przepływ pierwotny, wzrost siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu pierwotnym, obniżenie napięcia wymuszającego prąd zwarcia, a tym samym ograniczenie jego wartości.

Trójfazowy ogranicznik prądu z dwufazowym obwodem nadprzewodnikowym

Model NOP z dwufazowym obwodem nadprzewodnikowym (indukcyjny typ NOP) został opracowany na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Uniwersytetu Yonesei w Korei Południowej [4].



Rys. 5. Podstawowy schemat zintegrowanego trójfazowego NOP.

Ogranicznik zbudowany jest w oparciu o nadprzewodniki wysokotemperaturowe. Uzwojenie pierwotne wykonane jest z miedzi, a uzwojenia wtórne w postaci tub lub pierścieni z nadprzewodnika wysokotemperaturowego. Model ten posiada tylko dwa nadprzewodnikowe uzwojenia wtórne. Konstrukcja ta została zaproponowana po wnikliwych badaniach, które wykazały, że dwa jednofazowe transformatory z wtórnym uzwojeniem nadprzewodnikowym mogą ograniczać prądy w układach trójfazowych.

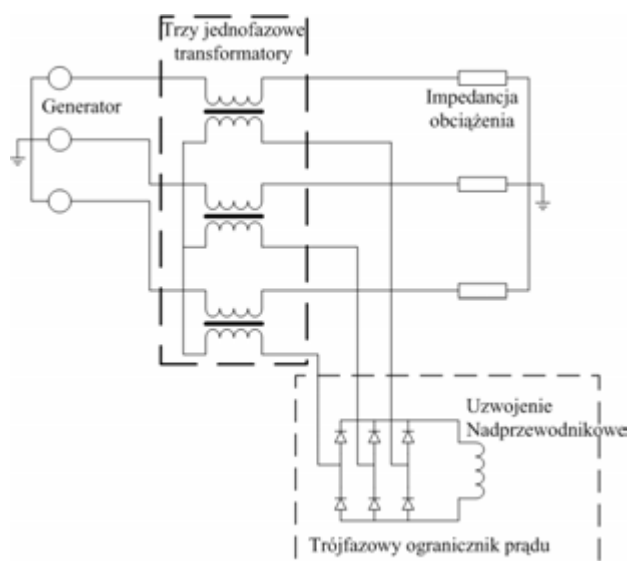
W kolumnach z nadprzewodnikowym uzwojeniem wtórnym rdzeń transformatora jest ekranowany przed strumieniem magnetycznym. W związku z tym w uzwojeniach pierwotnych nie indukuje się siła elektromotoryczna i napięcie na ich zaciskach jest niewielkie. Oznacza to, że reaktancja uzwojenia pierwotnego jest bardzo mała.

W kolumnie środkowej, bez uzwojenia nadprzewodnikowego, indukujący się strumień nie może zamykać się przez skrajne kolumny, ekranowane przez nadprzewodnik. W związku z czym reaktancja w kolumnie bez pierścienia nadprzewodnikowego będzie również mała.

W warunkach zwarcia w którejkolwiek fazie, we wszystkich kolumnach nastąpi wzrost strumienia magnetycznego. Prąd wtórny w pierścieniach nadprzewodnikowych wymusi przejście ich do stanu rezystywnego. Spowoduje to wzrost siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach pierwotnych (stan jałowy) a tym samym ograniczenie prądu zwarcia.

Trójfazowy NOP z mostkiem półprzewodnikowym i SMES'em

Model NOP z mostkiem półprzewodnikowym został opracowany na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki na Uniwersytecie Yonesei w Korei Południowej [5]. Ogranicznik składa się z transformatora, diod półprzewodnikowych, nadprzewodnikowej cewki i kriostatu, jak pokazano na Rys. 6.



Rys. 6. Schemat trójfazowego NOP z półprzewodnikowym prostownikiem.

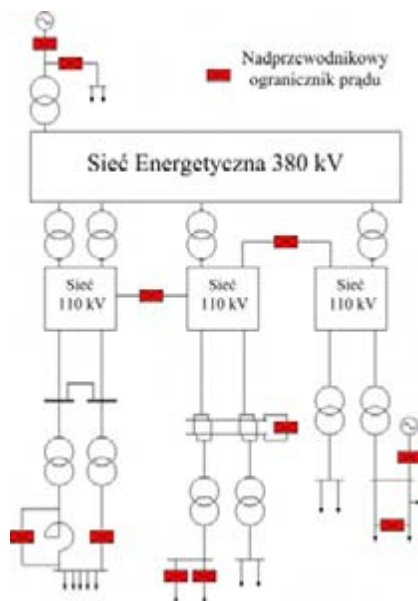
Mostek diodowy działa jako prostownik konwertujący prąd przemienny na stały płynący przez cewkę nadprzewodnikową. Prąd ten jest proporcjonalny do wartości szczytowej napięcia w uzwojeniu wtórnym.

W stanie zwarcia prąd jest tłumiony przez impedancje mostka półprzewodnikowego.

4. Ograniczniki prądu w sieci energetycznej

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu mogą być umieszczone na liniach przesyłowych lub dystrybucyjnych, w miejscach pokazanych na Rys. 7:

- Szyny wejściowe
- Szyny wyjściowe
- Wyjścia generatorów
- Szyny zbiorcze



Rys. 7. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu w systemie energetycznym.

5. Wnioski

Opracowywane konstrukcje trójfazowych NOP charakteryzują się lepszymi parametrami pracy w sieci, oraz niższą ceną, ze względu na mniejszą ilość niezbędnego materiału nadprzewodnikowego potrzebnego do ich działania. Jednofazowe konstrukcje NOP ze względów technologiczno-materiałowych są zbyt kosztowne, aby znalazły szerokie zastosowanie w systemie energetycznym.

Literatura

- [1] Jha A. R., Superconducting technology, – Wiley Interscience Publication, 1998.
- [2] Salasoo L., Boenig H. J., Superconducting Fault Current Limiters. – Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering Online, Article Online Posting Date: Grudzień 27, 1999.
- [3] Zhang J. i inni, Dynamic simulation and test of a three-phase high T_c superconducting fault current limiter, 17th International Conference on Magnet Technology, Genewa 24-28.09.2001.
- [4] Seungje Lee i inni, The short circuit analysis of integrated three phase superconducting fault current limiter with two phase superconducting circuits, 17th International Conference on Magnet Technology, Genewa 24-28.09.2001.
- [5] Eung Ro Lee i inni, Test of DC reactor type fault current limiter using SMES magnet for optimal design, 17th International Conference on Magnet Technology, Genewa 24-28.09.2001.

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



SIŁY I NAPRĘŻENIA W UZWOJENIACH
TRANSFORMATORÓW NADPRZEWODNIKOWYCH

Grzegorz Wojtasiewicz
Instytut Elektrotechniki w Warszawie
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki
Pracownia Krioelektromagnesów w Lublinie
ul. Nadbystrzycka 38 A, 20 – 618 Lublin
tadeuszj@eltecol.pol.lublin.pl
grzegorz@eltecol.pol.lublin.pl

Abstract

The discovery of high – temperature superconductors in 1987 opened new opportunities in the design of several power supply equipment. The advantages of a transformer with high-temperature superconducting windings have been discussed and represented in several papers. The design of transformers depends on the operation requirements and the installed position in the power network. The best design in terms of low AC losses and low stress and strains of the superconducting winding, required the selection of the best type of iron core, superconducting materials and windings, and kind of cooling systems. In the paper the fundamental information about the design of transformers are discussed and presented.

Słowa kluczowe: transformatory nadprzewodnikowe, straty przemiennoprądowe, siły i naprężenia.

1. Wstęp

Transformatory nadprzewodnikowe są jednym z obiecujących zastosowań nadprzewodników w elektroenergetyce [1], [3]. Zastosowanie uzwojeń nadprzewodnikowych w transformatorach w miejsce uzwojeń konwencjonalnych, pozwala osiągnąć wiele korzyści [2]:

- ograniczenie strat mocy w uzwojeniach. Straty Joule'a, ze względu na zerową rezystancję nadprzewodnika są wyeliminowane. Nie da się jednak całkowicie wyeliminować strat histerezowych i wiropądowych powstających w nadprzewodniku przy prądzie przemiennym,
- zwiększenie sprawności transformatora, co ma wpływ na ekonomikę jego pracy,
- dużo większa odporność na zwarcia, nawet przy prądach 10-cio krotnie większych od prądu znamionowego,
- eliminacja olejowego układu chłodzenia. Są one przez to bezpieczne i przyjazne dla środowiska naturalnego i użytkowników,

- zmniejszenie gabarytów i masy transformatorów przy zachowaniu tej samej mocy jak w transformatorze konwencjonalnym. Pozwala to stosować je w obszarach o bardzo dużej urbanizacji, we wnętrzach budynków i w miejscach o ograniczonej przestrzeni.

Stosowanie transformatorów nadprzewodnikowych wymaga rozwiązania wielu problemów związanych z ich budową oraz eksploatacją. Można tu wymienić: wybór optymalnego rdzenia magnetycznego, wybór nadprzewodnika oraz sposobu wykonania uzwojeń nadprzewodnikowych, czy sposobu realizacji chłodzenia. Należy pamiętać, że w uzwojeniach nadprzewodnikowych generowane są straty przeniennopądowe, które wpływają na ekonomikę pracy układu chłodzenia a przez to na pracę całego urządzenia. Innym istotnym problemem jest kwestia sił i naprężeń powstających w uzwojeniach, których poznanie jest istotne dla zapewnienia bezpiecznej i poprawnej pracy transformatorów nadprzewodnikowych.

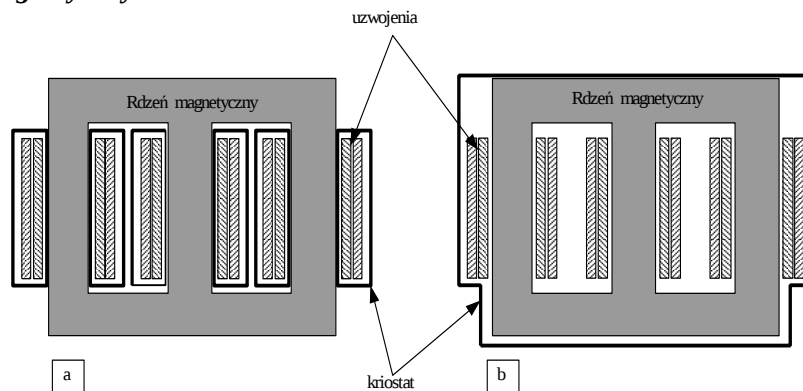
W pracy omówiono budowę transformatora nadprzewodnikowego z uwzględnieniem wyżej wymienionych problemów konstrukcyjnych, scharakteryzowano straty przeniennopądowe oraz siły i naprężenia występujące w uzwojeniach nadprzewodnikowych.

Referat ten powstał w oparciu o grant młodego naukowca nr. 1628/T10/2001/20, pt. „Siły i naprężenia w uzwojeniach transformatorów nadprzewodnikowych”.

2. Zasada budowy transformatora nadprzewodnikowego

Zasada budowy transformatorów nadprzewodnikowych jest taka sama jak konwencjonalnych. W obu przypadkach występuje rdzeń, będący obwodem magnetycznym, oraz dwa uzwojenia; pierwotne i wtórne. Mimo to różnice w budowie tych transformatorów są bardzo duże.

Rdzeń magnetyczny



Rys.1 Sposoby realizacji rdzeni magnetycznych transformatorów nadprzewodnikowych [5]:

a- rdzeń w temperaturze otoczenia – „ciepły”, b- rdzeń w temperaturze kriogenicznej – „zimny”.

W transformatorach konwencjonalnych uzwojenia nawinięte są bezpośrednio na rdzeniu i umieszczone w kadzi z olejem transformatorowym. W transformatorach nadprzewodnikowych uzwojenia znajdują się w kriostacie, podczas gdy rdzeń znajduje się najczęściej w temperaturze otoczenia [4], [5]. Umieszczenie rdzenia w temperaturze otoczenia jest wskazane ze względu na straty w żelazie, które w temperaturach kriogenicznych znacznie wzrastają. Ponadto przenikalność magnetyczna żelaza zależy od temperatury i maleje wraz z jej spadkiem. Umieszczenie rdzenia w temperaturze 77 K, wymusiłoby zwiększenie pola przekroju kolumny, a co za tym idzie jego gabarytów i masy, aby przepuścić taki sam strumień magnetyczny, jaki by płynął przez rdzeń znajdujący się w temperaturze otoczenia. Straty powstające w rdzeniu w temperaturze kriogenicznej miałyby znaczny udział w całkowitych stratach w transformatorze. W pracy [5] przedstawiono możliwość pracy rdzenia magnetycznego w temperaturze azotowej, tzw. „zimny”

rdzeń, jednak możliwość taka związana jest z koniecznością zastosowania wydajniejszych układów chłodzenia [6], zdolnych do odprowadzenia dodatkowych strat powstających w żelazie. Rysunek 1 przedstawia sposoby realizacji rdzeni magnetycznych.

W zasadzie możliwe jest zbudowanie transformatora nadprzewodnikowego bez rdzenia magnetycznego (transformator powietrzny) [4]. Transformator taki charakteryzowałby się eliminacją strat w żelazie, redukcją masy i objętości, lecz w zamian wymagałby znacznie większego prądu magnesującego. Uzwojenia takiego transformatora wykonane musiałyby być z nadprzewodnika o bardzo dużej gęstości prądu tak, aby możliwe było uzyskanie indukcji magnetycznej w powietrzu, co najmniej 2 T. Z drugiej strony zastosowanie rdzenia magnetycznego stwarza następujące korzyści:

- Rdzeń stanowi obwód magnetyczny dla strumienia głównego sprzęgającego uzwojenia. Eliminuje niebezpieczeństwo indukowania się prądu w konstrukcyjnych elementach transformatora.
- Zastosowanie rdzenia powoduje, że transformator może pracować przy niższej indukcji magnetycznej, co prowadzi do zmniejszenia wartości prądu magnesowania. Zmniejszenie strat ac w uzwojeniach wpływa na ograniczenie kosztów układu chłodzenia.

Duże gęstości prądu uzyskiwane w uzwojeniach pozwalają na zmniejszenie ich gabarytów w stosunku do analogicznych uzwojeń transformatorów konwencjonalnych, co prowadzi także do zmniejszenia masy i objętości rdzenia, poprzez zmniejszenie szerokości okna i wysokości kolumn. Związane z tym zmniejszenie wartości prądu magnesowania, pozwala pracować transformatorom nadprzewodnikowym już przy indukcji magnetycznej rzędu 0,8 - 1 T [4].

Materiały nadprzewodnikowe. Zasady budowy uzwojeń

Jak już powiedziano możliwość uzyskiwania dużych gęstości prądu w uzwojeniach nadprzewodnikowych, rzędu $10^3 - 10^4$ A / cm², stanowi główną korzyść płynącą ze stosowania transformatorów nadprzewodnikowych [4]. Początkowo do budowy transformatorów nadprzewodnikowych stosowane były nadprzewodniki niskotemperaturowe LTS – NbTi oraz Nb₃Sn, o temperaturach krytycznych 10 i 18 K. Rozwój nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego HTS pozwala na projektowanie i budowę transformatorów z uzwojeniami wysokotemperaturowymi. Głównie stosuje się przewody nadprzewodnikowe Bi 2212 pracujących w temperaturach 20 – 50 K, oraz taśmy Bi 2223 – w temperaturach 50 – 80 K. Duże nadzieje wiąże się z nadprzewodnikami YBCO 123 pozwalających na pracę w temperaturze powyżej 90 K [4], [7].

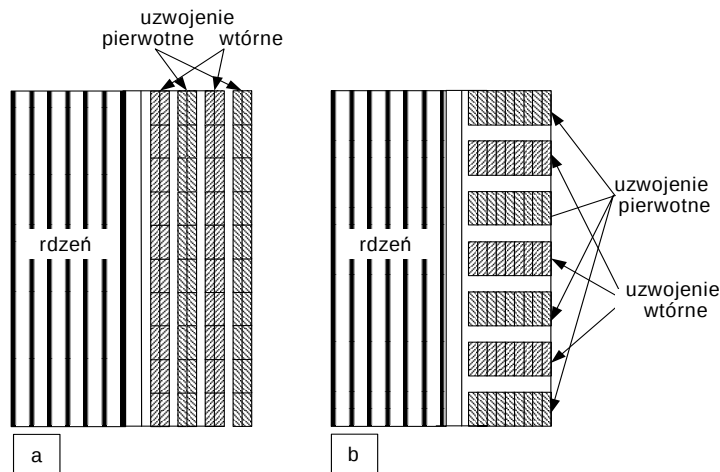
Istotnym obecnie problemem przy stosowaniu taśm i przewodów HTS jest duży stosunek objętości materiału matrycy do objętości włókien nadprzewodnika (10:1) [4]. Straty histerezy są wprost proporcjonalne do średnicy włókien. Straty te, indukowane przez składową promieniową pola magnetycznego są relatywnie duże, co stwarza konieczność stosowania bardziej wydajnego układu chłodzenia. Pojedyncze włókno z nadprzewodnika Bixxxx może przewodzić tylko ograniczony prąd, dlatego konieczne jest umieszczenie w matrycy wielu włókien równolegle. Jeżeli nie są one transponowane, powstają dodatkowe straty sprzężenia. Straty proporcjonalne do składowej promieniowej pola pojawiają się tylko w ostatnich 10 % długości uzwojenia i poprzez jego bardzo dokładne nawinięcie mogą być znacznie ograniczone [8].

Jeżeli ciepło właściwe materiału matrycy nadprzewodnika ma wartość wyższą od temperatury pracy, istnieje możliwość przejścia znacznej ilości ciepła, powstającego przy stratach ac, przez materiał matrycy. Spowoduje to wprowadzenie wzrost jej temperatury, ale nie spowoduje niekontrolowanego przejścia nadprzewodnika do stanu rezystywnego [4].

Nadprzewodniki YBCO są atrakcyjne w stosunku do nadprzewodników Bixxxx. Dzięki swojej strukturze krystalicznej charakteryzują się wyższym prądem krytycznym niż nadprzewodniki Bixxxx. Przekroczenie w pojedynczym zwoju gęstości prądu rzędu $5 \cdot 10^4$ A/cm²

wyduje się możliwe. Jednak ze względu na duże trudności technologiczne w produkcji taśm i przewodów o dużej długości, nadprzewodniki te nie są jeszcze obecnie szeroko stosowane.

Uzwojenia transformatorów nadprzewodnikowych HTS mogą być wykonywane w postaci cewek cylindrycznych lub krążkowych, nawiniętych spiralnie w płaszczyźnie –tzw. pancake coil [9], [10] (rys.3).



Rys.3 Uzwojenia transformatorów nadprzewodnikowych:
a- cewka cylindryczna, b- cewki krążkowe.

Pojedyncze cewki krążkowe łączone są szeregowo w celu uzyskania odpowiedniej wartości amperozwojów. Główną korzyścią płynącą z zastosowania uzwojeń krążkowych jest możliwość wymiany uszkodzonej cewki bez konieczności przewijania całego uzwojenia, co jest istotne ze względu na koszt nadprzewodnika. Z drugiej strony pomiędzy poszczególnymi cewkami płaskimi powstają szczeliny powietrzne, które powodują zmianę rozkładu pola magnetycznego na długości całego uzwojenia, w stosunku do analogicznego uzwojenia cylindrycznego. Wymagają one, zatem precyzyjnego wykonania i połączeń.

3. Straty prądoprowadowe w uzwojeniach transformatora

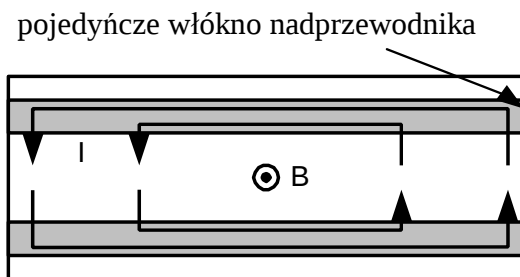
Straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych przy prądzie stałym są zerowe. Jednak mogą stać się one znaczne, jeżeli prąd uzwojenia wzrasta gwałtownie lub przepływa przez nie prąd przemienny. Straty prądoprowadowe ac są generalnie niewielkie, lecz stają się istotne ze względu na koszt wyprowadzenia mocy z poziomu temperatur kriogenicznych [4,8].

Kiedy zewnętrzne pole magnetyczne jest małe, następuje penetracja nadprzewodnika jedynie w warstwie powierzchniowej, w bardzo niewielkiej objętości. Jednak większe pole powoduje pełną penetrację nadprzewodnika w całej jego objętości powodując powstawanie znacznych strat histerezy. Są one dużym składnikiem strat ac. Powstają one we włóknach nadprzewodnika i jedną z metod ich ograniczenia jest wytwarzanie nadprzewodników o jak najmniejszej średnicy włókien. Straty histerezy są akceptowalne, jeżeli wymiary nadprzewodnika poprzeczne do pola są małe.

Straty wywołane prądami wirowymi, powstające w całej objętości matrycy nadprzewodnika, można ograniczyć poprzez zmniejszenie procentowego udziału materiału matrycy w całym przewodzie HTS.

Innym składnikiem strat ac są straty powstałe w wyniku sprzężenia pomiędzy włóknami nadprzewodnika (straty sprzężenia) [11]. Straty te wywołane są prądami indukowanymi płynącymi częściowo wzdłuż sąsiednich włókien i częściowo w poprzek oddzielającej włókna matrycy, tworząc w ten sposób zamknięte pętle. Straty te można zmniejszyć skręcając przewód wokół osi.

Skreślenie przewodu zmniejsza straty wywołane prądami indukowanymi przez zewnętrzne w stosunku do przewodu pole magnetyczne, nie ma natomiast żadnego wpływu na straty pochodzące od pola wewnętrznego wywołanego prądami płynącymi przez włókna, albowiem niezależnie od skreślenia, włókna umieszczone dalej od osi przewodu będą znajdowały się w intensywniejszym polu magnetycznym niż włókna leżące bliżej osi. Celem zmniejszenia tych ostatnich strat należałoby stosować zamiast skreśniania przewodu transpozycję włókien wewnątrz przewodu [11].



Rys. 4 Idea powstawania strat sprzężenia [8].

4. Prądy i siły występujące w uzwojeniach nadprzewodnikowych przy zwarcu

Bezpośrednią przyczyną powstawania sił dynamicznych działających na uzwojenia jest oddziaływanie pola magnetycznego na przewody z prądem [13, 14]. W przypadku uzwojeń transformatora jest to pole strumienia rozproszenia [15]. W pracy normalnej, gdy prądy w transformatorze nie przekraczają wartości znamionowej, siły działające na uzwojenia są na ogół małe, nie przekraczające wartości dopuszczalnych. Jednak podczas zwarcia, gdy prądy sięgają wartości kilkanaście lub nieraz kilkadziesiąt razy większej od znamionowej, siły mogą stać się niebezpieczne dla uzwojeń i konstrukcji mocujących.

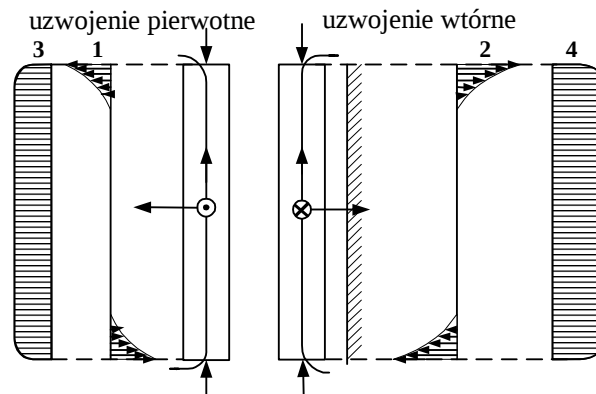
Ale to ostatnie zagrożenie, związane z prądami zwarciovymi, wydaje się być niebezpieczne tylko dla transformatorów konwencjonalnych, ponieważ w transformatorach nadprzewodnikowych problem zwarcia praktycznie nie występuje [4].

W transformatorach konwencjonalnych celowo zakłada się dużą wartość strumienia rozproszenia, aby uzyskać dużą reaktancję zwarciovą, ograniczającą negatywne efekty zwarcia. W transformatorach nadprzewodnikowych przekroczenie wartości prądu krytycznego nadprzewodnika powoduje jego natychmiastowe przejście do stanu rezystywnego a więc następuje samoograniczenie efektów zwarcia. Siły dynamiczne powstające przy przekroczeniu prądu krytycznego nie działają na tyle długo, aby mogły w trwały sposób uszkodzić uzwojenia transformatora, a więc nie trzeba zakładać dużej wartości strumienia rozproszenia oraz reaktancji zwarcioviej. Jednak problemu zwarć w uzwojeniach nadprzewodnikowych nie można zaniedbać stąd konieczne jest poznanie sił w nich działających [16].

Siły działające na uzwojenia

Siły działające na uzwojenia dzielimy na dwie grupy: promieniowe (poprzeczne) i osiowe (podłużne) [15].

Siły promieniowe są wynikiem działania na uzwojenia transformatora pola o kierunku równoległym do osi uzwojenia, tzw. pola podłużnego; przyczyną występowania sił osiowych jest pole poprzeczne o kierunku prostopadłym do osi uzwojeń. Na rysunku 5 pokazano schematycznie przebieg linii sił strumienia rozproszenia w symetrycznym uzwojeniu cylindrycznym.

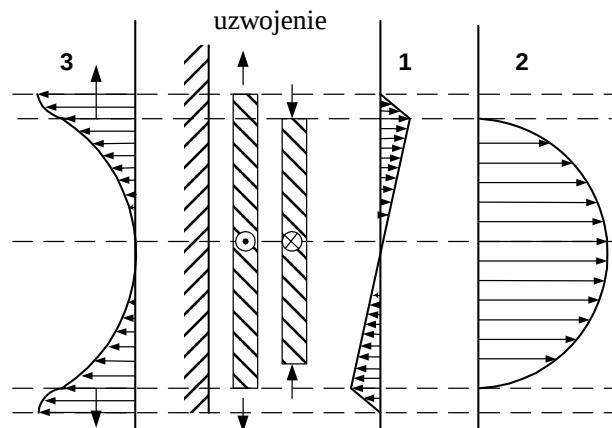


Rys. 5 Siły promieniowe i osiowe [15]:

1, 2-rozkład składowej poprzecznej indukcji pola rozproszenia dla uzwojeń zewnętrznego i przyrdzeniowego, 3, 4- rozkład sił osiowych ściskających oba uzwojenia.

Gdyby linie te przebiegały w całości równoległe do osi, to mielibyśmy do czynienia jedynie z siłami promieniowymi. Rozpychają one uzwojenie zewnętrzne i ściskają wewnętrzne, dążąc w ten sposób do powiększenia szczeliny międzyuzwojeniowej. W rzeczywistości istnieje zawsze pewien odstęp między krańcami uzwojeń a jarzmami, co powoduje zakrzywienie linii sił w pobliżu ich krańców. W wyniku tego obok sił promieniowych występują jeszcze siły osiowe.

Z rozkładu pola i kierunków prądu w uzwojeniach wynika, że na cewki końcowe w każdym z uzwojeń działają siły osiowe skierowane ku środkowi uzwojenia. Siły osiowe występujące przy całkowitej symetrii przestrzennej amperozwojów pierwotnych i wtórnych oraz uwarunkowane zakrzywieniem linii pola nazywane są często siłami osiowymi naturalnymi. Pole poprzeczne występuje także przy asymetrii osiowej amperozwojów. Powoduje ono powstawanie sił osiowych, które nazywamy siłami osiowymi asymetrii. Superpozycja sił osiowych symetrii i asymetrii daje wypadkową wartość siły osiowej. Rysunek 6 przedstawia siły osiowe wywołane asymetrią amperozwojów. Z rozkładu sił wynika, że najmocniej ściskane w uzwojeniu zewnętrznym są cewki środkowe, a w uzwojeniu wewnętrznym – cewki zewnętrzne. Siły wywierane na cewki zewnętrzne są przenoszone na konstrukcję wsporczą uzwojeń. Ponadto siły osiowe asymetrii dążą zawsze do jej powiększenia [15].



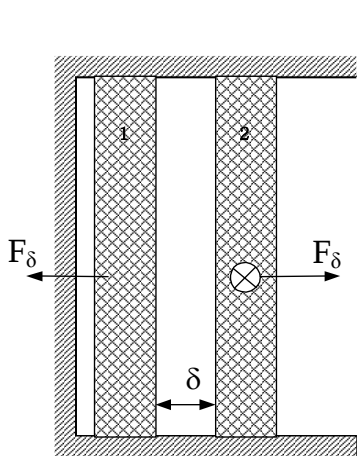
Rys. 6 Siły osiowe wywołane asymetrią amperozwojów [15]:

1- pole poprzeczne do asymetrii, 2,3- rozkład sił osiowych działających na każde z uzwojeń.

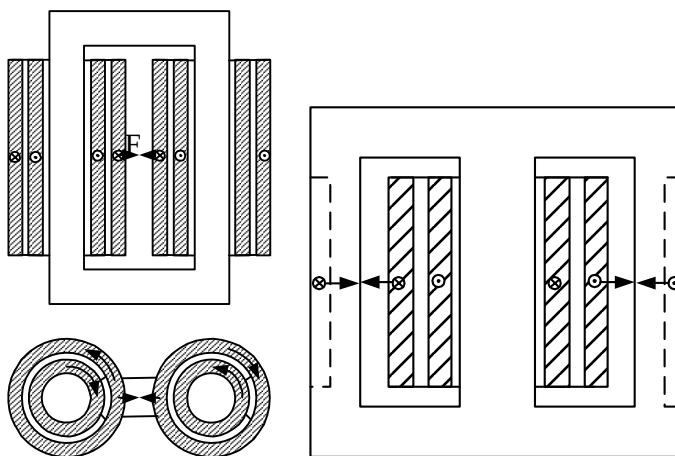
Siły promieniowe

Siły te wyznaczamy wychodząc z energii pola magnetycznego przy założeniach, że uzwojenie jest symetryczne, oraz jarzma przylegają bezpośrednio do uzwojeń. Przy takim założeniu linie magnetyczne strumienia rozproszenia przebiegają równoległe do osi uzwojenia i na każdą cewkę działa jednakowa siła promieniowa. Sumaryczna siła promieniowa F_δ dąży do powiększenia szczeliny międzyuzwojeniowej δ (rysunek 7) [15].

W rzeczywistości, jarzma nigdy nie przylegają do uzwojeń, wskutek czego składowa podłużna strumienia jest na krańcach uzwojenia mniejsza niż w części środkowej. Powoduje to, że siły poprzeczne działające na cewki skrajne są mniejsze niż siły działające na cewki środkowe.



Rys. 7 Rozkład sumarycznej siły promieniowej [15].

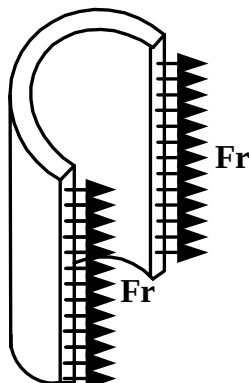


Rys. 8 Zwiększenie sił promieniowych w oknie transformatora wskutek wzajemnego oddziaływania uzwojeń sąsiednich kolumn, oraz wskutek bliskości bocznych kolumn [15].

Na wartość sił promieniowych mają także wpływ uzwojenia znajdujące się na sąsiednich kolumnach lub oddziaływanie samych kolumn, rysunek 8.

Działanie sił promieniowych na uzwojenia zewnętrzne i wewnętrzne

Rysunek 9 przedstawia rozkład siły rozrywającej uzwojenie zewnętrzne. Siła ta napręża przewody poszczególnych warstw w niejednakowy sposób. Gdyby uzwojenie było ciałem całkowicie sztywnym poszczególne warstwy byłyby naprężane tylko swoimi własnymi siłami, proporcjonalnymi do indukcji strumienia rozproszenia w miejscu rozpatrywanej warstwy. Najmocniej byłyby naprężane przewody warstw położonych najbliżej szczeliny międzyuzwojeniowej, najslabiej przewody warstw skrajnych w stosunku do szczeliny [15].



Rys. 9 Siły F_r rozrywające uzwojenie zewnętrzne [15].

Gdyby uzwojenie transformatora nie było podparte od wewnątrz przez podłużne listwy wbite między uzwojenie a rdzeń, to byłoby ono naprężone w sposób podobny jak zewnętrzne, z tą różnicą, że naprężenia byłyby ściskające. Wskutek umieszczenia podłużnych listw w uzwojeniu występują naprężenia złożone ściskająco – zgniatające. Dobierając odpowiednią liczbę listw możemy uzyskać stan, w którym wypadkowe naprężenie normalne (jako wynik ściskania i zgniatania) będzie takie samo jak naprężenie rozrywające w uzwojeniu zewnętrznym, lecz skierowane przeciwnie [15].

Siły osiowe

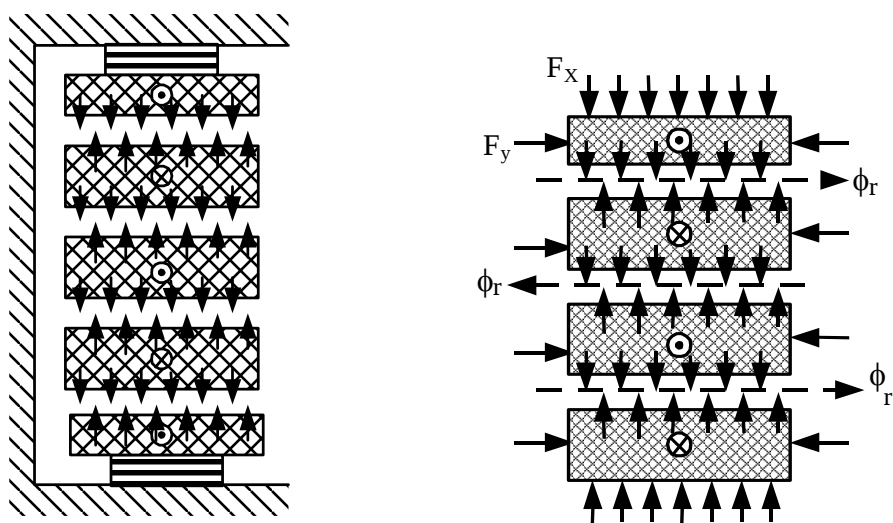
Przyczyną powstawania sił osiowych jest składowa poprzeczna pola rozproszenia. Występuje ona zawsze na końcach uzwojeń wskutek zakrzywiania się linii sił strumienia rozproszenia oraz we wszystkich przypadkach, gdy osiowy rozkład amperozwojów obu uzwojeń nie jest równomierny.

Gdyby oba uzwojenia ze znajdującą się między nimi szczeliną przylegały z góry i dołu do żelaza, wtedy linie sił strumienia rozproszenia przebiegałyby równoległe do osi uzwojeń i nie wystąpiłaby żadna siła osiowa. W rzeczywistości istnieje zawsze pewien odstęp uzwojenia od jarzma, co powoduje powstawanie sił osiowych dążących do zmiany wysokości uzwojenia, przy czym na uzwojenie zewnętrzne działa zwykle siła mniejsza, tym mniejsza im uzwojenia są bliżej kolumny (rys.5, rys. 6).

Pełny obraz zagrożenia uzwojeń przez siły osiowe występujące przy zwarcia transformatora można uzyskać wtedy, gdy znany jest rozkład sił osiowych wzdłuż całej wysokości uzwojenia. Pozwala to na ustalenie miejsc, w których siły osiowe są największe oraz obliczenie odpowiadającym tym siłom naprężeń.

Siły i naprężenia w uzwojeniach krążkowych

W przypadku uzwojeń krążkowych siły na nie działające dążą do powiększenia szczelin międzyuzwojeniowych. Rysunek 10 ilustruje rozkład sił w uzwojeniu krążkowym. Siły F_x ściskają każdą z cewek w kierunku osiowym, natomiast siły F_y ściskają dodatkowo każdą z cewek z boku w kierunku równoległym do linii sił rozproszenia. Niejednakowe wymiary poszczególnych cewek, lub przerwy w cewkach, mogą spowodować dodatkowe siły dążące przesunięcia cewek w stosunku do siebie w kierunku prostopadłym do osi kolumny [15].



Rys. 10 Siły osiowe i promieniowe działające na cewki uzwojenia krążkowego [15]:
 Φ_r - strumień rozproszenia

Skutki działania sił i naprężeń na uzwojenia transformatora

Siły dynamiczne, indukujące naprężenia w uzwojeniach nadprzewodnikowych w różny sposób zdolne są do rozpraszania energii. Wywołują one szerokie spektrum zakłóceń w pracy transformatora, włącznie z całkowitym zniszczeniem uzwojeń. W uzwojeniach nadprzewodnikowych podobnie jak w ich konwencjonalnych odpowiednikach, mogą powstawać pęknięcia, szczeliny, rozwarstwienia. Może też dochodzić do rozpraszania energii w postaci ciepła, np. w wyniku wzajemnego tarcia sąsiadujących ze sobą zwojów.

Problemy te ze względu na zjawisko samoograniczenia prądu przez uzwojenie nadprzewodnikowe, nie są tak poważne jak w uzwojeniach konwencjonalnych. Siły dynamiczne działające w uzwojeniach nadprzewodnikowych nie są na tyle duże, by spowodować poważne straty, ale problemu tego nie należy lekceważyć i należy zabezpieczyć się przed ich działaniem.

Ograniczenie negatywnych efektów działania sił i naprężeń w uzwojeniach, można uzyskać poprzez dokładne nawinięcie uzwojenia, stosowania wypełnienia przestrzeni międzyzwojowej, oraz stosowanie materiałów nadprzewodnikowych o dużej wytrzymałości mechanicznej.

Ostatnie zagadnienie ma szczególne znaczenie w przypadku nadprzewodników wysokotemperaturowych ze względu na ich ceramiczną strukturę. Decydujący wpływ na ich wytrzymałość ma tu materiał matrycy, którego wytrzymałość determinuje wytrzymałość całego nadprzewodnika. Dopuszczalna wytrzymałość mechaniczna produkowanych obecnie taśm Bi2223 wynosi 75 – 150 MPa. Produkowane są jednak taśmy, np. przez American Superconductor, których wytrzymałość mechaniczna wynosi 300 MPa, a więc jest porównywalna z wytrzymałością miedzi.

Największe naprężenie rozrywające, które można dopuścić w uzwojeniach transformatorów konwencjonalnych, wynosi 100 – 200 MPa [15]. Jeżeli założymy, że analogiczne naprężenie dla uzwojeń nadprzewodnikowych jest mniejsze, to wytrzymałość mechaniczna produkowanych obecnie taśm nadprzewodnikowych jest zadawalająca.

5. Wnioski

Transformatory nadprzewodnikowe są atrakcyjne ze względu na stosunkowo małe straty w uzwojeniach, dużą gęstość prądu, większą stabilnością dynamiczną. W transformatorach nadprzewodnikowych olej transformatorowy został zastąpiony ciekłym helem lub azotem. Są to ciecze niepalne, nieniszczące, oraz nieszkodliwe dla zdrowia i środowiska.

Ze względów ekonomicznych oraz użyteczności pracy transformatory nadprzewodnikowe muszą charakteryzować się niskimi kosztami pracy i produkcji, niską wagą, zwartą konstrukcją, bezpieczeństwem dla środowiska, czasem eksploatacji dłuższym niż 30 lat. Aby to zapewnić, przy ich projektowaniu należy rozwiązać wiele problemów, związanych z wyborem sposobu realizacji obwodu magnetycznego, wyborem nadprzewodnika i metody wykonania uzwojeń, sposobu chłodzenia. Należy dążyć do eliminacji sił i naprężeń oddziałujących na uzwojenia lub do eliminacji efektów tego oddziaływania, oraz do maksymalnego ograniczenia strat przemiennoprądowych w uzwojeniach. Można to osiągnąć głównie poprzez dobór odpowiedniego nadprzewodnika, spełniającego wymagania, co do wytrzymałości mechanicznej, oraz charakteryzującego się dopuszczalnie małymi stratami ac.

Literatura

- [1] Janowski T. Transformatory nadprzewodnikowe. Zeszyty Naukowe Elektryka, Politechnika Poznańska 2000 r
- [2] Kozak S., Wojtasiewicz G., Wybrane Zastosowania Nadprzewodnictwa w Energetyce, materiały konferencyjne XXIV – IC SPETO 2001, Gliwice – Ustroń 23-26.05.2001, str. 131 – 134
- [3] http://itri.loyola.edu/scpa/03_05.htm, Superconducting Transformers – Overview
- [4] Kalsi S., ASC, Superconducting Transformers, Webster J., (ed), Willey Encyclopedia of Electrical and Electronics Online, Copyright © 1999 by John Willey & Sons, Inc.

- [5] Donnier-Valentin G., Tixador P., Vinot P., Consideration about HTS Superconducting Transformers, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 11, No.1, March 2001, pp. 1498-1501.
- [6] Janowski T., Kondratowicz – Kućwicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G., Postępy w Zastosowaniach Nadprzewodników, Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej nr 37, seria: Konferencje nr 12, str. 261 – 268, Jamrozowa Polana 2000r
- [7] Zakrzewski K., Perspektywy Zastosowania Nadprzewodników Wysokotemperaturowych (HTS) w Transformatorach Energetycznych, materiały konferencyjne, Transformatory Energetyczne I Specjalne, Kazimierz Dolny, 14-16 październik 1998, pp. 195-201.
- [8] <http://www.ub.utwente.nl/nebdocs/tn/1/t0000018.pdf>. Oomen M.R., AC Losses in Superconducting Tapes and Cables, © M.R Oomen 2000.
- [9] Lee H.E., Cha G., Lee J-K., Choi K.D., Ryu K.W., Hahn S.Y., Test and Characteristic Analysis of an HTS Power Transformer, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 11, No.1, March 2001, pp. 1486-1489.
- [10] Polák M., Ušák P., Janšák L., Timoranský Z., Piel H., Comparison of Selenoidal and Pancake Model Windings for Superconducting Transformer, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 11, No.1, March 2001, pp. 1478-1481.
- [11] Lech W. Badania nad konstruowaniem wybranych modeli próbnych urządzeń krioelektrycznych. Dokumentacja Techniczna Nr NWN – 29/73 Instytut Elektrotechniki, Warszawa 1973
- [12] Jezierski E., Uzwojenia Transformatorów Energetycznych. Budowa i Obliczenia, Praca zbiorowa. WNT 1982.
- [13] Wilson M.N., Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford, 1983.
- [14] <http://www.nst.com/ASC98-PSH.PDF>, Skov-Hansen P., Han Z., Bech J.L., Stresses and Strains Multi-Filament HTS Tapes.
- [15] Jezierski E. Transformatory. Podstawy teoretyczne., WNT 1965
- [16] Niagara T., Yamaguchi M., Fukui S., Yamamoto M., Design Requirements of a High Temperature Transformer, 5th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS 2001, Technical University of Denmark, Copenhagen August 26 –30, 2001.
- [17] Janowski T. Recent development and perspectives of superconductivity applications, ELMCO 2000, Nałęczów 4-6 June 2000, pp.166 – 173
- [18] Lech W. Zastosowanie niskich temperatur w urządzeniach energetycznych. Prace Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, Warszawa 1979
- [19] Lech W. Prace badawcze z dziedziny kriotransformatorów. Dokumentacja Techniczna Nr.484/68 Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1968

III Seminarium
„ZASTOSOWANIA
NADPRZEWODNIKÓW”

Lublin – Nałęczów, 22-23.11.2001 r.



EFEKTY ROZWOJU KRIOELEKTROTECHNIKI
W POLITECHNICE CZĘSTOCHOWSKIEJ

Eugeniusz Uchyla

były pracownik Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Częstochowskiej

tel. dom. (034) 36 20 026

Abstract

Since 1975 in the Institute of Electrical Power Engineering of the Technical University in Częstochowa, the head of Electrical Equipment Chair, has created the Team of Cryoelectrical Engineering. The innovative construction of cryobushing enables to supply the appliances working in cryogenic temperatures (below 92 K) with the current. Current leads of cryobushing, especially the porous phosphor tin-bronze, connect the electric circuits partly in cryogenic and partly in normal temperatures. When the cooling conditions are appropriately chosen it is possible to supply the current to the cryogenic area without additional heat input.

Słowa kluczowe: krioelektrotechnika, krioprzepusty.

1. Wstęp

Wykorzystanie zjawisk elektrycznych w środowisku o temperaturach kriogenicznych stworzyło nowe perspektywy w zakresie przetwarzania i przesyłu energii elektrycznej, oraz zwiększenia sprawności urządzeń elektrycznych. Zasadniczą oczekiwaną korzyścią było osiągnięcie mniejszej masy i gabarytów urządzeń elektrycznych (np. w technice raketowej lub na łodziach podwodnych), oraz obniżenie strat w aparatach i urządzeniach przemysłowych (przesyłanie i magazynowanie energii elektrycznej). W każdym z tych urządzeń występuje odcinek toru prądowego, doprowadzający prąd z obwodu elektrycznego o temperaturze otoczenia do obszaru kriotemperatur. Występuje przy tym problem minimalizowania dopływu przez niego ciepła do chłodzącego czynnika kriogenicznego, zmniejszającego jego zużycie przez odparowanie. Ten odcinek toru prądowego wraz z odpowiednią izolacją elektryczną i cieplną nazywany jest krioprzepustem [18].

Zagadnieniami projektowania i konstrukcji krioprzepustów od 1975 roku w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Częstochowskiej zajmował się zespół pod kierownictwem doc. dra inż. Stefana Janiczka. Prace obejmowały opracowania i badania różnych modeli krioprzepustów dla kriokabla azotowego, a następnie urządzeń nadprzewodzących.

W ramach programu badań problemu węzłowego 05.13. autor zbadał model krioprzepustów z porowatymi torami prądowymi, wykonany wg własnych projektów. [24].

2. Początki krioelektrotechniki w Polsce

Dnia 10.12.1958 r. do Urzędu Patentowego w Warszawie ówczesny mgr inż. Stefan Janiczek, członek Polskiego Towarzystwa Astronautycznego w Krakowie, zgłosił wynalazek pod nr 43086 [1]. Ten pierwszy polski patent z krioelektrotechniki nosił tytuł „Napęd elektrodynamiczny pojazdów mechanicznych zwłaszcza samolotów i pojazdów kosmicznych i układ urządzenia napędu”. W koncepcji wynalazku wykorzystano nadprzewodniki (poniżej temperatury wrzenia ciekłego helu 4,2 K) z metali lub ich stopów i związków. Atrakcyjność tej myśli technicznej była potwierdzona w równoczesnym przyjęciu polskiego wynalazku przez U.S. Department of Commerce, (Patent Office, Washington, Ser. No. 852238, for: „Electrodynamic Drive for Mechanical Vehicles”).

Drugi patent z krioelektrotechniki mgr inż. Stefan Janiczek zgłosił 8.12.1959 r. pod tytułem „Homopolarna maszyna prądu stałego dowolnie wysokiego napięcia zwłaszcza generator lub silnik dużej mocy” pod nr 44923 [2], opublikowany w Biuletynie U.P. PRL 21 września 1961 r. Była to odmiana nadprzewodzącej maszyny unipolarnej.

Prace badawcze modelu toru prądowego izolowanego próżnią, chłodzonego jednostronnie ciekłym azotem (78 K), mgr inż. S. Janiczek przeprowadził w Laboratorium Niskich Temperatur w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. Wnioski z jego pracy doktorskiej pt. „Teoria ruchu ciepła w przewodach doprowadzających prąd do obszarów o temperaturach kriogenicznych” [3] z 1967 były rewelacją. Wskazały, jak doprowadzić prąd elektryczny przez tor prądowy o dużym gradiencie temperatury wzdłuż jego długości, minimalizując dopływ ciepła do obszarów kriotemperatur. Zaplanowaną następnie habilitację pt. „Przewody elektryczne doprowadzające wielkie prądy do obszarów o temperaturach kriogenicznych” połączono w całość z doktoratem i ogłoszono w Biuletynie PAN (1969, No 8, vol. XII - j. francuski) [4, 5]. Obrona tej pracy doktorskiej odbyła się 20.12.1967 r. w Zakładzie Niskich Temperatur Instytutu Fizyki PAN we Wrocławiu, kierowanym przez prof. dra Józefa Mazura, który był recenzentem pracy razem z prof. drem inż. Jerzym Skowrońskim z Politechniki Wrocławskiej. Promotorem pracy doktorskiej został prof. dr Zygmunt Galasiewicz z Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. W kwietniu 1968 r. prof. dr J. Skowroński zorganizował zebranie naukowe w Ustroniu koło Kępna, na które zaprosił pierwszego doktoranta z krioelektrotechniki dra inż. Stefana Janiczka [6]. To zebranie naukowe przeszło do historii pod nazwą I Sympozjum nt. „Zastosowanie niskich temperatur w elektrotechnice”. Na tym zebraniu byli obecni pasjonaci krioelektrotechniki, którzy w pracy naukowej zajmowali się zastosowaniem niskich temperatur w elektrotechnice. Było to pierwsze publiczne zaistnienie krioelektrotechniki w Polsce.

Nadanie rozgłosu temu wydarzeniu przez prof. Jerzego Skowrońskiego [7], poprzez publikację w 1968 r. artykułu w Przeglądzie Elektrotechnicznym, powszechnie utrwała ten rok jako początek polskiej krioelektrotechniki. Należy jednak przypomnieć, że w poprzednim roku dr inż. S. Janiczek obronił przewód doktorski z krioelektrotechniki, którego recenzentem był prof. J. Skowroński. Natomiast wynalazek krioelektryczny zgłosił mgr inż. S. Janiczek 10 lat wcześniej, bo w 1958 roku, co było początkiem jego dalszych prac w tej pionierskiej dyscyplinie. Cały świat naukowy mógł zapoznać się z jego treścią (Nr 43086) w Biuletynie Urzędu Patentowego PRL z 1 kwietnia 1960 r.

Polska kriotechnika zaistniała na świecie podczas konferencji „Low temperatures and electric power”, która odbyła się w marcu 1969 r. w Londynie. W konferencji uczestniczyli profesorowie J. Skowroński i J. Mazur; dr inż. S. Janiczek, mimo zgłoszenia referatu, nie uzyskał zgody Politechniki Krakowskiej na wyjazd do Londynu.

W 1972 r. doc. dr inż. Stefan Janiczek przeniósł się z Politechniki Krakowskiej do Politechniki Częstochowskiej na zasadach porozumienia stron i otrzymał stanowisko kierownika

Zakładu Urządzeń Elektrycznych. Planowana w tym zakładzie zwarcioznia po wybudowaniu stwarzała możliwości uruchomienia stanowiska do badań krioprzepustów wieloprądowych.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy i wieloletnią współpracę (od 1968 r.) z Zespołem Problemowym Krio-elektrotechniki PAN we Wrocławiu w 1975 roku doc. dr inż. S. Janiczek zwrócił się do Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w Warszawie z propozycją wprowadzenia w programie nauczania Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej przedmiotu „krio-elektrotechnika”.

Od roku 1970 krio-elektrotechnika w Polsce została objęta programem węzłowym, nie mogła jednak rozwijać się w pełni z przyczyn finansowych i dlatego skupiła się wokół środowiska wrocławskiego. Od 1975 roku problem węzłowy został objęty planem współpracy międzynarodowej krajów RWPG - „INTERKRIOLEP”. Całość prac w Polsce z tej dziedziny jest już koordynowana przez **Sekcję Krio-elektrotechniki Komitetu Elektrotechniki PAN**. Inicjatorem powołania tej sekcji i jej wieloletnim przewodniczącym był prof. J. Skowroński. Problem węzłowy pt. „Zastosowanie krio-elektrotechniki w gospodarce narodowej”, oznaczony kodem **05.13.**, posiadał centralne finansowanie z budżetu państwowego, planowanego w okresach pięcioletnich.

3. Krio-elektrotechnika w Politechnice Częstochowskiej

Decyzja Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dała możliwość kształcenia kadry inżynierskiej na jedynej uczelni wyższej w Polsce ze znajomością krio-elektrotechniki równolegle z postępem nauki w tej dyscyplinie. Doc. dr inż. S. Janiczek wprowadził przedmiot „krio-elektrotechnika” w formie wykładów [10], oraz „ćwiczeń laboratoryjnych z krio-elektrotechniki” [9]. Zakład został zreorganizowany i wydzielono grupę czterech asystentów, magistrów inżynierów: Włodzimierza Gędek, Eugeniusza Uchylę, Lecha Sękowskiego, Andrzeja Bińczyka.

Asystenci odbyli trzymiesięczny staż naukowy w Zakładzie Niskich Temperatur, kierowanym przez **dr inż. Tadeusza Walugę**, w Instytucie Badań Jądrowych w Krakowie. Równocześnie zakupiono odpowiednią unikalną aparaturę i urządzenia pomocne do zbudowania 12 ćwiczeń dydaktycznych. Wykłady w latach 1978-1991 prowadził doc. dr inż. Stefan Janiczek, a od jesieni 1991 r. adiunkt dr inż. Włodzimierz Gędek. Laboratorium Krio-elektrotechniki w tym czasie oprócz celów dydaktycznych pełniło rolę naukowo-badawczą dla pracowników zespołu krio-elektrotechniki[9].

Równolegle z dydaktyką zespół pracowników krio-elektrotechniki uczestniczył w realizacji pracy naukowo-badawczej, od 1975 r. współpracując z Instytutem Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu w problemie węzłowym 05.13. Bezpośrednim koordynatorem prac zespołu doc. dra inż. Stefana Janiczka był **prof. zw. dr hab. inż. W. Trzebiatowski**, członek rzeczywisty PAN i dyrektor Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu.

Pomimo że problem węzłowy 05.13 był strategiczny dla polskiej energetyki, prace w Polsce były przez dwie pięciolatki (do 1985 r.) dotowane wyłącznie przez PAN, przy praktycznie żadnym zainteresowaniu potencjalnych przyszłych użytkowników. Krajowa koncepcja rozwoju krio-elektrotechniki miała w energetyce zaowocować liniami przesyłowymi w postaci kriokabli. Zespół doc. dra inż. S. Janiczka zbudował pod koniec pierwszej pięciolatki krioprzepust dla kriokabla chłodzonego ciekłym azotem (78 K) dla prądu znamionowego 4500 A. Koszty pełnych badań wykonanego prototypu przekroczyły przydzielone środki finansowe, które nie wystarczyłyby na zakupienie odpowiedniej ilości ciekłego azotu. Uzasadnione było więc zbadanie tego krioprzepustu w połączeniu z kriokablem, którego wykonanie było zależne od inwestora. Wprowadzenie badań modelowych krioprzepustów dla prądów znamionowych poniżej 100 A znacznie obniżyło koszty badań i pozwoliło na badanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Prace naukowo-badawcze przyczyniły się do dokonania 4 wynalazków z zakresu konstrukcji krioprzepustów [11-14]. Zagadnienia zestykowe w obszarach kriotemperaturowych sprowadzone zostały do analizy rezystancji zestyku punktowego w ciekłym azocie [15, 16]. Wnioski inspirowały dalsze badania, których rezultatem było wskazanie rewelacyjnej metody spajania torów prądowych metodą zgniotu, według technologii opracowanej w Instytucie Obróbki Plastycznej i Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej. Rezultaty badań w ciekłym azocie, połączeń torów prądowych metodą: lutospawania, zgrzewania oporowego oraz nowej metody zgrzewania doczołowego na zimno - wykazały zalety tej ostatniej, preferującej do wykorzystania w krioelektrotechnice [17].

Specjalizacją zespołu były zagadnienia projektowo-konstrukcyjne krioprzepustów w całości ujęte w raportach corocznie opracowywanych dla Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu [18]. Opracowano metody projektowania konstrukcji krioprzepustów optymalnych pod względem strat cieplnych w tym istotnym dla urządzenia kriogenicznego elemencie. Udowodniono eksperymentalnie, że możliwe jest zaprojektowanie i zbudowanie chłodzącego toru prądowego krioprzepustu, pracującego z dużym gradientem temperatur, który doprowadza energię elektryczną, lecz nie doprowadza ciepła ze środowiska naturalnego do obszaru kriogenicznego. Powstające straty energii w samym krioprzepuscie także mogą być wytransportowane przez czynnik chłodzący, nie wpływając na bilans cieplny obszaru krioelektrycznego [24].

Raporty przekazane do PAN nie były publikowane. Część opracowań własnych była ogłaszana pod odrębnymi tytułami. Zasady projektowania krioprzepustów ujmuje publikacja A. Bińczyka i W. Gędką [19] z 1982 r., a uzupełnieniem tematu jest opracowanie S. Janiczka i W. Gędką [20] wydane w 1980 roku, dające przegląd światowych rozwiązań konstrukcyjnych krioprzepustów. Szczegółową specjalizację prezentują opracowania W. Gędką [21 i 23] i E. Uchyły [22, 24; 26, 29].

4. Krioprzepusty z porowatymi torami prądowymi

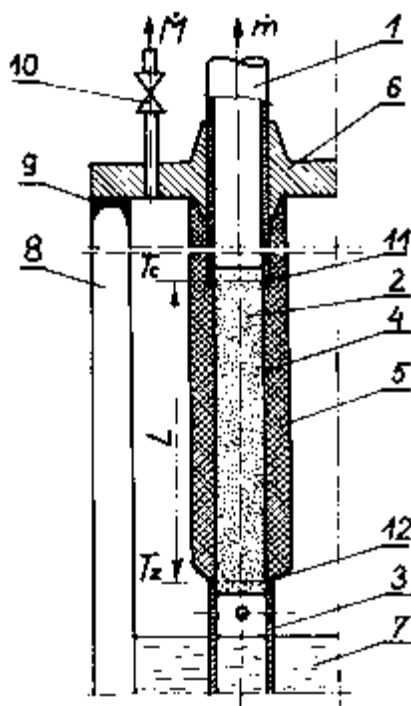
Budowa krioprzepustów z porowatymi torami prądowymi (krócej krioprzepustów porowatych) wymaga znajomości rzeczywistych parametrów przewodnika porowatego, wykonanego określoną technologią. Badania modeli są niezbędne w celu weryfikacji danych projektowych, parametrów cieplnych, elektrycznych i hydraulicznych, co pozwala na określenie warunków chłodzenia i parametrów eksploatacyjnych konkretnego egzemplarza krioprzepustu.

Budowę krioprzepustu z porowatym torem prądowym przedstawia rysunek 1. Tor prądowy krioprzepustu składa się z odcinka 1 o temperaturze otoczenia, połączonego galwanicznie z przewodnikiem porowatym 2, do którego w zimnym końcu przyłączony jest tor prądowy 3, chłodzony cieczą kriogeniczną 7. Pary cieczy kriogenicznej o odpowiednim natężeniu strumienia $\dot{m}$ mają możliwość przepływu wzdłuż toru prądowego, poprzez jego strukturę porowatą. Przewodnik porowaty znajduje się w hermetycznej osłonie 4 o złym przewodnictwie cieplnym i otoczony jest izolacją cieplną 5 - przykładowo pianką poliuretanową. Tor prądowy 1 izolowany jest elektrycznie, odpowiednio ukształtowaną pokrywą izolacyjną 6, która zamyka naczynie Dewara 8, wewnątrz którego znajduje się zasilane urządzenie krioelektryczne wraz z chłodzącą cieczą kriogeniczną.

Zastosowanie izolacji cieplnej wzdłuż chłodzonego toru prądowego jest konieczne w celu wyeliminowania rozprywu ciepła o charakterze niekontrolowanym. Dzięki temu proces chłodzenia jest określony fizycznie i umożliwia uzyskanie zabiegami konstrukcyjnymi ekonomicznie uzasadnionych rozkładów temperatur wzdłuż toru prądowego.

Porowate tory prądowe posiadają w swoim wnętrzu sieć kanalików przepuszczalnych dla czynnika chłodzącego, które do celów analizy procesów przepływowych zastępujemy materiałem idealnym. Zastępczy materiał porowaty posiada sieć kapilar zastępczych o jednakowej średnicy,

poniżej kilku mm, aż do średnic kapilar, w których występuje zjawisko włosowatości. Różnorodne przewodniki porowate wykonane odmiennymi technologiami, odwzorowane materiałem zastępczym, mogą być z sobą porównywane poprzez kryteria podobieństwa przepływu gazów opisujące dane eksperymentalne.



Rys. 1. Budowa krioprzepustu z porowatym torom prądowym: 1 - tor prądowy w temperaturze otoczenia, 2 - przewodnik porowaty, 3 - tor prądowy w temperaturze kriogenicznej, 4 - hermetyczna osłona, 5 - izolacja cieplna, 6 - pokrywka izolacyjna, 7 - ciecz kriogeniczna, 8 - ścianka naczynia Dewara, 9 - uszczelka, 10 - zawór wymuszający nadciśnienie

Wśród porowatych torów prądowych krioprzepustów opisanych w literaturze można wyszczególnić następujące konstrukcje [28] :

- a) gęste pęczki kapilar lub druciki upakowane w osłonie,
- b) linki ze splecionych drucików w osłonie,
- c) drobnooczkową siatkę zrolowaną w osłonie,
- d) pakiety cienkiej folii i taśm perforowanych lub karbowanych upakowane w osłonie,
- e) druciki, tasiemki lub włókna przewodzące sprasowane chaotycznie w osłonie,
- f) przewodnik z porowatym wypełnieniem (granulki sypkie) w strefie przepływu gazu chłodzącego,
- g) spiekane metaliczne proszki lub granulki przewodnika,
- h) metaliczne materiały pianowe,
- i) kombinacje wyżej wymienionych.

W każdym z tak wykonanych torów prądowych występują specyficzne cechy przepływu gazu i przenoszenia ciepła. Konieczne jest prowadzenie badań modelowych w celu weryfikacji równań kryterialnych, zastosowanych w obliczeniach projektowych, oraz sprecyzowanie wpływu parametrów procesu technologicznego na parametry przewodnika porowatego.

Przedmiotem badań autora były tory prądowe wyszczególnione w punktach f) i g) z uwagi na dostępność technologii wykonania oraz interesujące parametry eksploatacyjne.

Porowate tory prądowe cechuje duża powierzchnia wymiany ciepła przypadająca na jednostkę ich objętości. Penetracja wnętrza przewodnika przez gaz spowoduje chłodzenie do objętościowego przejmowania ciepła. Zabezpiecza to wysoki stopień wykorzystania entalpii czynnika chłodzącego (80÷100%). Współczynnik przejmowania ciepła jest zbliżony wielkością do współczynnika w procesie idealnej wymiany.

Przewodniki porowate dają szerokie możliwości projektowania krioprzepustów o różnych parametrach roboczych, poprzez możliwość doboru własności elektrycznych i cieplnych materiału, oraz uzyskiwanie odpowiedniej jego porowatości i przepuszczalności.

Przewodniki porowate wytwarzane metodą spiekania posiadają swoje cechy charakterystyczne. W porównaniu z przewodnikiem jednorodnym mają mniejszą przewodność elektryczną i cieplną, dlatego krioprzepusty z takimi torami mogą być krótsze. Duża sztywność ich konstrukcji jest ważna przy zasilaniu urządzeń narażonych na wibracje i udary (na okrętach z wyrzutniami rakietowymi). Posiadają większą bezwładność cieplną, przez co są stabilniejsze przy przeciążeniach prądowych. Dodatkową zaletą jest technologiczna łatwość wkomponowania nadprzewodnika podczas procesu spiekania, np. Nb_3Sn dla proszku z brązu cynowego. W pewnych odcinkach toru prądowego krioprzepustu, poprzez odpowiedni rozmiar kapilar, wykorzystując efekt włosowatości, można zastosować chłodzenie cieczą kriogeniczną.

Dla porowatych torów prądowych istnieją trudności w zapewnieniu równomiernej przepuszczalności oraz w wykonaniu odpowiedniej jakości połączeń ze współpracującymi elementami obwodu elektrycznego. Wykonanie przewodnika porowatego metodą spiekania jest stosunkowo proste pod warunkiem dysponowania sprawdzoną, prawidłową technologią. Szczególnie uwidaczniają się następujące problemy:

- a) Dobór właściwego procesu spiekania i odpowiedniej dla niego metody formowania, stopień trudności wzrasta wraz z rozmiarami, długością L i polem przekroju poprzecznego porowatego toru prądowego.
- b) Zapewnienie odpowiedniej porowatości efektywnej poprzez dobór odpowiednich parametrów procesu spiekania.
- c) Zapewnienie odpowiedniej jakości połączeń spiekanych granulek, określających własności elektryczne i cieplne przewodnika porowatego.

Zastosowanie porowatego wypełnienia w postaci sypkich granulek, w strefie przepływu gazu chłodzącego, jest technologicznie najprostszym sposobem zwiększenia efektywności chłodzenia doprowadzeń prądowych w już istniejących urządzeniach, dlatego zagadnienie ich budowy i badania modelowe zasługują na szczególną uwagę.

5. Wybrane konstrukcje krioprzepustów porowatych

Tor prądowy krioprzepustu ze złożem sypkich granulek

Tor prądowy tego typu można wykonać w dwóch wersjach:

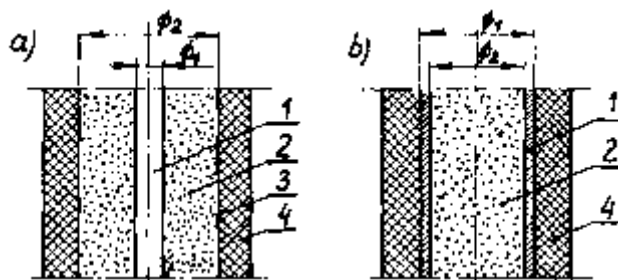
- a) przewodnik z jednorodnego materiału umieścić w rurce osłonowej, przestrzeń między nimi wypełnić sypkimi granulami,
- b) przewodnik jednorodny jest w postaci rurki, której wnętrze wypełniają granulki.

Powyższe rozwiązanie przedstawia rysunek 2.

Złoże sypkich granulek zapewnia dobre mieszanie się przepływającego przez nie czynnika chłodzącego oraz zwiększanie bezwładność cieplną toru prądowego. Tor prądowy jest więc lepiej chłodzony, a więc można przewodzić większe prądy i jest odporniejszy na prądy przeciążeniowe.

W niektórych urządzeniach krioelektrycznych i w stanowiskach laboratoryjnych, gdzie wymagana jest mała odparowalność cieczy kriogenicznej, można stosować takie konstrukcje, ponieważ w dużym stopniu wykorzystują entalpię czynnika chłodzącego. Z prac autora [12 i 26] wynika, że wykorzystanie przewodników ze złożem sypkim do budowy krioprzepustów (zwanych

granulkowymi) jest zachęcające ze względu na możliwość jej optymalizacji, dobre własności przeciążeniowe oraz łatwość konstrukcji.



Rys. 2. Fragmenty torów prądowych krioprzepustów ze złożem sypkich granulek: 1 - tor prądowy, 2 - złożo sypkich granulek, 3 - cienka rurka osłonowa, 4 - izolacja cieplna

Wykorzystanie spiekanych przewodników porowatych

Spiekany przewodnik porowaty jest szczególnie interesujący w budowie krioprzepustów z uwagi na możliwość uzyskiwania w procesie technologicznym odpowiednich parametrów elektrycznych, cieplnych, hydraulicznych oraz wymaganego kształtu.

Produkcja przewodników spiekanych w Polsce jest objęta odpowiednimi normami i w oparciu o istniejące zaplecze techniczne, można produkować przewodniki porowate o odpowiednim kształcie [27].

Krioprzepust z porowatym torem prądowym przedstawiony na rysunku 1 ma tor prądowy o jednakowym przekroju, przepuszczalny dla gazu chłodzącego, który można wykonać metodą spiekania granulek owalnych. Proces technologiczny spiekania toru prądowego powinien zapewnić właściwą i równomierną przewodność cieplną λ , rezystywność ρ oraz przepuszczalność dla gazu chłodzącego. Właściwe opanowanie technologii jest warunkiem osiągnięcia projektowanych parametrów eksploatacyjnych krioprzepustu.

Dla stałego przekroju poprzecznego toru prądowego S można łatwo optymalizować jego długość L (względnie ich iloraz) przy przyjęciu jako kryterium minimalnego dopływu ciepła przez tor prądowy do chłodzącej cieczy kriogenicznej. Badania modelowe wykazały, że dla przewodników porowatych, spiekanych z granulek owalnych o średnicach mniejszych od 1,5 mm, słuszne jest przyjęcie założeń upraszczających obliczenia. Przejmowanie ciepła w przewodniku porowatym jest procesem prawie idealnym, a przewodność cieplna i rezystywność materiału są stałe dla całego przedziału temperaturowego i są równe wartościom dla temperatury reprezentatywnej. Temperatura ta dla chłodzenia parami helu jest z przedziału 25÷50 K a dla chłodzenia parami azotu 160÷200 K.

Można w praktyce posłużyć się wzorami cytowanymi w literaturze [25, 28] i dla danego prądu znamionowego (optymalnego), obliczyć optymalne wymiary toru prądowego krioprzepustu

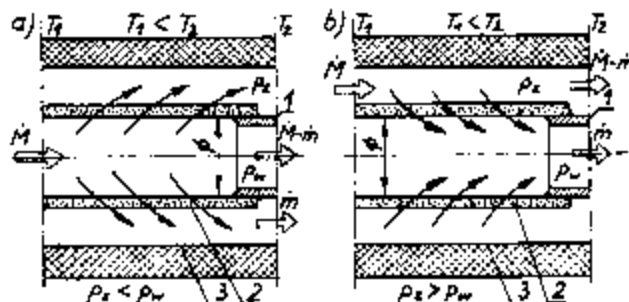
$$\left(\frac{L}{S}\right)_{\text{opt}} = \frac{\dot{m}C_p(T_c - T_z)}{I^2\rho} + 2\frac{\lambda}{C_p} \frac{1 + \frac{C_p(T_c - T_z)}{r}}{\dot{m} + \left[\dot{m}^2 + \frac{4I^2\rho\lambda}{C_p r}\right]^{\frac{1}{2}}}$$

dla których minimalny strumień cieplny, dopływający przez zimny koniec toru prądowego, wynosi:

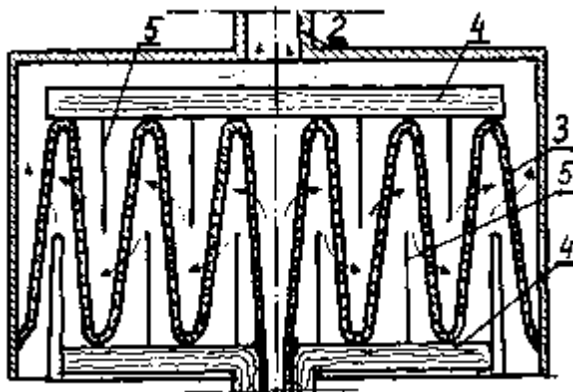
$$q_z = \frac{\dot{m}C_p(T_c - T_z)}{\exp\left(\frac{\dot{m}C_p L}{\lambda S}\right) - 1} + I^2 \rho \left[\frac{\lambda}{\dot{m}C_p} - \frac{\frac{L}{S}}{\exp\left(\frac{\dot{m}C_p L}{\lambda S}\right) - 1} \right]$$

gdzie: $\dot{m}$ - strumień czynnika chłodzącego, kg/s,
 T_c, T_z - temperatura ciepłego i zimnego końca, K,
 C_p - izobaryczna pojemność cieplna czynnika chłodzącego, J/kgK,
 I - natężenie prądu elektrycznego, A,
 r - ciepło właściwe parowania cieczy kriogenicznej, J/kg,
 λ - przewodność cieplna przewodnika, W/mK,
 ρ - rezystywność, Ωm .

W krioprzepustach na prądy powyżej 500 A, przy równoczesnej konieczności wyprowadzenia gazu chłodzącego (np. w kriokablach), szczególnie korzystne jest stosowanie porowatych wstawek w torze prądowym od strony zimnego końca. Ma ona postać rurki szeregowo włączonej w rurowy tor prądowy i całość umieszczona jest wewnątrz rury osłonowej, tworząc dwa kanały (okrągły i pierścieniowy) dla przepływu czynnika chłodzącego. Kierując główny strumień czynnika $\dot{M}$ jednym z kanałów w drugim poprzez wytworzenie podciśnienia wymuszamy przepływ, poprzez ścianki porowatej wstawki, strumienia gazu chłodzącego $\dot{m}$. Schematycznie przedstawia to rysunek 3.



Rys. 3. Odcinki toru prądowego krioprzepustów z porowatą wstawką: a) z wymuszonym strumieniem chłodzenia na zewnątrz toru, b) z wymuszonym strumieniem chłodzenia wewnątrz toru; 1 - tor prądowy, 2 - wstawka porowata, 3 - rura osłonowa, 4 - izolacja cieplna.



Rys. 4. Schemat krioprzepustu z tarczowym torem prądowym: 1 - tor prądowy w obszarze kriotemperatur, 2 - tor prądowy o temperaturze otoczenia, 3 - tor prądowy krioprzepustu w kształcie sfalowanej tarczy, 4 - izolacja cieplna, 5 - przesłony

Wymuszenie przepływu strumienia chłodzącego $\dot{m}$ można dokonać także poprzez zwiększenie ciśnienia strumienia głównego $\dot{M}$, jednak współczynnik przejmowania ciepła przy stosowaniu podciśnienia jest większy dla tej samej różnicy ciśnień.

Doświadczalnie stwierdzono, że wprowadzając w optymalizowany miedziany tor prądowy tulejkę z porowatej miedzi, można obniżyć dopływ ciepła w zimnym końcu o około 40%. Natomiast zastosowanie wstawki z porowatego brązu z wkomponowanym nadprzewodnikiem może obniżyć dopływ ciepła aż o dwa rzędy wielkości. Praktycznie więc dla takich krioprzepustów, wyposażonych w odpowiednią regulację przepływów gazu, problem doprowadzania ciepła przez tor prądowy do obszaru kriotemperatur może być opanowany [29].

Odminną konstrukcję toru prądowego krioprzepustu przedstawia rysunek 4 [14]. Tor prądowy ma postać sfalowanej radialnie tarczy o fałdach koncentrycznych i przekroju wzdłuż osi symetrii zbliżony do linii falistej. Tarcza wykonana jest z przewodnika porowatego, przepuszczalnego dla czynnika chłodzącego. Krag w centrum tarczy stanowi jego zimny koniec, a okrąg zewnętrzny stanowi koniec ciepły. Czynnik chłodzący przepływa radialnie poprzez poszczególne fałdy tarczy. Zaletą tej konstrukcji jest to, że może służyć do przewodzenia dużych prądów (powyżej 1 kA) oraz przy stosunkowo małym oporze przepływu można stosować przewodnik porowaty o wzrastającym przekroju poprzecznym w pobliżu ciepłego końca.

6. Podsumowanie

Porowate tory prądowe posiadają bardzo dobre własności chłodzenia, więc wskazane jest ich stosowanie w doprowadzeniach prądowych pomiędzy ośrodkami o dużych różnicach temperatur.

Zastosowanie przewodników porowatych w torach prądowych krioprzepustów, a także w wymiennikach ciepła wymaga przygotowania odpowiednich danych materiałowych: cieplnych, elektrycznych i hydraulicznych dla dostępnych krajowych materiałów. Powinny one być określone dla próbek o kryteriach podobieństwa takich samych jak dla projektowanych torów prądowych.

Ponieważ w przyszłości należy liczyć się z zastosowaniem nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego, to nie można wykluczyć stosowania chłodzenia kriogenicznego, które może stać się powszechne w technice kosmicznej. Praca układów z ciepłymi nadprzewodnikami będzie jednak bardziej efektywna przy obniżeniu ich temperatury poniżej krytycznej z uwagi na wzrost ich krytycznego pola magnetycznego.

7. Literatura

- [1] Janiczek S., Napęd elektrodynamiczny pojazdów mechanicznych zwłaszcza samolotów i pojazdów kosmicznych i układ urządzenia napędu, Patent PRL Nr 43086 z datą zgłoszenia 10.12.1958 r. do Urzędu Patentowego w Warszawie. Tożsamy z U. S. Department of Commerce, Patent Office, Washington, Ser. No. 852238, for Electrodynamic Drive for Mechanical Vehicles.
- [2] Janiczek S., Homopolarna maszyna prądu stałego dowolnie wysokiego napięcia zwłaszcza generator lub silnik dużej mocy, Patent PRL Nr 44923 zgłoszony 8.12.1959 r. do Urzędu Patentowego w Warszawie.
- [3] Janiczek S., Teoria ruchu ciepła w przewodach doprowadzających prąd do obszarów o temperaturach kriogenicznych (rozprawa doktorska), Zakład Niskich Temperatur Instytutu Fizyki PAN we Wrocławiu 1967.
- [4] Janiczek S., Étud e théorique de la transmission de chaleur par les traversées de courant pour enceinte cryogénique”, Biuletyn PAN 1969, XII, 8, 701-708.
- [5] Janiczek S., Valeur minimum accesible des parties énergétiques causées per les travesées de courant à frès fortes intensités pour enceintes cryogéniques, Biuletyn PAN 1969, XII, 8.
- [6] Janiczek S., Przepusty wprowadzające duże prądy do obszarów kriogenicznych, Referat na I Sympozjum, Zastosowanie niskich temperatur w elektrotechnice, Komitet Elektrotechniki PAN i Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, Ustronie k. Kępna 26-27 kwietnia 1968 (materiały powielane).
- [7] Skowroński J., Perspektywy wykorzystania techniki najniższych temperatur w elektrotechnice, Przegląd Elektrotechniczny 1968, 1, 3.
- [8] Janiczek S., Podstawy krioelktrotechniki, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1993.

- [9] Bińczyk A., Gędek W., Sękowski L., Uchyla E., Ćwiczenia laboratoryjne z krioelektrotechniki przygotowane w 1977 r., wydane przez Zakłady Graficzne Politechniki Śląskiej w Gliwicach 1982.
- [10] S. Janiczek, E. Uchyla., Osiągnięcia naukowe i dydaktyczne Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej w krioelektrotechnice, Środkowoeuropejska IV Konferencja Naukowo-Techniczna Metody i Systemy Komputerowe w Automatyce i Elektrotechnice (MSKAE'2001), 17-18 września 2001 Częstochowa – Poraj, Zeszyty naukowe Politechniki Częstochowskiej 153.
- [11] Uchyla E., Krioprzepust, P-229550, z dnia 4.02.1981 r., Patent PRL 132872 z dn. 11.09.84.
- [12] Uchyla E., Krioprzepust, P-229770 z dnia 18.02.1981 r., Patent PRL 132876 z dn. 11.01.85
- [13] Uchyla E., Tor prądowy zwłaszcza do krioprzepustów, P-234162 z dnia 8.12.1981 r.
- [14] Gędek W., Uchyla E., Tor prądowy, P-256305 z dnia 15.11.1985 r.
- [15] Sękowski L., Uchyla E., Rezystancja zestyku punktowego w ciekłym azocie, Zeszyty Naukowe Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Częstochowskiej 1982. (zgłoszono w 1978 r.)
- [16] Uchyla E., Rezystancja zestyku punktowego w ciekłym azocie, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, 12-13.05.1980 Bydgoszcz, Materiały Konferencyjne SEP Bydgoszcz 1980, „Kontaktronika 80”.
- [17] Knop I., Uchyla E., Badanie rezystancji wybranych połączeń torów prądowych w ciekłym azocie, XIII Ogólnopolskie Sympozjum Kriogeniki, Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN Wrocław, 1-3.09.1986.
- [18] Prace zbiorowe pod kierownictwem Stefana Janiczeka: Krioprzepust dla kriokabla, raport wewnętrzny za lata 1975, 1976, 1977; Krioprzepust dla kriokabla-konstrukcja i wykonanie, raport wewnętrzny za 1978, Krioprzepust dla kriokabla nadprzewodzącego, raport wewnętrzny za lata 1979 i 1980; Krioprzepusty helowe urządzeń krioelektroenergetycznych, raport wewnętrzny za lata 1981, 1982, 1983, 1984, 1985.
- [19] Bińczyk A., Gędek W., Podstawy obliczania krioprzepustów, Zeszyty Naukowe Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Częstochowskiej 1982 r. (zgłoszono w 1977 r.)
- [20] Janiczek S., Gędek W., Krioprzepusty na wielkie prądy, stan obecny światowy, prognozy, propozycje konstrukcyjne, Prace Naukowe Instytutu Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej 1980, Nr 19, Studia i Materiały Nr 8.
- [21] Gędek W., Obciążalność krioprzepustów miedzianych chłodzonych autonomicznie ciekłym azotem w warunkach ustalonych (rozprawa doktorska), Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, Gliwice 1983.
- [22] Uchyla E., Obciążalność prądowa krioprzepustów o porowatej strukturze toru prądowego, chłodzonego parami ciekłego azotu (opracowanie wewnętrzne), Referat wygłoszony w Politechnice Warszawskiej 15.03.83 r. z okazji otwarcia przewodu doktorskiego.
- [23] W. Gędek, Przeciężalność krioprzepustów izolowanych (materiały konferencyjne), Kriotechnika w elektroenergetyce, Bielsko-Biała, kwiecień 1983.
- [24] Uchyla E., Wykorzystanie przewodników porowatych do budowy torów prądowych krioprzepustów, Środkowoeuropejska IV Konferencja Naukowo-Techniczna: Metody i Systemy Komputerowe w Automatyce i Elektrotechnice (MSKAE'2001), 17-18 września 2001 Częstochowa – Poraj, Zeszyty naukowe Politechniki Częstochowskiej 153.
- [25] Glebow I.A., Szachtarin W.N., Antonow J.F., Problema wvodu toka w swiechprzewodnikowyje ustrojstwa, Leningrad, NAUKA 1985.
- [26] Uchyla E., Krioprzepust z granulkowym torem prądowym, Materiały Konferencyjne Krioelektrotechnika w Elektroenergetyce, Bielsko-Biała 1983.
- [27] Pilarski W., Półwyroby i wyroby z metali nieżelaznych, Katalog SWW 053, 054, T. I, WEMA - Warszawa 1982.
- [28] Bujanow J.L., Fradkow A.B., Szebalin I.J., Tokowyje wwody dla kriogennych ustrojstw, Pribory i tiechn. eksp. nr. 4 rok 1974.
- [29] Uchyla E., Własności krioprzepustów o torach prądowych z porowatego brązu, XIII Ogólnokrajowe Seminarium Kriogeniki, Wrocław 1-3.09.1986.

Streszczenie

W latach 1975-1985 Zespół Krioelektrotechniki w Instytucie Elektrotechniki prowadził badania nad konstrukcją doprowadzeń prądowych do obszarów kriogenicznych w krajowym problemie węzłowym: 05.13. pt. „Zastosowanie krioelektrotechniki w gospodarce narodowej”. Stworzony zespół ma własny dorobek wynalazczy i prace naukowo-badawcze istotne dla rozwoju kioelektrotechniki. Wspecjalizował się w projektowaniu optymalnych konstrukcji krioprzepustów niezbędnych do zasilania wszelkich urządzeń krioelektrycznych. Autor opatentował konstrukcje torów prądowych, chłodzonych parami cieczy kriogenicznej, przepływającej przez struktury porowate torów, zapewniające efektywne chłodzenie. Zastosowany brąz cynowo--fosforowy B101 ma w szerokim zakresie temperatur stałą rezystywność i spełnia prawo Wiedemanna Franza Lorentza, co jest istotne dla opracowania optymalnej konstrukcji. Możliwe jest zaprojektowanie toru prądowego doprowadzającego prąd elektryczny, a nie doprowadzający ciepła ze środowiska naturalnego do obszaru kriogenicznego.