

NADPRZEWODNIKOWE OGRANICZNIKI PRĄDU

Monografia powstała w wyniku realizacji Projektu Badawczego KBN PB 1704/T10/2001/21w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej w latach 2001-2002 i została sfinansowana ze środków Projektu

Autorzy:

*Tadeusz Janowski
Henryka Danuta Stryczewska
Sławomir Kozak
Henryk Malinowski
Grzegorz Wojtasiewicz
Paweł Surdacki
Beata Kondratowicz-Kucewicz
Janusz Kozak*

Lublin 2002

ISBN: 83-89373-04-1221120-50.00

**Wydawnictwo Drukarnia LIBER
ul. Szczerbowskiego 6
20-012 Lublin**

1. WPROWADZENIE	5
2. MATERIAŁY NADPRZEWODNIKOWE	8
2.1. Nadprzewodnictwo i materiały nadprzewodnikowe	8
2.2. Nadprzewodniki stosowane w praktyce	16
2.2.1. Nadprzewodniki niskotemperaturowe	16
2.2.2. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe	20
2.3. Materiały nadprzewodnikowe stosowane do budowy ograniczników prądu	24
3. BUDOWA I DZIAŁANIE NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU	26
3.1. Zasada pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu	26
3.2. Układy chłodzenia nadprzewodnikowych ograniczników prądu	33
3.3. Klasyfikacja nadprzewodnikowych ograniczników prądu	34
3.3.1. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu rezystancyjnego.	35
3.3.2. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego	37
a) Ograniczniki indukcyjne z zamkniętym rdzeniem magnetycznym	39
b) Ograniczniki indukcyjne z otwartym rdzeniem magnetycznym	42
3.3.3. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego z regulowanym poziomem prądu wyzwalania	44
3.3.4. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego z dwoma obwodami magnetycznymi i wspólnym uzwojeniem nadprzewodnikowym	48
3.3.5. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu hybrydowego.	50
3.3.6. Ograniczniki trójfazowe.	51
a) Ograniczniki indukcyjne z zamkniętym rdzeniem magnetycznym	51
b) Trójfazowy ogranicznik prądu z jednym uzwojeniem nadprzewodnikowym	53
c) Trójfazowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z mostkiem półprzewodnikowym	54
3.4. Ogranicznik z uzwojeniem nadprzewodnikowym w układzie mostka tyrystorowego	55
4. OGRANICZNIKI REZYSTANCYJNE	57
4.1. Wprowadzenie	57
4.2. Materiały nadprzewodnikowe wykorzystywane przy konstrukcji ograniczników prądowych typu rezystancyjnego	58
4.2.1. Polikrystaliczne materiały nadprzewodnikowe	62
4.2.2. Materiały stopowe	64
4.2.3. Materiały cienkowarstwowe	64
4.3. Materiały konstrukcyjne nadprzewodnikowych ograniczników prądowych	64
4.3.1. Izolacja elektryczna w nadprzewodnikowych ogranicznikach	64
4.4. Straty energetyczne nadprzewodnikowego ogranicznika w obwodzie prądu zmiennego	65
4.5. Zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego	70
4.6. Rola bocznika w nadprzewodnikowych ogranicznikach rezystancyjnych	70
4.7. Przykład konstrukcji nadprzewodnikowego ogranicznika prądu	76
4.8. Perspektywy rozwoju technologii budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu	80

5. OGRANICZNIKI INDUKCYJNE	83
5.1. Wprowadzenie	83
5.2. Ograniczniki prądu z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi	83
5.2.1. Ograniczniki prądu z cylindrami nadprzewodnikowymi 625 A (77K)	83
5.2.2. Ograniczniki prądu z cylindrami nadprzewodnikowymi 112 A (77K)	88
5.2.3. Podsumowanie wyników badań eksperymentalnych ograniczników z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi	94
5.3. Ograniczniki prądu z otwartymi rdzeniami magnetycznymi	94
5.3.1. Ograniczniki prądu z cylindrami nadprzewodnikowymi 112 A (77K)	94
5.3.2. Ogranicznik prądu z cylindrem nadprzewodnikowym 1210 A (77K)	99
5.3.3. Podsumowanie wyników badań eksperymentalnych ograniczników z otwartymi rdzeniami magnetycznymi	102
5.4. Polowo-obwodowy model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego z cylindrem Bi-2223 625 A (77K) i zamkniętym rdzeniem magnetycznym	102
5.4.1. Wpływ parametrów konstrukcyjnych na napięcie na ograniczniku	105
5.5. Podsumowanie wyników badań numerycznych i eksperymentalnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego	109
6. ZASTOSOWANIA NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU	111
6.1. Wprowadzenie	111
6.2. Warunki współpracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu z siecią elektroenergetyczną	111
6.3. Lokalizacja nadprzewodnikowych ograniczników prądu w układach energetycznych	111
6.4. Techniczne i ekonomiczne korzyści zastosowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcia w systemach energetycznych	114
6.5. Przykłady projektów i zastosowań nadprzewodnikowych ograniczników prądu w sieciach elektroenergetycznych	116
6.6. Perspektywy zastosowania ograniczników nadprzewodnikowych w systemach energetycznych	117
7. LITERATURA	119
CONTENTS	124

1. WPROWADZENIE

Udoskonalenie technologii wytwarzania nadprzewodników nisko-temperaturowych II rodzaju i nadprzewodników wysokotemperaturowych o dobrych parametrach w silnych polach magnetycznych, stworzyło warunki do wykorzystania ich w elektroenergetyce.

W urządzeniach silnoprządowych stosowane są od lat sześćdziesiątych nadprzewodniki II rodzaju, takie jak związki międzymetaliczne Nb_3Sn , Nb_3Ge i stopy Nb-Ti, Nb-Zr, których temperatura krytyczna nie przekracza 25 K, umownej granicy nadprzewodnictwa niskotemperaturowego. Temperatury takie zapewnia chłodzenie ciekłym helem o temperaturze wrzenia 4,2 K lub gazowym chłodzonym kontaktowo. W szczególności stop Nb-Ti i związek międzymetaliczny Nb_3Sn są podstawowymi materiałami do wytwarzania przewodów w postaci wiązek włókien nadprzewodnikowych o średnicach kilku mikrometrów, umieszczonych w matrycy miedzianej lub aluminiowej pełniącej rolę stabilizatora. Włókna w wiązce są dodatkowo skręcane w celu zmniejszenia strat sprzężenia od pola zewnętrznego i własnego. Przewody te mogą pracować w silnych polach magnetycznych dochodzących do 20 T, przy uzyskiwanych gęstościach prądu w materiale nadprzewodnika rzędu 10^9 A/m².

Wraz z rozwojem technologii wytwarzania nadprzewodników wysokotemperaturowych, których temperatura krytyczna przekracza temperaturę wrzenia azotu (77 K), stosowanego do ich chłodzenia, powstała możliwość szerszego wykorzystania nadprzewodników, dzięki radykalnemu zmniejszeniu kosztów układu chłodzenia. Obecnie najbardziej realne do zastosowań silnoprządowych staje się wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych Bi-2223 ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$), YBCO ($YBa_2Cu_3O_x$) oraz niedawno odkrytego dwuborku magnezu MgB_2 .

Szczególne właściwości nadprzewodników umożliwiają budowę urządzeń elektrycznych o parametrach nieosiągalnych przy stosowaniu materiałów konwencjonalnych. Nadprzewodniki wykazują całkowity zanik rezystywności jedynie w warunkach, gdy ich parametry, tj. temperatura, gęstość prądu i gęstość strumienia magnetycznego nie przekraczają pewnych wartości nazywanych krytycznymi. Przekroczenie wartości krytycznej któregośkolwiek parametru powoduje gwałtowne przejście ze stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego. Właściwość gwałtownego (skokowego) wzrostu rezystancji elementu nadprzewodnikowego przy przekroczeniu jego wartości krytycznej prądu umożliwia budowę ograniczników prądów zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych.

Zwarcia awaryjne w sieciach elektroenergetycznych są dużym zagrożeniem dla transformatorów, generatorów, szyn zbiorczych i linii przesyłowych oraz zmniejszają pewność dostarczania energii odbiorcom. Ograniczanie prądów zwarcia za pomocą dławików i odpowiednio dużej reaktancji transformatorów znacznie wpływa na wzrost kosztów budowy i eksploatacji systemu elektroenergetycznego, a więc i na cenę energii elektrycznej.

O dynamicznych skutkach sił powstających w urządzeniach elektroenergetycznych decyduje największa wartość chwilowa prądu zwarciovego (prąd dynamiczny) przepływającego przez nie podczas zwarcia. Maksymalna wartość sił mechanicznych od prądu zwarcia występuje zwykle w czasie, gdy prąd osiąga pierwsze maksimum po zwarcu tj. 0,005 sekundy przy 50 Hz. Jeżeli przerwiemy obwód zwarciovu lub powiększymy jego impedancję bardzo szybko tj. w czasie znacznie krótszym od 0,005 sekundy to siła dynamiczna nie osiągnie swojego pierwszego maksimum i nie wytworzy nadmiernych naprężeń i uszkodzeń urządzeń elektromagnetycznych w zwartym obwodzie.

Tak szybkie dla dużych prądów działanie zapewniają konwencjonalne ograniczniki prądu o dwóch równoległych torach prądowych. Tor na prąd roboczy wyposażony w mikro-ładunek wybuchowy, którego zadziałaniem steruje urządzenie mierzące szybkość narastania prądu (di/dt), wysyła sygnał detonacji ładunku w obwodzie roboczym. Zgaszenie łuku zapewnia bocznikujący tor roboczy bezpiecznik; czas przerywania obwodu nie przekracza 1 ms. Wadą tych ograniczników jest konieczność wymiany wkładek po każdorazowym zadziałaniu oraz duża zawodność (błędne zadziałanie) szczególnie, gdy obciążenie jest charakteru pojemnościowego. Poprawa ich niezawodności jest skomplikowana i kosztowna.

Szybkie i niezawodne działanie mogą zapewnić nadprzewodnikowe ograniczniki prądów, bowiem czas przejścia nadprzewodnika ze stany nadprzewodzącego do rezystywnego wynosi kilkadziesiąt mikrosekund, a ich powrót do pracy po zadziałaniu jest natychmiastowy i nie wymaga wykonywania jakichkolwiek czynności.

Idea budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądowych powstała ponad 20 lat temu, jednak warunki do jej realizacji powstały przed kilku laty, kiedy to wytworzono wysokotemperaturowe elementy nadprzewodnikowe oraz kontaktowe układy chłodzenia (z ang.: cryocooler). W kilku laboratoriach na świecie prowadzone są intensywne badania i powstają pierwsze oferty dostawy nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

Badania nad zastosowaniem nadprzewodników, w szczególności do procesów separacji magnetycznej, są prowadzone od kilkunastu lat w Lublinie we współpracy Pracowni Krioelektromagnesów Zakładu Badań Podstawowych Elektrotechniki IEL w Warszawie i Instytutem Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej. Stanowisko laboratoryjne wyposażone

w chłodziarkę kontaktową SRDK - 408 firmy SUMITOMO umożliwia prowadzenie badań w temperaturach od 4 do 300 kelwinów.

Istnieją dwa zasadnicze rodzaje rozwiązań nadprzewodnikowych ograniczników prądu: rezystancyjne i indukcyjne. Ograniczniki rezystancyjne są proste w swej konstrukcji, jednak wymagają doprowadzenia prądu roboczego do elementu nadprzewodnikowego za pomocą przepustów prądowych. Bezpośredni dostęp do gałęzi z elementem nadprzewodnikowym ułatwia badania eksperymentalne stanów przejściowych ogranicznika

W ogranicznikach indukcyjnych elementem nadprzewodnikowym jest pierścień stanowiący zwarte uzwojenie wtórne transformatora o konwencjonalnym, zaprojektowanym na prąd znamionowy sieci, uzwojeniu pierwotnym. W uzwojeniu pierwotnym generują się pewne straty mocy, ale układ nie wymaga przepustów prądowych i koszty chłodzenia są niskie.

Budowa i badanie modeli fizycznych tych dwóch rodzajów nadprzewodnikowych ograniczników prądu stały się podstawą realizacji głównego celu projektu, którym było opracowanie teoretycznych podstaw działania, budowy i projektowania tych urządzeń, co zawarte jest w raporcie i opracowanej monografii.

2. MATERIAŁY NADPRZEWODNIKOWE

2.1. *Nadprzewodnictwo i materiały nadprzewodnikowe*

Nadprzewodnictwo – połączenie pewnych właściwości magnetycznych i elektrycznych objawiające się występowaniem zjawiska zaniku rezystywności elektrycznej w odpowiednio niskiej temperaturze, jest obserwowane w niektórych metalach, ich stopach oraz w pewnych spiekach ceramicznych. Materiał, w którym zachodzi zjawisko nadprzewodnictwa, nazywany jest nadprzewodnikiem.



Zjawisko nadprzewodnictwa odkrył Heike Kamerlingh - Onnes (Rys. 2.1.) w 1911 roku w holenderskim Uniwersytecie w Leidzie w trakcie prac nad skraplaniem helu i badań właściwości metali w niskich temperaturach. Zaobserwował on zanik rezystancji rtęci w temperaturze poniżej 4,2 K.

Rys. 2.1. Heike Kamerlingh-Onnes [1]

Zjawisko nadprzewodnictwa w metalicznych nadprzewodnikach zostało wyjaśnione w 1957 roku przez L.N.Cooper'a, J.Bardeen'a i J.Schrieffer'a (Rys. 2.2.).



Rys. 2.2. John Bardeen, Leon N.Cooper i John R.Schrieffer [1]

Zaproponowali oni mikroskopową teorię nadprzewodnictwa, nazwaną teorią BCS. Głównym zagadnieniem rozważanym w tej teorii jest oddziaływanie gazu elektronów przewodnictwa z drganiami sieci krystalicznej w metalu. Teoria

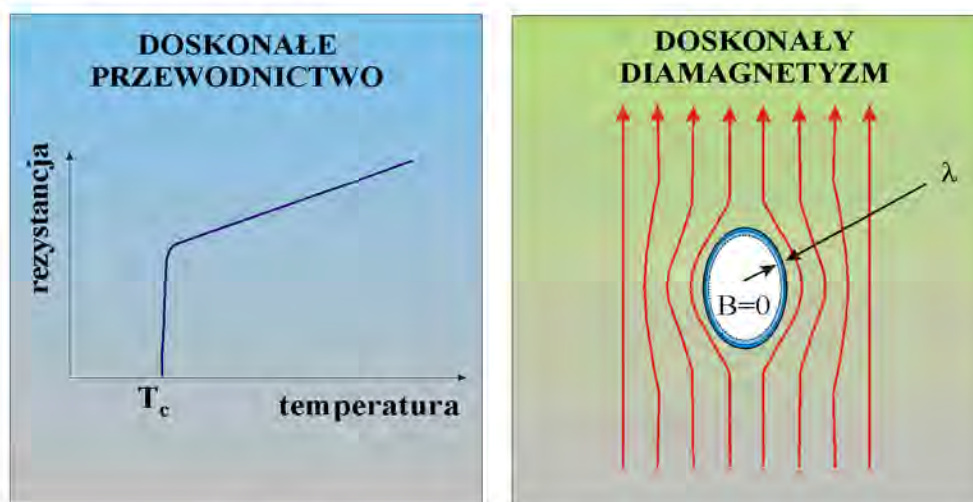
ta stanowi podstawę do zrozumienia zjawiska nadprzewodnictwa występującego w metalach i jest punktem wyjścia do opisanie nadprzewodnictwa w ceramikach nadprzewodników wysokotemperaturowych.



Rys. 2.3. Brian D. Josephson [1]

W 1962 roku fizyk brytyjski Brian D. Josephson (Rys. 2.3.) opisał zjawiska kwantowe zachodzące w nadprzewodnikach podczas tunelowania prądu przez cienką warstwę izolatora. Zjawisko to zostało potwierdzone eksperymentalnie i obecnie nosi nazwę złącza (efektu) Josephson'a. Technologia złącz Josephson'a stanowi podstawę do rozwoju elektroniki opartej na elementach nadprzewodnikowych.

Brak strat energii przy przepływie prądu elektrycznego w nadprzewodnikach umożliwia ich praktyczne zastosowania. Nadprzewodnik jest nie tylko doskonałym przewodnikiem (jego rezystancja jest równa zero), ale także doskonałym diamagnetykiem, ponieważ indukcja magnetyczna w nim jest także równa zero (efekt Meissnera) Rys. 2.1.

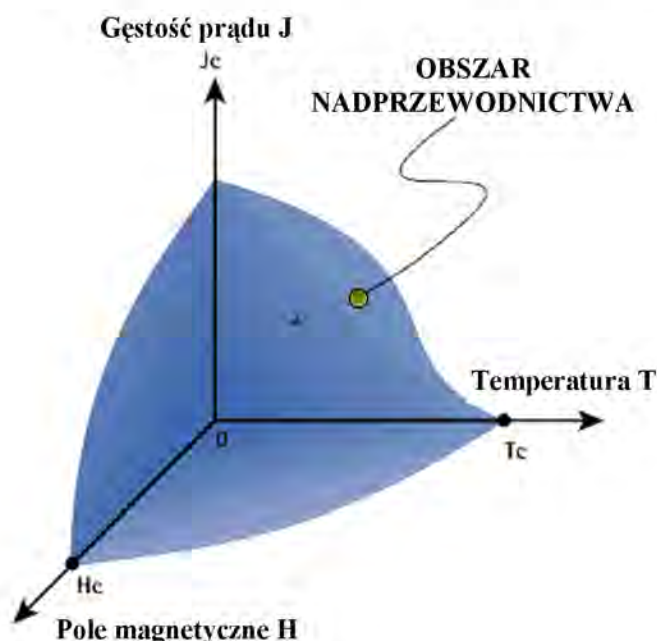


Rys. 2.4. Podstawowe właściwości nadprzewodników

Nadprzewodnictwo obserwowane jest w niskich temperaturach, niższych od pewnej, charakterystycznej dla danego materiału, tzw. temperatury krytycznej T_c . Nadprzewodnik traci właściwości nadprzewodzące w dostatecznie silnym polu

magnetycznym (o wartości powyżej pola krytycznego H_c), nawet, gdy materiał znajduje się w temperaturze mniejszej od krytycznej. Jeżeli gęstość prądu J nadprzewodnika będzie większa od pewnej wartości nazwanej gęstością krytyczną J_c to również wtedy utraci on właściwości nadprzewodzące pomimo zachowania temperatury i natężenia pola magnetycznego poniżej wartości krytycznych.

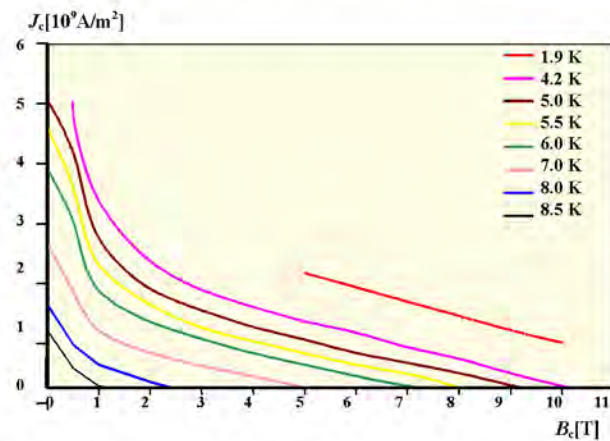
Właściwości te zilustrowano na Rys. 2.5., który przedstawia powierzchnię krytyczną wyznaczaną przez wartości trzech parametrów: gęstości prądu J , natężenia pola magnetycznego H oraz temperatury T . Powierzchnia J - H - T oddziela dwa stany materiału nadprzewodnikowego: stan przewodnictwa i stan nadprzewodnictwa.



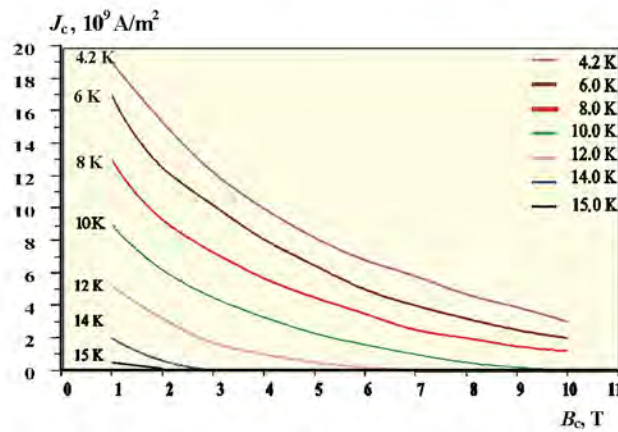
Rys. 2.5. Powierzchnia krytyczna nadprzewodnika wyznaczona przez trzy parametry: gęstość prądu, natężenie pola magnetycznego i temperaturę [12]

Stan nadprzewodnictwa charakteryzowany jest więc funkcją trzech parametrów, ale ze względów praktycznych stosuje się charakterystyki zależne od dwóch parametrów krytycznych: pola magnetycznego i gęstości prądu w określonej temperaturze nadprzewodnika. Takie charakterystyki nazywane są charakterystykami krytycznymi nadprzewodnika. Przykładowe charakterystyki nadprzewodników NbTi i Nb₃Sn przedstawiają Rys. 2.6, Rys. 2.7.

Pierwotnie stan nadprzewodzący obserwowano w temperaturze od kilku do kilkunastu kelwinów (temperatury helowe) (Rys. 2.9)



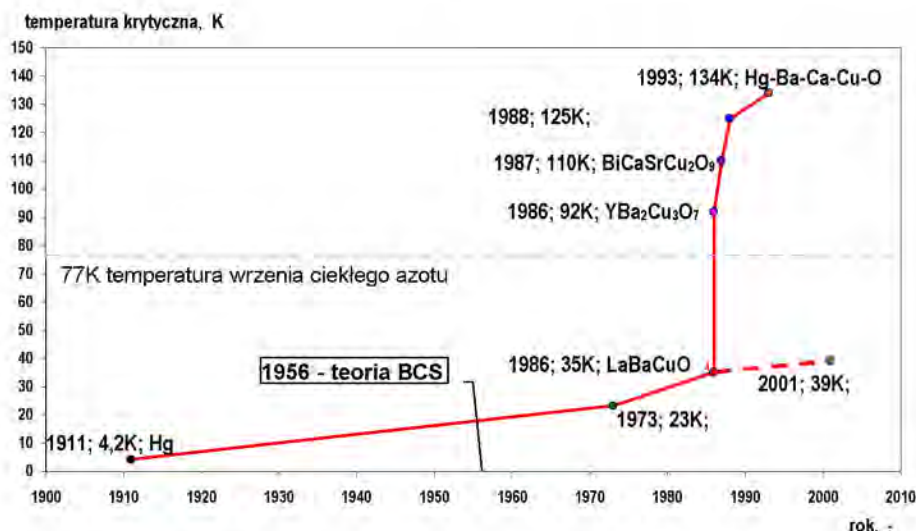
Rys. 2.6. Charakterystyka krytyczna nadprzewodnika NbTi [2]

Rys. 2.7. Charakterystyka krytyczna nadprzewodnika Nb₃Sn [2]

W 1986 J.G. Bednorz, K.A. Müller, (Rys. 2.6.), odkryli tzw. nadprzewodniki wysokotemperaturowe, będące materiałami ceramicznymi, których temperatury krytyczne T_c mogą być wyższe od dopuszczalnej wg. teorii BCS ($T_c < 26 \text{ K}$), a nawet wyższe od temperatury wrzenia ciekłego azotu (77 K).



Rys. 2.8. Alex Müller i Georg Bednorz [1]



Rys. 2.9. Historia odkryć materiałów wykazujących nadprzewodnictwo

W zależności od sposobu, w jaki materiał wykazujący nadprzewodnictwo przechodzi ze stanu nadprzewodnictwa do stanu rezystywnego można zdefiniować dwie grupy materiałów: nadprzewodniki I i II rodzaju. Materiały, w których dokonuje się całkowite przejście do stanu rezystywnego po przekroczeniu powierzchni krytycznej (Rys. 2.5) i całkowite wypychanie strumienia magnetycznego aż do utraty nadprzewodnictwa, są nazywane nadprzewodnikami I rodzaju. Większość pierwiastków metalicznych (z wyjątkiem niobu, wanadu i technetu) oraz ich stopy wykazują nadprzewodnictwo I rodzaju. Zmiany namagnesowania nadprzewodnika I rodzaju w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego przedstawia Rys. 2.10.



Rys. 2.10. Zmiany namagnesowania nadprzewodnika I rodzaju w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego

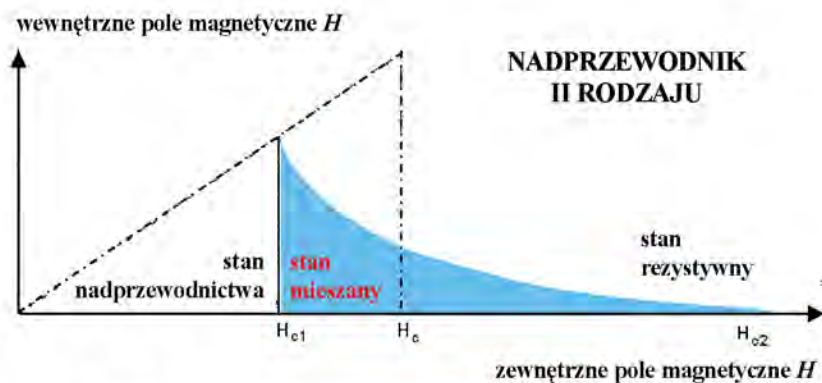
Wartości krytyczne temperatury dla wybranych pierwiastków metalicznych wykazujących nadprzewodnictwo I rodzaju przedstawiono w Tab. 2.1

Tab. 2.1. Wartości krytyczne temperatury dla wybranych metali wykazujących nadprzewodnictwo I-rodzaju [1]

Pierwiastek	Temperatura krytyczna T_k [K]
Olów (Pb)	7,196
Lantan (La)	4,88
Tantal (Ta)	4,47
Rtęć (Hg)	4,15
Cyna (Sn)	3,72
Ind (In)	3,41
Tal (Tl)	2,38
Ren(Re)	1,697
Protaktyn (Pa)	1,40
Tor (Th)	1,38
Glin (Al)	1,175
Gal (Ga)	1,083
Molibden (Mo)	0,915
Cynk (Zn)	0,85
Osm (Os)	0,66
Cyrkon (Zr)	0,61
Ameryk (Am)	0,60
Kadm (Cd)	0,517
Ruten (Ru)	0,49
Tytan (Ti)	0,40
Uran (U)	0,20
Hafn (Hf)	0,128
Iryd (Ir)	0,1125
Beryl (Be)	0,026
Wolfram (W)	0,0154
Platyna (Pt)	0,0019
Rod (Rh)	0,000325

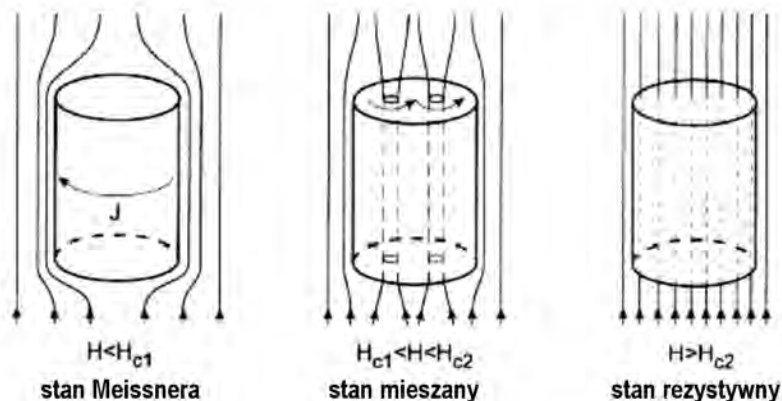
W 1958r. odkryto nowy rodzaj nadprzewodników nazwanych nadprzewodnikami II rodzaju. Różnią się one od poznanych wcześniej zachowaniem w polu magnetycznym. Przejście tych materiałów ze stanu nadprzewodnictwa do stanu rezystywnego nie jest całkowite, gdyż obszar nadprzewodnictwa i rezystywny nie są rozgraniczone powierzchnią (Rys. 2.5.), ale strefą między dwiema powierzchniami ekstremalnymi. Charakterystyczne dla tych nadprzewodników są dwie wartości pola krytycznego: dolna H_{c1} i górna H_{c2} . Strumień magnetyczny jest wypychany całkowicie z nadprzewodnika tylko poniżej pola krytycznego H_{c1} i wówczas

nadprzewodnik II rodzaju wykazuje własności nadprzewodnika I rodzaju poniżej pola H_c . Powyżej wartości pola H_{c1} strumień częściowo wnika do materiału aż do osiągnięcia górnego pola krytycznego H_{c2} . Powyżej tej wartości materiał nie wykazuje nadprzewodnictwa (Rys. 2.11.)



Rys. 2.11. Zmiany namagnesowania nadprzewodnika II rodzaju w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego

Pomiędzy dolnym i górnym polem krytycznym nadprzewodnik znajduje się w stanie mieszanym i strumień magnetyczny może częściowo wnikać do materiału (Rys. 2.12).



Rys. 2.12. Wnikanie pola magnetycznego do nadprzewodników II rodzaju [3]

Dzięki tej właściwości może on nawet w silnych polach magnetycznych pozostawać w stanie nadprzewodzącym. Właściwości nadprzewodników II rodzaju wykazują metale: niob i wanad, niektóre stopy np. Nb-Zr, Nb-Ti oraz związki międzymetaliczne takie jak Nb_3Sn i Nb_3Ge .

Do grupy nadprzewodników II rodzaju zalicza się także odkryte w latach

osiemdziesiątych związku o strukturze typu perowskitu oraz cała grupa nadprzewodników wysokotemperaturowych. Wartości krytyczne temperatury dla wybranych nadprzewodników II rodzaju przedstawiono w Tab. 2.2.

Tab. 2.2. Wartości krytyczne temperatury dla wybranych nadprzewodników II rodzaju [1]

Nadprzewodnik	Temperatura krytyczna T_c [K]	Nadprzewodnik	Temperatura krytyczna T_c [K]
Hg _{0.8} Tl _{0.2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8.33}	138	(Eu,Ce) ₂ (Ba,Eu) ₂ Cu ₃ O ₁₀	43
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	133-135	La _{1.85} Sr _{0.15} CuO ₄	40
HgBa ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₁₀	125-126	SrNdCuO	40
HgBa ₂ Ca _{1-x} Sr _x Cu ₂ O ₆	123-125	(La,Ba) ₂ CuO ₄	35-38
HgBa ₂ CuO ₄	94-98	(Nd,Sr,Ce) ₂ CuO ₄	35
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	127-128	Pb ₂ (Sr,La) ₂ Cu ₂ O ₆	32
Tl _{1.6} Hg _{0.4} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	126	La _{1.85} Ba _{1.15} CuO ₄	30
TlBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉	123	MgB ₂	39
Tl _{0.5} Pb _{0.5} Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉	118-120	Ba _{0.6} Bi _{0.4} O ₃	30
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₆	118	Nb ₃ Ge	23.2
TlBa ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₁₁	112	Nb ₃ Si	19
TlBa ₂ CaCu ₂ O ₇	103	Nb ₃ Sn	18.1
Tl ₂ Ba ₂ CuO ₆	95	Nb ₃ Al	18
Bi _{1.6} Pb _{0.6} Sr ₂ Ca ₂ Sb _{0.1} Cu ₃ O _y	115	V ₃ Si	17.1
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (Bi2223)	110	Ta ₃ Pb	17
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₉ (Bi2212)	110	V ₃ Ga	16.8
Bi ₂ Sr ₂ Ca _{0.8} Y _{0.2} Cu ₂ O ₈	95-96	Nb ₃ Ga	14.5
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	91-92	V ₃ In	13.9
Ca _{1-x} Sr _x CuO ₂	110	PuCoGa ₅	18.5
TmBa ₂ Cu ₃ O ₇	90-101	Nb _{0.6} Ti _{0.4}	9.8
GdBa ₂ Cu ₃ O ₇	94	MgCNi ₃	8
YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (YBCO)	93	Nb	9.25
Y ₂ Ba ₄ Cu ₇ O ₁₅	93	Tc	7.80
Yb _{0.9} Ca _{0.1} Ba _{1.8} Sr _{0.2} Cu ₄ O ₈	86	V	5.40
YbBa _{1.6} Sr _{0.4} Cu ₄ O ₈	78	RuSr ₂ (Gd,Eu,Sm)Cu ₂ O ₈	58
(Ba,Sr)CuO ₂	90	ErNi ₂ B ₂ C	10.5
La ₂ Ba ₂ CaCu ₅ O ₇	79	YbPd ₂ Sn	2.5
(Sr,Ca) ₅ Cu ₄ O ₁₀	70	UGe ₂	1
Pb ₂ Sr ₂ YCu ₃ O ₈	70	URhGe ₂	1
GaSr ₂ (Y, Ca)Cu ₂ O ₇	70	ZrZn ₂	1
(La,Sr,Ca) ₃ Cu ₂ O ₆	58	Sr _{0.8} WO ₃	2-4
La ₂ CaCu ₂ O ₆	45	Tl _{1.30} WO ₃	2.0-2.14
		Rb _{0.27-0.29} WO ₃	1.98

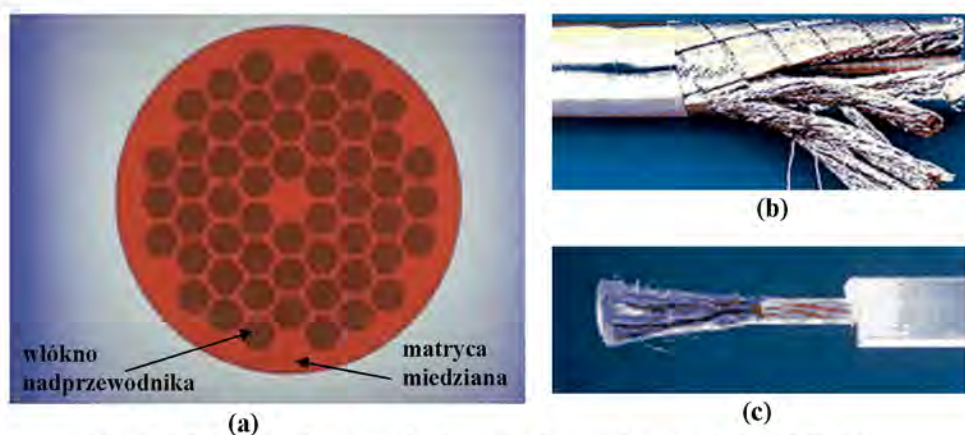
2.2. Nadprzewodniki stosowane w praktyce

Obecnie ze względu na coraz szerzej stosowane nadprzewodniki ceramiczne wszystkie materiały wykazujące własności nadprzewodzące dzieli się na dwie grupy:

- **materiały niskotemperaturowe (konwencjonalne) LTS** – wykazujące nadprzewodnictwo w bardzo niskich temperaturach i chłodzonych ciekłym helem. Wcześniej omówiony został podział tych materiałów na nadprzewodniki I (pierwiastki metaliczne) i II rodzaju (stopy i związki międzymetaliczne).
- **materiały wysokotemperaturowe HTS** – wykazujące właściwości nadprzewodzące w wyższych temperaturach. Są to wymienione wcześniej kompozyty ceramiczne.

2.2.1. Nadprzewodniki niskotemperaturowe

Parametry krytyczne nadprzewodników I rodzaju mają małe wartości, wobec czego nie są one stosowane w urządzeniach energetycznych. Natomiast znajdują zastosowania w bardzo czułych przyrządach pomiarowych słabych pól magnetycznych i napięć (rzędu 10^{-7} V), takich jak nadprzewodnikowe interferometry kwantowe, kriotrony i wyłączniki elektromagnesów nadprzewodnikowych.



Rys. 2.13. Przykładowy przekrój przewodu z nadprzewodnika NbTi (a), fragment przewodu z widocznymi włóknami nadprzewodnika (b) (c) [4]

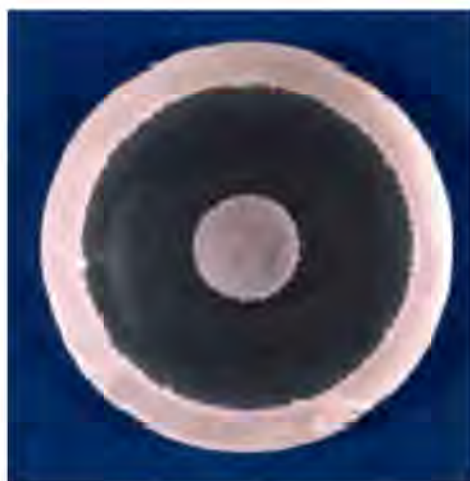
Nadprzewodniki II rodzaju są wykorzystywane przede wszystkim do wytwarzania przewodów nadprzewodnikowych, do zastosowań w elektromagnesach nadprzewodnikowych, w kriokablach oraz kriogenicznych maszynach wirujących. Najczęściej stosowane są stop - NbTi oraz związek międzymetaliczny grupy A15 - Nb₃Sn. Najwyższe wartości parametrów krytycznych osiągane są w związkach międzymetalicznych.

Ze względu na konieczność minimalizacji strat cieplnych oraz stabilną pracę przewody nadprzewodnikowe mają złożoną budowę. Składają się one z wiązek włókien nadprzewodnikowych o średnicach od ułamka do kilku mikrometrów. Włókna są umieszczone w stabilizatorze zwanym matrycą. Materiały stosowane na matrycę to: Cu, CuNi, CuSn, lub Al. Rolą matrycy jest poprawa właściwości mechanicznych i elektrycznych oraz zwiększenie pojemności cieplnej całego przewodu.

Włókna w wiązce są skręcane i transponowane w celu zmniejszenia strat od pola zewnętrznego i własnego.

Wykazujące nadprzewodnictwo stopy niobu z tytanem (NbTi) i cyną (Nb₃Sn) są od 1960 r. podstawowymi materiałami nadprzewodnikowymi, z których wykonuje się uzwojenia elektromagnesów nadprzewodnikowych do generowania pola magnetycznego o indukcji 10 Tesli, a w szczególnych przypadkach nawet do 20 Tesli.

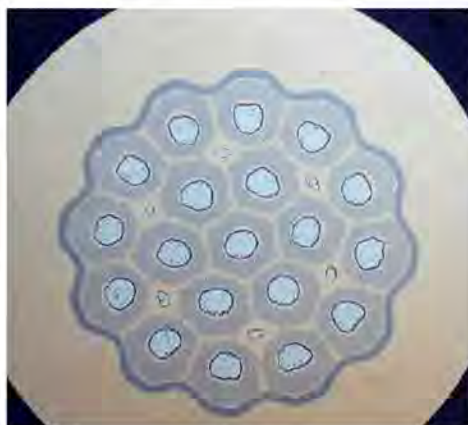
Oprócz stosowanych do wyrobów przewodów stopów NbTi i Nb₃Sn, szersze zastosowanie mają też przewody wykonane z nadprzewodników takich jak V₃Ga i Nb₃Al.



Rys. 2.14. Przekrój przewodu NbTi produkcji firmy Alstom o parametrach:

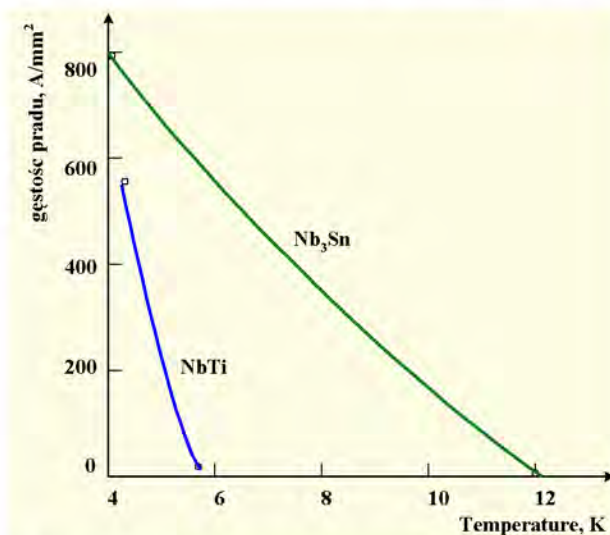
$J_c(4,2\text{ K}; 7\text{ T}) = 1550\text{--}1600\text{ A/mm}^2$, średnica włókna = $7\text{ }\mu\text{m}$;
średnica przewodu 1,065 mm; liczba włókien ~8900 [5]

Wartość indukcji krytycznej przewodów wykonanych ze stopu NbTi nie przekracza 8-10 T, natomiast stop Nb₃Sn ze względu na wysoką wartość pola krytycznego równą 28 T (0 K) jest stosowany w uzwojeniach elektromagnesów wytwarzających pole o wartościach z zakresu 10-20 T.



Rys. 2.15. Przekrój przewodu Nb₃Sn produkcji firmy Alstom/MSAo parametrach:
 $J_c(4,2\text{ K}; 12\text{ T}) = 750\text{ A/mm}^2$, średnica włókna = $18\text{ }\mu\text{m}$ [5]

Na Rys. 2.16 przedstawiono porównanie parametrów nadprzewodnika NbTi i Nb₃Sn.



Rys. 2.16. Porównanie parametrów nadprzewodnika NbTi i Nb₃Sn [2]

Przewody nadprzewodnikowe są także wytwarzane w postaci drutów. Składają się one z jednego włókna nadprzewodnika osadzonego w matrycy miedzianej. Druty takie znajdują zastosowanie w układach o małej indukcji magnetycznej oraz niewielkich siłach działających na drut.

W Tab. 2.3. przedstawione są parametry przewodów niskotemperaturowych, produkowanych obecnie przez wiodących producentów nadprzewodników technicznych.

Tab. 2.3. Zestawienie parametrów wybranych przewodów LTS [4],[5].

Material	Rodzaj Wyrobu /matryca	Krytyczna gęstość prądu (4,2K) [A/mm ²]				Liczba włókien [-]	Wymiary przewodu [mm]	Producent
NbTi	drut/Cu	I _c =265 A / 5 T				2178	ϕ = 0,69	IGC
NbTi	drut/Cu	I _c =238 A / 12 T				-	ϕ = 1,00	Furukawa Electric
NbTi	przewód/Cu	2882 / 5 T				630	ϕ = 0,50	Alstom
NbTi	przewód/Cu	2700 / 5 T				630	ϕ = 1,30	
NbTi	przewód/Cu	2850 / 5 T				54	ϕ = 0,70	
NbTi	przewód/Cu	2750 / 5 T				36	ϕ = 1,00	
NbTi	przewód/Cu	2720 / 5 T				24	ϕ = 0,80	
NbTi	przewód/Cu	2460 / 5 T				24	ϕ = 1,40	
NbTi	przewód/Cu	3300 / 5 T				552	ϕ = 1,28	Outokumpu
NbTi	przewód/Cu	I _c =278 / 5 T				2800	ϕ = 0,85	
NbTi	przewód/Cu	I _c =380 / 5 T				1338	ϕ = 0,65	
NbTi	przewód/Cu	2863 / 5 T				8800	ϕ = 0,79	
NbTi	przewód w osłonie ze stopu Al/Cu	2150 / 6,2 T				192	ϕ = 0,55	Europa Metalli
Nb ₃ Sn		I _c = 40000 / 12,5 T				864	55,9 × 27,4	
Nb ₃ Sn		I _c = 6000 / 12 T				128	13,8 × 13,8	
Nb ₃ Sn	przewód /Cu	36000 / 6 T	10000 / 12 T			664411	6,0 × 13,75	Vacuumschmelze
Nb ₃ Sn	przewód /Cu	14600 / 6 T	4000 / 12 T			259396	3,9 × 9,3	
Nb ₃ Sn	przewód /Cu	4400 / 6 T	1200 / 12 T			675975	1,68 × 5,0	
Nb ₃ Sn	przewód /Cu	1460 / 6 T	400 / 12 T			64871	1,0 × 2,0	
Nb ₃ Sn	przewód /Cu	220 / 6 T	60 / 12 T			3553	0,36 × 1,0	
Nb ₃ Sn	przewód /Cu	66 / 6 T	18 / 12 T			1045	0,3	
NbTi	przewód /Cu	I _c = 78 / 7 T	I _c = 128 / 5 T			1045	0,3	
Nb ₃ Sn	przewód /Cu	6 T	11 T	13 T	15 T	1500	0,5	IMI
		270	100	62	36			

2.2.2. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

Podstawową zaletą nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ich wysoka, często przekraczająca 77 K, temperatura krytyczna. Możliwość użycia jako czynnika chłodzącego ciekłego azotu (temperatura wrzenia = 77 K) zwiększyło zainteresowanie masowym stosowaniem nadprzewodników z uwagi na radykalne zmniejszenie kosztów związanych z układem chłodzenia.

Główną przyczyną ograniczonego wykorzystania nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ich niska krytyczna gęstość prądu. Najwyższe wartości J_c uzyskiwane w próbkach nie przekraczają 100 A/mm² (przy $B = 0$, $T = 77$ K). Trudna jest także technologia produkcji przewodów z nadprzewodników wysokotemperaturowych, chociaż istnieją już rozwiązania stosowane na skalę przemysłową przez wiodących producentów wysokotemperaturowych nadprzewodników technicznych.

W wielu ośrodkach naukowych trwają prace nad budową urządzeń wykorzystujących materiały wysokotemperaturowe w formie elementów masywnych. W ostatnich latach obserwowany jest bardzo dynamiczny rozwój zastosowań nadprzewodników wysokotemperaturowych w medycynie, w fizyce cząstek elementarnych, w energetyce, w elektronice i metrologii. Wśród urządzeń przeznaczonych do zastosowań w energetyce należy wymienić: generatory, kable energetyczne, transformatory, ograniczniki prądów zwarciovych, nadprzewodnikowe zasobniki energii (z ang. SMES) oraz silniki dużych mocy.

Jednym z najpoważniejszych producentów przewodów nadprzewodnikowych HTS jest firma American Superconductor. Produkuje ona przewody nadprzewodnikowe od 1987 roku. Na Rys. 2.17. przedstawione są dwie podstawowe konstrukcje produkowanych przez American Superconductor przewodów wysokotemperaturowych.

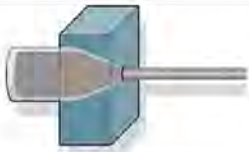
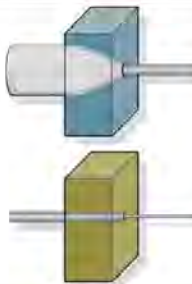


Rys. 2.17. Architektura przewodów wysokotemperaturowych [12]

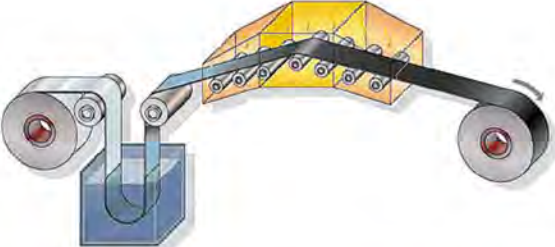
- a) pierwsza generacja przewodów HTS – (MFC) wielowłóknowy przewód kompozytowy
- b) druga generacja przewodów HTS – (CCC) powlekany przewód kompozytowy

Proces produkcji przewodów drugiej generacji jest mniej kosztowny, co pozwala obniżyć koszty gotowego przewodu od 2 do 5 razy.

Tab. 2.4 Najważniejsze etapy produkcji wielowłóknowego przewodu kompozytowego (MFC) [12]

Synteza proszku z nadprzewodnika Bi-2223 (tj. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, Tab. 2.2) Pakowanie proszku nadprzewodnikowego do metalowej rury (ze związków srebra lub tylko srebra)	
Proces deformacji odcinków rury z nadprzewodnikowym proszkiem do postaci drutu – proces analogiczny do produkcji drutów niskotemperaturowych	
Formowanie wielowłóknowego drutu jako podstawy do produkcji taśmy	
Kolejne etapy przeciągania prowadzące do uzyskania odpowiedniej średnicy drutu	
Walcowanie drutu Bi 2223 do postaci taśmy	
Obróbka termiczna – wypiekanie taśmy Bi 2223 w temperaturze $800 \div 900^\circ\text{C}$	

Tab. 2.5 Najważniejsze etapy produkcji powlekanego przewodu kompozytowego (CCC) [12]

Proces przygotowywania substratów do kolejnych zabiegów technologicznych	
Nanoszenie warstwy tlenku w warunkach niskiej próżni	
Nanoszenie warstwy ochronnej i formowanie warstwy YBCO	
Proces dekompozycji taśmy i końcowe formowanie warstwy nadprzewodnikowej	
Przycinanie taśmy do wymaganej szerokości i zwijanie na rolki.	

Zestawienie wybranych parametrów przewodów wykonanych z nadprzewodników HTS zawiera Tab. 2.6.

Tab. 2.6. Zestawienie wybranych parametrów przewodów HTS

Material nadprzewodnikowy	Typ wyrobu	Liczba włókien [-]	Prąd krytyczny (77K) [A]	Producent
Bi-2223	9612-A	1	6	American Superconductor
Bi-2223	9701-J	19	11	
Bi-2223	9611-G	27	16	
Bi-2223	9801-A	37	21	
Bi-2223	9805-E27	27	34,8	
Bi-2223	9805-F61round	61	27	
Bi-2223	9805-E27	27	34,8	
YBCO	drut	wielowłóknowy	$J_c=97 \text{ kA/mm}^2$	ORNL
Bi-2223	drut PIT walcowany	wielowłóknowy	$J_c=440 \text{ A/mm}^2$	ASC
Bi-2223	drut PIT walcowany	wielowłóknowy	$J_c=740 \text{ A/mm}^2$	IGC
Tl-1223	drut na srebrnej folii	wielowłóknowy	$J_c=680 \text{ A/mm}^2$	NREL
Bi-2223/Ag	taśma walcowana	64	$J_c=310 \text{ A/mm}^2$	VACUUM-SCHMELTZE
Bi-2223	taśma	wielowłóknowa	$J_c=240 \text{ A/mm}^2$	NST

W roku 2001 odkryto występowanie zjawiska nadprzewodnictwa w dwuborku magnezu MgB_2 (Rys.2.18.).

Rys. 2.18. Przewód zbudowany z nadprzewodnika MgB_2 z rdzeniem stalowym [6].

Nowy nadprzewodnik wysokotemperaturowy przechodzi w stan nadprzewodnictwa w temperaturze 39 K. Obecnie w wielu ośrodkach na świecie trwają intensywne prace nad technologią wykonania przewodów i taśm wykorzystujących nowy materiał nadprzewodnikowy.

2.3. *Materiały nadprzewodnikowe stosowane do budowy ograniczników prądu.*

Materiały nadprzewodnikowe, wykorzystywane w budowie ograniczników prądu, powinny spełniać trzy podstawowe wymagania:

- małe straty przy prądzie przemiennym – straty zmiennoprądowe AC, podczas normalnych warunków pracy (w stanie nadprzewodnictwa), w celu zminimalizowania kosztów chłodzenia,
- duża wytrzymałość mechaniczna w celu uniknięcia uszkodzenia lub zniszczenia nadprzewodnika, na skutek sił dynamicznych oraz magnetycznych, powstających podczas procesu ograniczania prądu,
- dobra stabilność cieplna w celu zapewnienia równomiernego nagrzewania się materiału.

Początkowo, nadprzewodnikowe ograniczniki prądu budowano w oparciu o nadprzewodniki niskotemperaturowe (LTS). Nadprzewodniki te charakteryzują się dobrymi parametrami mechanicznymi oraz małymi stratami zmiennoprądowymi. Ze względu na bardzo dobrą przewodność cieplną matrycy oraz małą wartość ciepła właściwego nadprzewodnika, charakteryzują się także dużą równomiernością nagrzewania. Ze względu na swoje właściwości nadprzewodniki niskotemperaturowe preferowane są do budowy ograniczników pracujących z „szybkim nagrzewaniem”. Wadą stosowania nadprzewodników niskotemperaturowych jest konieczność chłodzenia ich ciekłym helem (temp. 4,2 K), co znacznie komplikuje i podraża układ chłodzenia [7]. Obecnie do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu wykorzystuje się nadprzewodniki wysokotemperaturowe (HTS). Ze względu na swoją ceramiczną strukturę materiały te charakteryzują się niewielką wytrzymałością mechaniczną. W celu jej poprawienia stosuje się stabilizację mechaniczną w postaci matryc, wykonanych ze srebra i jego stopów, lub odpowiedniej izolacji. Przewodność cieplna nadprzewodników wysokotemperaturowych jest bardzo mała, natomiast ciepło właściwe w temperaturze 77 K jest duże. Powoduje to nierównomierne nagrzewanie, mogące prowadzić do lokalnego przegrzewania się nadprzewodnika, a w efekcie do lokalnego zaniku stanu nadprzewodzącego.

W celu poprawienia właściwości cieplnych nadprzewodników wysokotemperaturowych stosuje się często mostki cieplne, poprawiające rozkład temperatury lub pokrywa się je cienkimi warstwami metali o bardzo wysokiej przewodności cieplnej, np. złotem lub srebrem. Zaletą nadprzewodników wysokotemperaturowych w stosunku do niskotemperaturowych jest praca w wyższych temperaturach, co wpływa na uproszczenie układu chłodzenia i obniżenie jego kosztów.

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe stosowane do produkcji ograniczników prądu wykonywane są w postaci nadprzewodników masywnych (cylindry), taśm

nadprzewodnikowych oraz cienkich warstw [7], [8].

Rys.2.19 przedstawia najczęściej stosowane formy nadprzewodników wysokotemperaturowych, wykorzystywanych do budowy ograniczników prądu.



Rys.2.19. Nadprzewodnikowe elementy ograniczników prądu:

- a) cylindry nadprzewodnikowe Bi-2212 i Bi-2223, b) masywne nadprzewodniki YBCO, c) cienkowarstwowe nadprzewodniki YBCO [9],[10],[11]

Nadprzewodniki masywne Bi-2223, Bi-2212 oraz YBCO (Tab. 2.2.) wykonywane w postaci pierścieni i cylindrów, stosowane są do produkcji nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego.

Wszystkie wymienione materiały nadprzewodnikowe charakteryzują się wysoką temperaturą krytyczną, $T_c > 85$ K, dużą gęstością prądu krytycznego, J_c od 0,1 do 0,5 GA/m² przy 77 K, oraz bardzo dużą rezystywnością, ρ , około 10 $\mu\Omega$ m w temperaturze 77 K. Ze względu jednak na technologię produkcji, najlepszym materiałem na pierścienie i cylindry jest nadprzewodnik Bi-2212. Stosując ten nadprzewodnik można otrzymać cylindry o grubości ścianek do 8 mm oraz średnicy do 400 mm, przy dowolnej wysokości.

Cienkowarstwowe nadprzewodniki YBCO na podłożu krystalicznym, wykonywane w postaci płytek lub krążków, wykorzystywane są najczęściej w nadprzewodnikowych ogranicznikach typu rezystancyjnego. Charakteryzują się one bardzo wysokimi gęstościami prądu krytycznego. Dla przykładu, krytyczna gęstość prądu warstwy nadprzewodnika YBCO o grubości 200 nm na podłożu CeO₂ wynosi około 30 GA/m². Obecnie produkowane są płytki cienkowarstwowego nadprzewodnika YBCO o maksymalnych wymiarach 200 x 200 mm.

Nadprzewodniki Bi-2223 (Tab.2.2) wykonywane w postaci taśm i przewodów, składających się z wielu włókien nadprzewodnikowych otoczonych matrycą z czystego srebra lub jego stopów, nie znalazły jak dotąd zastosowania w obecnie budowanych ogranicznikach prądu.

3. BUDOWA I DZIAŁANIE NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU

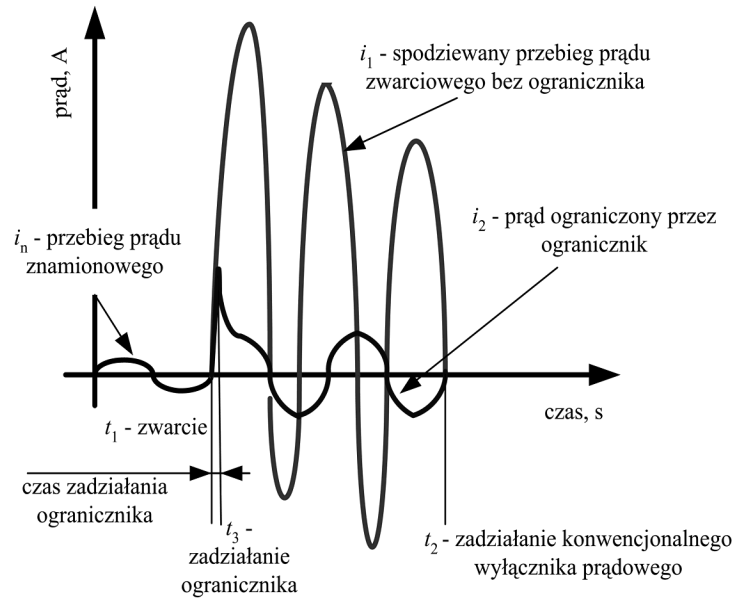
3.1. Zasada pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu

Dynamiczne skutki prądów zwarciovych i wartości towarzyszących im sił mechanicznych są największe, gdy prąd zwarcia osiąga swe pierwsze maksimum, tj. w czasie równym 0,005 s przy częstotliwości 50 Hz. Jeżeli obwód zwarciový zostanie przerwany lub zwiększymy jego impedancję w czasie krótszym od 5 ms, to siły dynamiczne nie osiągną swego pierwszego maksimum, chroniąc system i pracujące w nim urządzenia elektroenergetyczne przed nadmiernymi naprężeniami i uszkodzeniami. Wśród ograniczników konwencjonalnych zadaniu temu mogą sprostać tylko ograniczniki o konstrukcji złożonej z dwóch równoległych torów prądowych. Jeden z torów prądowych takiego ogranicznika wyposażony jest w mikroładunek wybuchowy, którego zadziałaniem i przerwaniem prądu zwarciovego steruje urządzenie śledzące szybkość narastania prądu w obwodzie roboczym (di/dt). Szybkość zadziałania takich wyłączników nie sięga zwykle 1 ms a gaszenie łuku odbywa się w obwodzie bocznikującym prąd roboczy, zaopatrzonym w bezpiecznik. Po każdorazowym przerwaniu obwodu z prądem zwarciovym należy wymienić wkładkę z mikroładunkiem, co w połączeniu z możliwością błędnego zadziałania, zwłaszcza przy obciążeniu pojemnościowym, jest istotną wadą takiego typu ograniczników.

Szybkie i niezawodne działanie mogą zapewnić nadprzewodnikowe ograniczniki prądów, bowiem czas przejścia nadprzewodnika ze stany nadprzewodzącego do rezystywnego wynosi kilkadziesiąt mikrosekund, a ich powrót do pracy po zadziałaniu jest natychmiastowy i nie wymaga wykonywania jakichkolwiek czynności [1], [2]. Ideę pracy ogranicznika prądu ilustrują przebiegi prądu przedstawione na Rys. 3.1.

W chwili wystąpienia zwarcia w obwodzie elektroenergetycznym (w t_1), następuje gwałtowny, kilku, kilkunasto lub kilkudziesięciokrotny wzrost prądu od i_n do i_1 (Rys. 3.1). Prąd zwarciový i_1 musi zostać wyłączony przez konwencjonalny wyłącznik prądowy, dobrany odpowiednio do spodziewanej jego wartości. Jednak rozłączenie obwodu następuje w chwili przejścia prądu zwarcia przez wartość zerową (w t_2), ale dopiero po kilku okresach od chwili powstania zwarcia. W tym czasie nadmierne wartości amplitudy prądu zwarcia mogą spowodować uszkodzenie lub zniszczenie urządzeń elektroenergetycznych. W celu ograniczenia wartości już pierwszej amplitudy prądu zwarciovego można zastosować element ograniczający ten prąd do wartości i_2 , kilkakrotnie mniejszej od wartości spodziewanej i_1 . Ograniczenie prądu do wartości i_2 , następuje w czasie t_3 , znacznie krótszym

od czasu trwania $1/4$ okresu przebiegu prądu zwarcowego i zależy od parametrów ogranicznika. Ograniczony prąd zwarcowy i_2 , który nie stanowi już tak dużego zagrożenia dla obwodu elektroenergetycznego, może być wyłączony w czasie t_2 , przez konwencjonalny wyłącznik lub rozłącznik, dobrany jednak na znacznie mniejszą wartość prądu ($i_2 \ll i_1$).



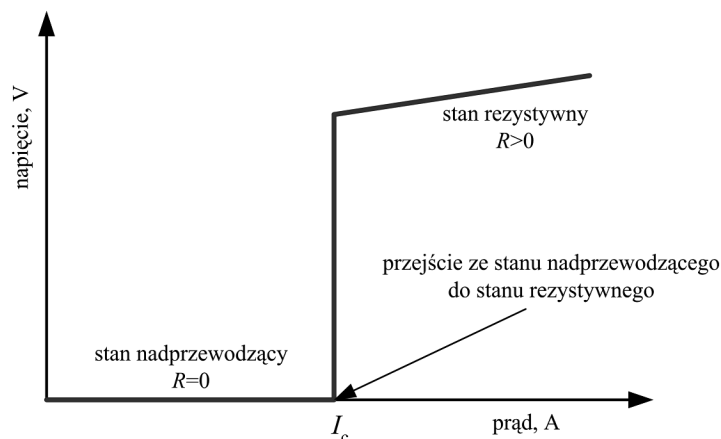
Rys. 3.1. Idea działania ogranicznika

Ograniczenie prądu zwarcowego można osiągnąć poprzez skokowe wprowadzenie dużego spadku napięcia na elemencie nieliniowym włączonym w obwód chroniony, które ograniczy prąd zwarcowy do wartości i_2 .

Ogranicznik prądu pracujący w oparciu o element nieliniowy, powinien charakteryzować się [3]:

- zerową lub minimalną impedancją podczas normalnych warunków pracy systemu,
- dużą impedancją podczas zwarcia,
- szybkim czasem odpowiedzi na zaistniałe zwarcie, krótszym od czasu trwania jednej czwartej okresu prądu zwarcowego,
- zerowymi lub minimalnymi stratami podczas normalnych warunków pracy systemu,
- możliwością ograniczania serii następujących po sobie zwarć,
- możliwością samoczynnego powrotu, bez konieczności obsługi, do stanu początkowego, po ustąpieniu zwarcia,
- wysoką niezawodnością i minimalnymi kosztami utrzymania.

Materialami, które posiadają silnie nieliniową charakterystykę napięciowo – prądową, spełniającymi powyższe wymagania są nadprzewodniki [4]. Koncepcja ograniczników prądu z nieliniowym elementem nadprzewodnikowym, z ang. SFCL – Superconducting Fault Current Limiter, opiera się na nieliniowej właściwości nadprzewodnika, polegającej na gwałtownym, automatycznym przejściu elementu nadprzewodnikowego, znajdującego się w stanie nadprzewodzącym, do stanu rezystywnego, po przekroczeniu jego prądu krytycznego. Rys. 3.2 przedstawia idealną charakterystykę napięciowo – prądową elementu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.

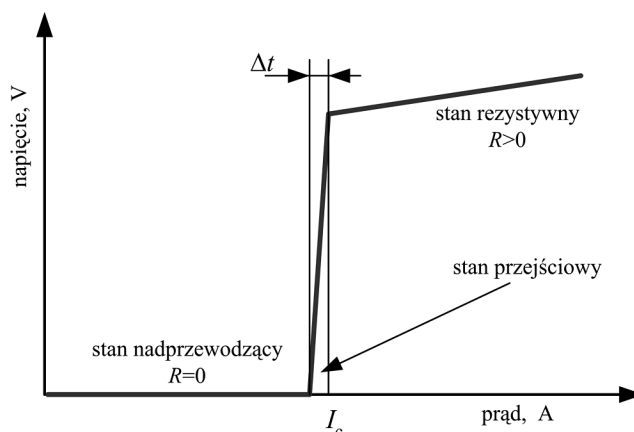


Rys. 3.2. Idealna charakterystyka napięciowo – prądowa nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Z przebiegu charakterystyki wynika, że element nadprzewodnikowy posiada dwa stany pracy: stan nadprzewodzący ($R = 0$), oraz stan rezystywny ($R > 0$). Przekroczenie krytycznej wartości prądu I_c powoduje przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. Jeżeli element nadprzewodnikowy umieścimy w obwodzie chronionym, to przekroczenie prądu krytycznego nadprzewodnika, np. na skutek zwarcia w obwodzie, spowoduje skokowy wzrost rezystancji nadprzewodnika, zwiększenie impedancji zabezpieczanego obwodu, co w efekcie doprowadzi do ograniczenia prądu zwarciovego. Ogranicznik pracujący na takich zasadach powinien charakteryzować się bardzo krótkim czasem zadziałania, równie krótkim czasem powrotu do stanu nadprzewodzącego po ustąpieniu zwarcia oraz możliwością określenia prądu wyzwalań, przekroczenie, którego spowoduje zadziałanie ogranicznika.

Prąd wyzwalań ogranicznika I_w tożsamy jest z prądem krytycznym nadprzewodnika I_c . Jego wartość zależy od rodzaju zastosowanego nadprzewodnika oraz jego wymiarów geometrycznych. Czas powrotu do stanu nadprzewodzącego zależy głównie od konstrukcji ogranicznika oraz wydajności i sprawności

zastosowanego układu chłodzenia. Czas zadziałania ogranicznika, t_3 (Rys. 3.1.) określa chwilę, po której nastąpi ograniczenie prądu. Czas ten musi być jak najkrótszy, aby ograniczyć wartość pierwszej amplitudy prądu zwarciovego (udar prądowy) w zabezpieczanym obwodzie. Z powyższej charakterystyki wynika, że ogranicznik zadziała natychmiast po przekroczeniu wartości jego prądu wyzwalań. Należy pamiętać jednak, że jest to charakterystyka idealna. W rzeczywistości istnieje jednak stan przejściowy, definiowany skończonym czasem (Δt), potrzebnym na przejście elementu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu do stanu rezystywnego. Rys. 3.3. przedstawia rzeczywistą charakterystykę napięciowo – prądową nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.

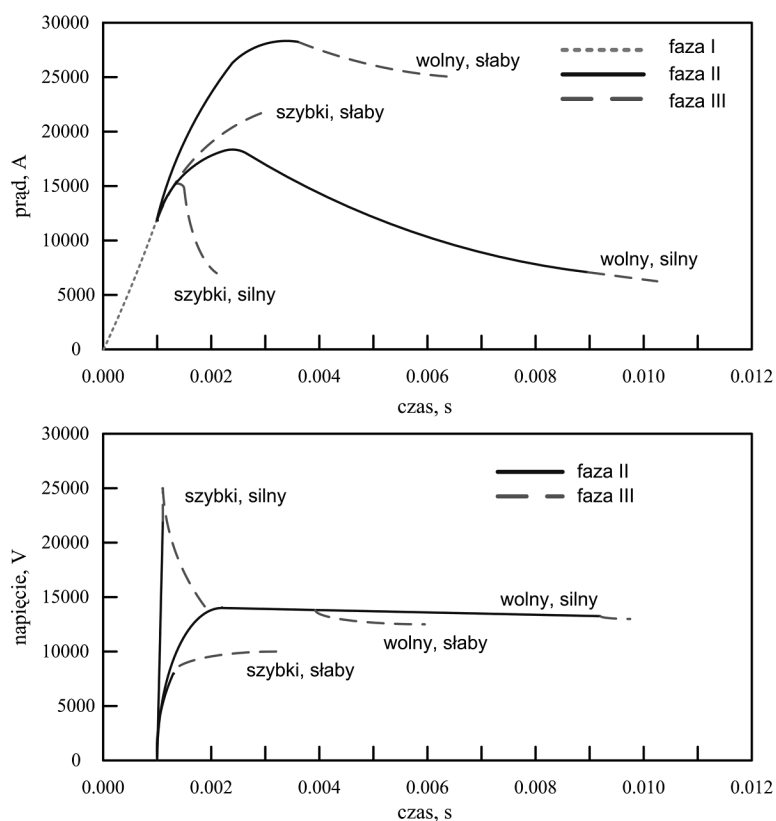


Rys. 3.3. Rzeczywista charakterystyka napięciowo – prądowa nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Przejściowy stan pracy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu można podzielić na trzy fazy (Rys. 3.4.), [1]:

- faza pierwsza, kiedy ogranicznik jeszcze nie ogranicza prądu a $I < I_c$,
- faza druga, kiedy następuje wzrost rezystancji ogranicznika, element nadprzewodnikowy znajduje się częściowo w stanie rezystywnym, a częściowo w stanie nadprzewodzącym,
- faza trzecia, kiedy nadprzewodnik znajduje się w stanie rezystywnym, $I > I_c$, trwa ona aż do zadziałania wyłącznika lub rozłącznika konwencjonalnego o mocy znamionowej niższej od mocy zwarciovowej.

Proces propagacji strefy rezystywnej, zachodzący w drugiej fazie przejścia elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego, jest trudny do opisu matematycznego, ze względu na szybko zmieniający się w czasie prąd, rezystancję, temperaturę i napięcie, które zależą od bardzo nierównomiernych rozkładów indukcji magnetycznej, gęstości prądu, temperatury rzeczywistej i krytycznej oraz zmieniających się w czasie i przestrzeni przewodności cieplnej i ciepła właściwego materiału.



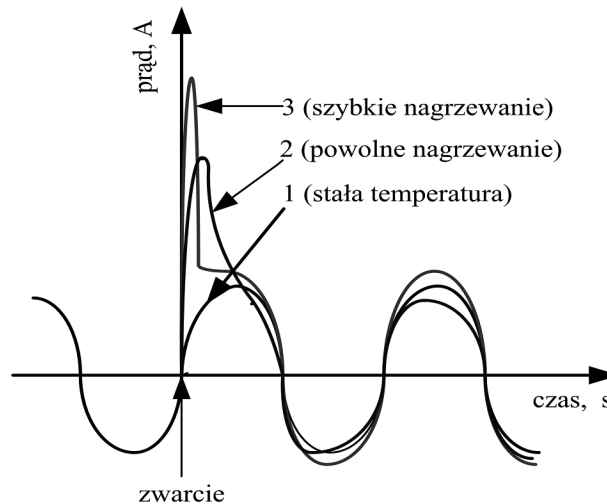
Rys. 3.4. Fazy oraz przebiegi prądu i napięcia nadprzewodnikowego ogranicznika prądu [1]

W zależności od wartości rezystancji elementu nadprzewodnikowego R , ograniczniki prądu można podzielić na układy o działaniu słabym lub mocnym, natomiast ze względu na szybkość narastania rezystancji, dR/dt , na układy o działaniu szybkim lub powolnym. Szybkość działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zależy od parametrów systemu elektroenergetycznego jak i od parametrów samego ogranicznika: impedancji, ciepła właściwego nadprzewodnika, wartości prądu wyzwalań oraz różnicy między temperaturami krytycznymi i rzeczywistymi. Ze względu na siłę i szybkość działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu, można je podzielić na układy: silne - szybkie, silne - wolne, słabe - szybkie oraz słabe - wolne, (Rys. 3.4.).

Ograniczniki o działaniu silnym oraz szybkim dają najmniejszą wartość szczytową ograniczanego prądu (działają najszybciej), jednak mogą powodować znaczne przepięcia na zaciskach. Osłabienie działania szybkiego ogranicznika spowoduje ograniczenie wartości przepięć, jednak kosztem zwiększenia poziomu szczytowej wartości ograniczanego prądu. Spowolnienie działania silnego

ogranicznika zwiększy poziom ograniczania prądu i może zwiększyć przepięcia. Zarówno siła jak i szybkość działania ograniczników są pożądane dla ich skutecznego działania, jednak muszą być one zoptymalizowane, aby zminimalizować poziom przepięć na zaciskach układu. Gdy w rozpatrywanym przypadku wystarczające jest słabe ograniczanie prądu, wartości przepięć mogą być sterowane szybkością działania elementu nadprzewodnikowego.

W najprostszych konstrukcjach ograniczników prądu, element nadprzewodnikowy jest włączony bezpośrednio do obwodu chronionego. Wtedy czas zadziałania ogranicznika oraz poziom prądu wyzwalania zależą także od długości oraz struktury zastosowanego elementu nadprzewodnikowego [2]. W zależności od długości nadprzewodnika można wyróżnić trzy przypadki pracy ogranicznika (Rys. 3.5):



Rys. 3.5. Zależność poziomu prądu wyzwalania ogranicznika od długości elementu nadprzewodnikowego [2]

- W pierwszym zastosowano bardzo długi element nadprzewodnikowy. Pole elektryczne, w którym znajduje się nadprzewodnik w czasie trwania zwarcia, jest bardzo małe. Skutkiem tego przejście do stanu rezystywnego następuje przy niewielkim przekroczeniu prądu krytycznego nadprzewodnika, gęstość energii rozpraszanej w nadprzewodniku jest pomijalnie mała, a materiał nie nagrzewa się (krzywa 1 na Rys. 3.5.). Przypadek pracy ze „stałą temperaturą” stwarza bardzo dobre warunki ograniczania prądu, jednak ze względu na długość elementu nadprzewodnikowego powoduje powstawanie dodatkowych, dość dużych, strat zmiennoprądowych.
- W drugim przypadku zastosowano bardzo krótki element nadprzewodnikowy. Pole elektryczne, w którym znajduje się nadprzewodnik, jest w tym przypadku dość duże. Powoduje to szybkie nagrzewanie nadprzewodnika.

W tym przypadku przejście do stanu rezystywnego, następujące bardzo szybko, bo już po 100 μ s, spowodowane jest bardziej przekroczeniem temperatury krytycznej nadprzewodnika niż przekroczeniem jego prądu krytycznego (krzywa 3 na Rys. 3.5). Przypadek pracy z „szybkim nagrzewaniem” nadprzewodnika, pomimo bardzo krótkiego czasu zadziałania ogranicznika, nie jest zbyt korzystny, z powodu niewystarczającego ograniczania pierwszej amplitudy prądu zwarciovego oraz możliwości cieplnego uszkodzenia nadprzewodnika.

- W trzecim przypadku zastosowano nadprzewodnik o pośredniej długości. Przejście do stanu rezystywnego, następuje po czasie około 10 ms, spowodowane jest jednoczesnym przekroczeniem zarówno temperatury jak i prądu krytycznego nadprzewodnika (krzywa 2 na Rys. 3.5). Przypadek ten zwany pracą z „powolnym nagrzewaniem” jest najbardziej korzystny ze względu na dobre warunki ograniczania prądu, przy jednoczesnych małych stratach.

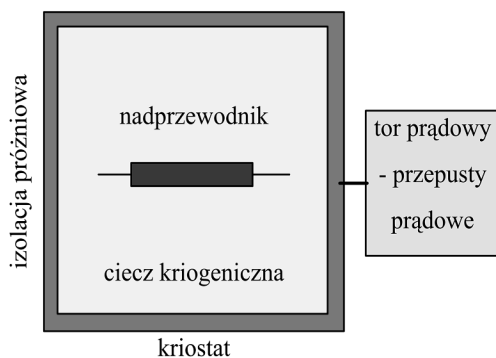
W czasie ograniczania prądu zwarciovego niektóre obszary elementu nadprzewodnikowego ogranicznika mogą wcześniej od innych wychodzić ze stanu nadprzewodzącego. Spowodowane jest to niejednorodnością struktury materiału nadprzewodnika, rozkładu temperatury i natężenia pola magnetycznego. Problem ten jest szczególnie istotny, gdy wartość prądu wyzwalania ogranicznika jest bliska wartości szczytowej prądu zwarciovego, co może powodować wydłużenie czasu przejścia elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego, a tym samym wydłużenie czasu zadziałania ogranicznika.

Przy projektowaniu nadprzewodnikowych ograniczników prądu należy określić poziom temperatury, natężenia pola magnetycznego i naprężeń mechanicznych, przy których możliwa jest jeszcze bezpieczna, niezawodna i efektywna praca ogranicznika w warunkach niejednorodności parametrów. Dla nadprzewodników niskotemperaturowych, przy dużej prędkości propagacji strefy rezystywnej rzędu, 10^2 m/s, następuje stosunkowo szybkie wyrównanie niejednorodności rozkładu temperatury. Jednak dla ograniczników z nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi, dla których prędkość propagacji jest zaledwie rzędu 10^{-2} m/s, problem niejednorodności temperaturowej jest istotny i wymaga wprowadzenia rozwiązań konstrukcyjnych poprawiających jej rozkład [1].

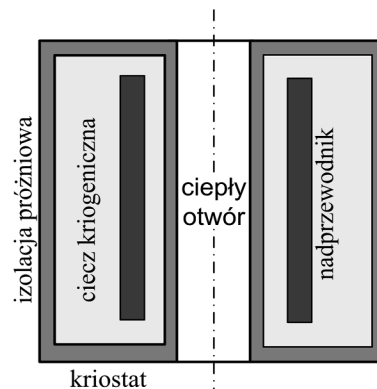
Istotnym zagadnieniem projektowym jest minimalizacja czasu schładzania i powrotu elementu nadprzewodnikowego do stanu nadprzewodzącego po ustąpieniu zwarcia. Jednym z możliwych rozwiązań jest połączenie równoległe lub szeregowe kilku elementów nadprzewodnikowych, stanowiących jeden ogranicznik. Wadą takiego rozwiązania jest znaczna złożoność konstrukcji, brak cieplnego sprzężenia pomiędzy poszczególnymi ogranicznikami oraz konieczność stosowania układu przyłączeniowego [3], [5].

3.2. Układy chłodzenia nadprzewodnikowych ograniczników prądu

Ze względu na specyfikę pracy nadprzewodników, elementy nadprzewodnikowe ograniczników muszą pracować w temperaturze niższej od ich temperatury krytycznej. W tym celu umieszcza się je w kriostatach, w których utrzymywana jest temperatura pracy w granicach od 4,2 do 80 K (Rys. 3.6.). Kriostat może być wypełniony cieczą kriogeniczną – ciekłym helem (4,2 K) lub ciekłym azotem (77 K) w przypadku chłodzenia w kąpeli, lub uzyskiwana i utrzymywana jest w nim głęboka próżnia przy chłodzeniu kontaktowym [10], [11]. W niektórych przypadkach wymagane jest stosowanie specjalnych kriostatów z tzw. ciepłym otworem (Rys. 3.7.). Stosowane są one w przypadku ograniczników typu indukcyjnego, w których w kriostacie umieszcza się tylko uzwojenie nadprzewodnikowe, podczas gdy pozostałe elementy ogranicznika umieszczone są w temperaturze otoczenia.



Rys. 3.6. Klasyczny kriostat ogranicznika prądu [10]

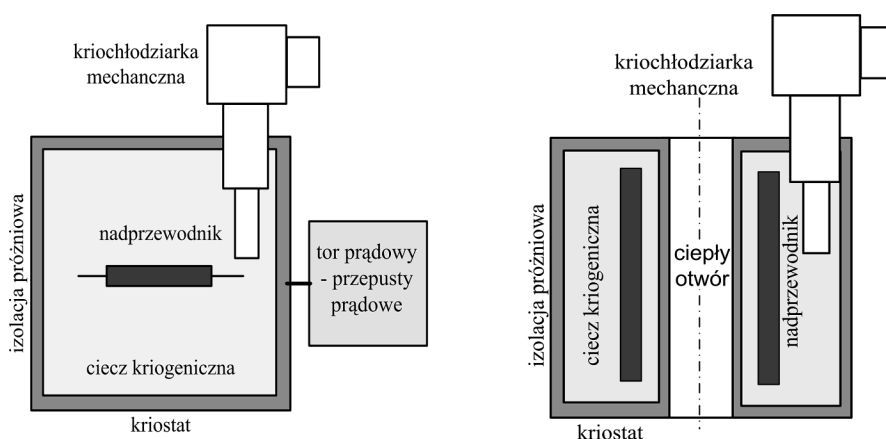


Rys. 3.7. Kriostat z „ciepłym otworem” dla ogranicznika indukcyjnego [10], [11]

Klasyczne kriostaty wykonane są ze stali nierdzewnej oraz wyposażone w nadprzewodnikowe przepusty prądowe, doprowadzające prąd do elementu nadprzewodnikowego. W ogranicznikach typu indukcyjnego w „ciepłym” otworze znajduje się rdzeń (kolumna) magnetowodu i w kriostacie jest tylko uzwojenie wtórne ogranicznika w postaci cylindra z HTS. Wtedy kriostat wykonany jest z materiału izolacyjnego (tworzywo sztuczne), ponieważ kriostat metalowy stanowiłby zwój zwarty i uniemożliwiłby pracę ogranicznika. Stosowanie przepustów prądowych dla ogranicznika indukcyjnego nie jest konieczne, ponieważ element nadprzewodnikowy nie jest bezpośrednio włączony do obwodu chronionego.

Umieszczenie elementu nadprzewodnikowego w kriostacie zapewni jego izolację cieplną od otoczenia. Ciepło może przedostawać się do wnętrza kriostatu, poprzez

jego ścianki i przez przepusty prądowe oraz generować się w uzwojeniach nadprzewodnikowych i przepustach prądowych jako ciepło Joule'a. Element nadprzewodnikowy w normalnych warunkach pracy generuje pewne straty zmiennoprądowe, a w czasie zwarcia straty związane z przejściem do stanu rezystywnego. Wymaganą temperaturę elementu nadprzewodnikowego ogranicznika, zapewnia układ chłodzenia. Układ ten składa się z izolacji termicznej oraz elementu pochłaniającego i rozpraszającego ciepło. Izolacją termiczną, chroniącą przed przedostawaniem się ciepła z zewnątrz kriostatu, stanowi superizolacja próżniowa lub próżniowo – proszkowa, umieszczana w podwójnych ściankach kriostatu. Ciepło powstające w elemencie nadprzewodnikowym i w przepustach oraz wnikające przez ścianki kriostatu jest przejmowane przez chłodziwo i wyprowadzane z kriostatu do skraplarki bądź na drodze przewodnictwa do chłodziarki kontaktowej. W ogranicznikach dużej mocy, sama ciecz kriogeniczna może nie wystarczyć do rozproszenia całego ciepła powstającego podczas przejścia nadprzewodnika do stanu rezystywnego. W takim przypadku stosuje się dodatkowe chłodzenie kontaktowe. Wówczas część ciepła rozpraszana jest przez ciecz kriogeniczną, a część pochłaniana jest bezpośrednio przez kriołodziarkę mechaniczną, na drodze przewodzenia ciepłego [10]. Ideę chłodzenia kontaktowego, wspomagającego układ chłodzenia ograniczników nadprzewodnikowych przedstawia Rys. 3.8.



Rys. 3.8. Zastosowanie kriołodziarki kontaktowej do wspomagania układu chłodzenia nadprzewodnikowych ograniczników prądu [10], [11]

3.3. Klasyfikacja nadprzewodnikowych ograniczników prądu

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, ze względu na sposób działania elementu nadprzewodnikowego (sposób ograniczania prądu) można podzielić generalnie

na trzy główne grupy:

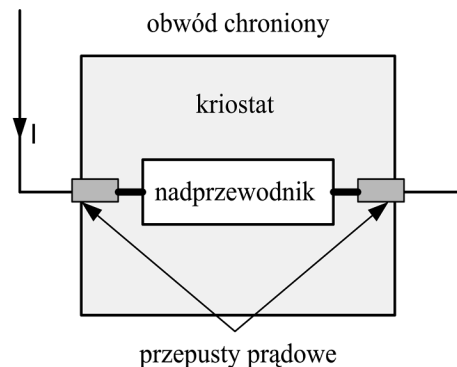
- ograniczniki typu rezystancyjnego,
- ograniczniki typu indukcyjnego,
- ograniczniki hybrydowe.

W każdej z wymienionych grup istnieje wiele różniących się konstrukcji. Najbardziej rozpowszechnione są ograniczniki typu indukcyjnego, ponieważ nie wymagają przepustów prądowych, co upraszcza ich budowę i obniża koszt eksploatacji

W następnych rozdziałach omówimy zasadę budowy i zasadę działania opisywanych w literaturze nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

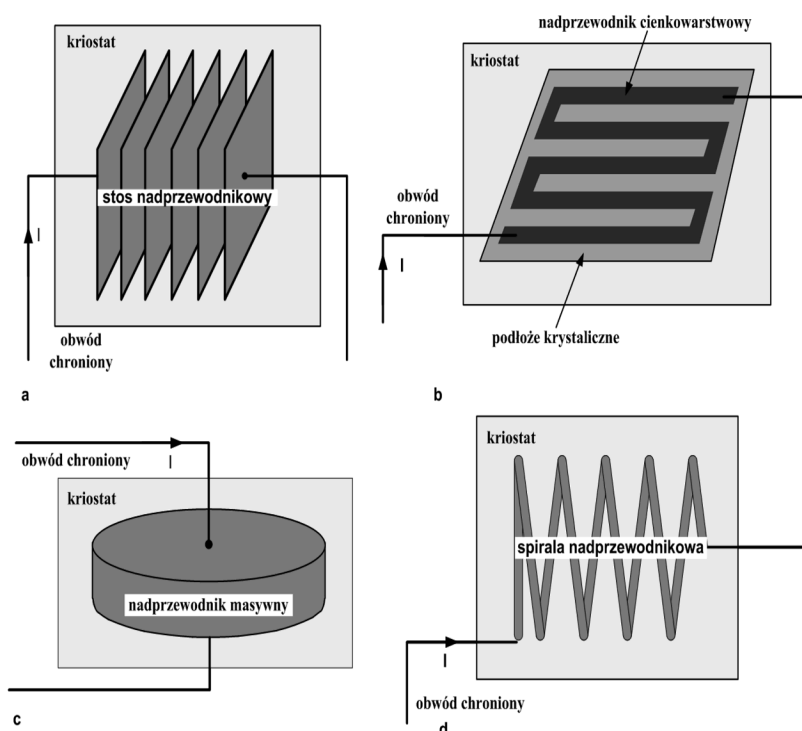
3.3.1. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu rezystancyjnego

Najprostszą konstrukcją nadprzewodnikowych ograniczników prądu (SFCL) są ograniczniki typu rezystancyjnego z elementem nadprzewodnikowym włączonym bezpośrednio do obwodu chronionego. Przy takim włączeniu nadprzewodnika przepływa przez niego zarówno normalny prąd obciążenia jak i prąd zwarcia [4]. Ograniczenie prądu zwarcia, po przekroczeniu przez niego wartości krytycznej prądu nadprzewodnika (I_C), następuje na skutek przejścia nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. Procesowi temu towarzyszy gwałtowny wzrost rezystancji elementu nadprzewodnikowego, a tym samym ograniczenie prądu zwarcia. Zasadę budowy ogranicznika rezystancyjnego przedstawia Rys. 3.9.



Rys. 3.9. Schemat elektryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego

Wartość prądu wyzwalań ograniczników rezystancyjnych zależy od geometrii elementu nadprzewodnikowego (Rys. 3.5.) oraz rodzaju zastosowanego nadprzewodnika, jego kształtu i wymiarów geometrycznych. Na Rys. 3.10 przedstawiono różne sposoby realizacji nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego.



Rys. 3.10. Sposoby realizacji nadprzewodnikowych ograniczników typu rezystancyjnego:

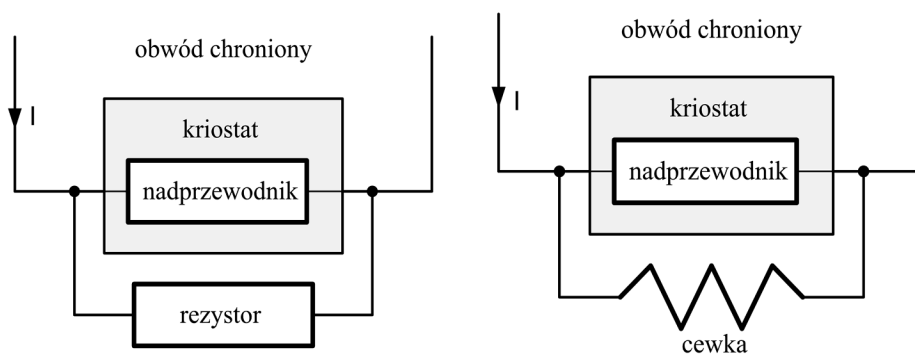
a – stos nadprzewodnikowy, b – nadprzewodnik cienkowarstwowy,
c – nadprzewodnik masywny, d – spirala nadprzewodnikowa [5], [6], [12]

Elementy nadprzewodnikowe ograniczników mogą być wykonywane w postaci: stosów z płytek nadprzewodnikowych połączonych szeregowo bądź równolegle, w celu uzyskania odpowiedniej wartości krytycznego prądu nadprzewodnika, cienkowarstwowych nadprzewodników YBCO na podłożach krystalicznych, masywnych nadprzewodników Bi-2212 i YBCO, oraz spiral z taśm nadprzewodnikowych Bi-2223 i Bi-2212 (Tab. 2.2.) W niektórych konstrukcjach stosuje się również włókniste przewodniki niskotemperaturowe – NbTi i Nb₃Sn [4], [5], [6], [7], [9]. Elementy nadprzewodnikowe, umieszczone w kriostacie, chłodzone są cieczami kriogenicznymi lub kontaktowo. Prąd do elementu nadprzewodnikowego doprowadzany jest przepustami prądowymi, wykonanymi częściowo z nadprzewodnika HTS, które pozwalają znacznie ograniczyć straty mocy w normalnych warunkach pracy ogranicznika, przy przepływie prądu z obszaru o temperaturze otoczenia do obszaru o temperaturze kriogenicznej.

Przejściu elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego towarzyszy duży wzrost jego temperatury, związany z niewielką pojemnością cieplną materiału nadprzewodnika. Prąd przepływający przez nadprzewodnik, znajdujący się w stanie

rezystywnym, powoduje dodatkowo powstawanie strat ciepłych (Joule'a), wpływających na wydajność pracy układu chłodzenia. W celu zmniejszenia obciążenia elementu nadprzewodnikowego, bocznikuje się go elementem o mniejszej impedancji tak, aby prąd w stanie rezystywnym przepływał przez bocznicę a nie przez element nadprzewodnikowy o impedancji znacznie większej.

Elementami bocznikującymi prąd ograniczników rezystancyjnych, mogą być rezystory, cewki, rzadziej warystory. Znajdują się one w temperaturze otoczenia i straty ciepłe, powstające w wyniku przepływu prądu, nie powiększają wymaganej wydajności układu chłodzenia ogranicznika. Po ustąpieniu zwarcia nadprzewodnik ponownie przechodzi do stanu nadprzewodzącego i zanika przepływ prądu przez bocznicę. Schematy elektryczne ograniczników rezystancyjnych, bocznikowanych elektrycznie, przedstawia Rys. 3.11.



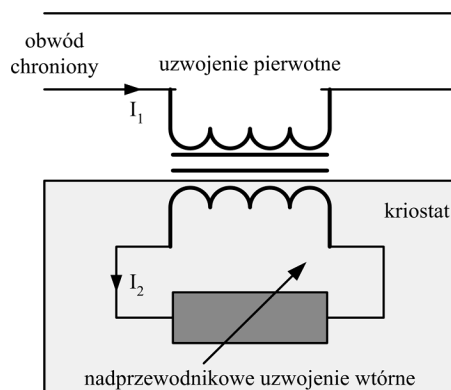
Rys. 3.11. Schematy ograniczników rezystancyjnych, bocznikowanych elektrycznie [4]

Do zalet ograniczników rezystancyjnych można zaliczyć: mało skomplikowaną budowę ogranicznika i układu chłodzenia, szybki czas działania, dużą rezystancję nadprzewodnika znajdującego się w stanie rezystywnym, rzędu $10 \mu\Omega$, co pozwala na zmniejszenie ciężaru i objętości ogranicznika oraz możliwość pracy w obwodach prądu przemiennego i stałego [1]. Do wad ograniczników rezystancyjnych należy zaliczyć: konieczność stosowania przepustów prądowych, podrażających koszt ogranicznika oraz powiększających wymaganą moc układu chłodzenia.

3.3.2. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego

W nadprzewodnikowym ograniczniku prądu typu indukcyjnego, [13], obwód z elementem nadprzewodnikowym nie jest połączony galwanicznie z obwodem chronionym przez ogranicznik, a więc prąd zwarcia nie przepływa przez nadprzewodnik.

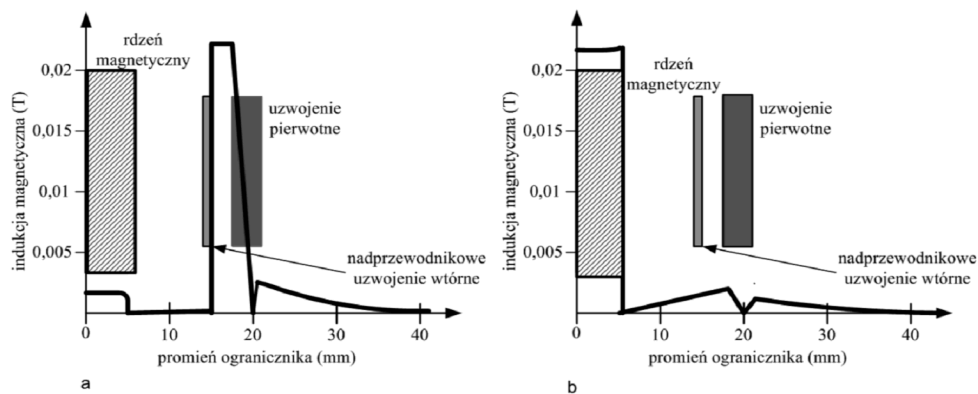
Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego, zwany także ogranicznikiem z ekranowanym rdzeniem, ma budowę transformatora. Składa się on z rdzenia magnetycznego oraz dwóch uzwojeń: pierwotnego i wtórnego. Uzwojenie pierwotne, wykonane z miedzi, włączone jest bezpośrednio do obwodu chronionego, podczas gdy nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne jest zwarte. Uzwojenie to wykonane jest najczęściej z nadprzewodnika wysokotemperaturowego Bi-2212 lub Bi-2223 (Tab.2.2) w postaci cylindra, stanowiącego jeden zwój zwarty [1],[8],[14]. Schemat elektryczny ogranicznika indukcyjnego przedstawia Rys. 3.12.



Rys. 3.12. Schemat elektryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego [14]

W normalnych warunkach pracy, a więc przy prądzie mniejszym od prądu wyzwalania ogranicznika, cylinder nadprzewodnikowy znajduje się w stanie nadprzewodzącym, pełniąc rolę ekranu magnetycznego kolumny rdzenia magnetycznego, na której współosiowo umieszczone są oba uzwojenia. Strumień magnetyczny, indukowany przez uzwojenie pierwotne, nie może przeniknąć do rdzenia, co objawia się niską impedancją układu. Ogranicznik zachowuje się jak przekładnik prądowy.

Z chwilą wystąpienia zwarcia w obwodzie chronionym, prądy w uzwojeniu pierwotnym konwencjonalnym i wtórnym nadprzewodnikowym gwałtownie rosną. Po przekroczeniu wartości krytycznej w uzwojeniu nadprzewodnikowym (wtórnym), jego rezystancja gwałtownie rośnie i jego przepływ zanika. Strumień magnetyczny indukowany przez uzwojenie pierwotne nie jest kompensowany przez przeciwnie skierowany strumień uzwojenia wtórnego i ogranicznik dla obwodu chronionego zachowuje się jak dławik o dużej reaktancji. Gwałtowny wzrost impedancji uzwojenia pierwotnego, ogranicza prąd zwarcia. Po ustąpieniu zwarcia uzwojenie wtórne powraca do stanu nadprzewodzącego, i ogranicznik jest gotowy do pracy bez wymiany jakiegokolwiek elementu. Zasadę pracy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego ilustruje Rys. 3.13.



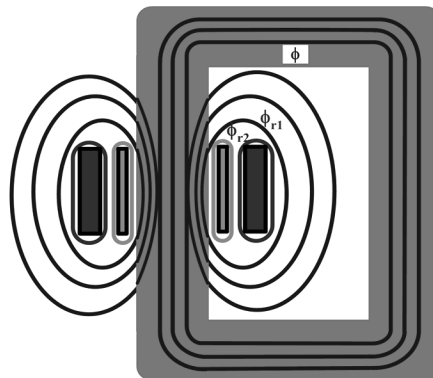
Rys. 3.13. Wykresy charakteryzujące zasadę pracy ogranicznika prądu typu indukcyjnego: a – normalny stan pracy, b – praca w stanie zwarcia

Ekranowanie strumienia magnetycznego, przez uzwojenie nadprzewodnikowe znajdujące się w stanie nadprzewodzącym, przedstawia wykres *a*, podczas gdy wykres *b* ilustruje zanik nadprzewodzenia oraz ekranującej roli uzwojenia w chwili wystąpienia zwarcia w obwodzie chronionym.

Ze względu na sposób realizacji obwodu magnetycznego, nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego dzielimy na układy z otwartym i zamkniętym rdzeniem magnetycznym.

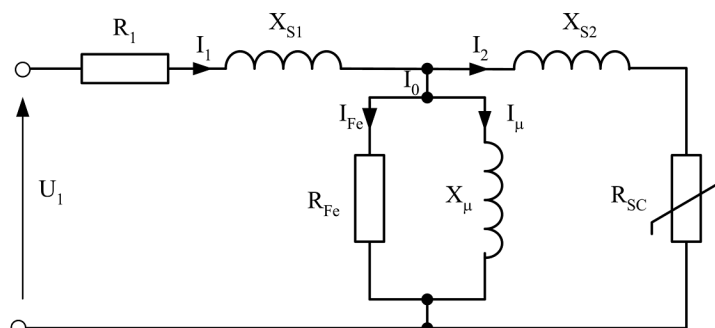
a) Ograniczniki indukcyjne z zamkniętym rdzeniem magnetycznym

W ogranicznikach indukcyjnych z zamkniętym rdzeniem magnetycznym cała droga strumienia głównego zamyka się w żelazie rdzenia. Rys. 3.14 przedstawia rozkład strumieni magnetycznych ogranicznika.



Rys. 3.14. Droga strumieni magnetycznych ogranicznika z zamkniętym rdzeniem magnetycznym. Φ_{r1} – strumień rozproszenia uzwojenia pierwotnego, Φ_{r2} – strumień rozproszenia uzwojenia wtórnego, Φ – strumień główny

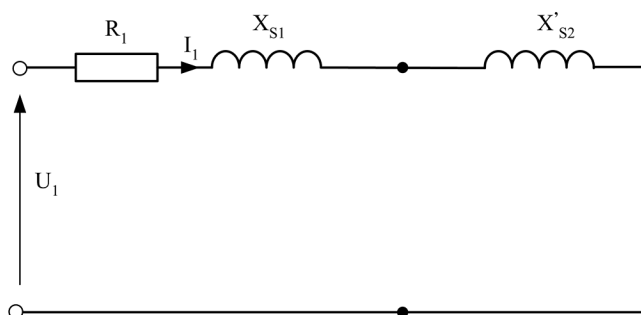
Zasadę pracy ogranicznika indukcyjnego opisać można wykorzystując uproszczone równania pracy transformatora. Schemat zastępczy ogranicznika indukcyjnego z zamkniętym rdzeniem magnetycznym przedstawia Rys. 3.15.



Rys. 3.15. Schemat zastępczy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego z zamkniętym rdzeniem magnetycznym

Na schemacie tym R_1 i X_{S1} - reprezentują rezystancję i reaktancję rozproszenia uzwojenia pierwotnego, X_{S2} - reaktancję uzwojenia wtórnego, R_{SC} - rezystancję nadprzewodnika w stanie rezystywnym, R_{Fe} - rezystancję odwzorowującą straty w rdzeniu, X_{μ} - reaktancję odwzorowującą prąd magnesujący I_{μ} . Możemy wyróżnić dwa stany ogranicznika: stan obciążenia dopuszczalnego, kiedy uzwojenie wtórne znajduje się w stanie nadprzewodzącym, oraz stan zwarcia, gdy uzwojenie wtórne przechodzi do stanu rezystywnego.

Rys. 3.16. przedstawia schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie obciążenia dopuszczalnego

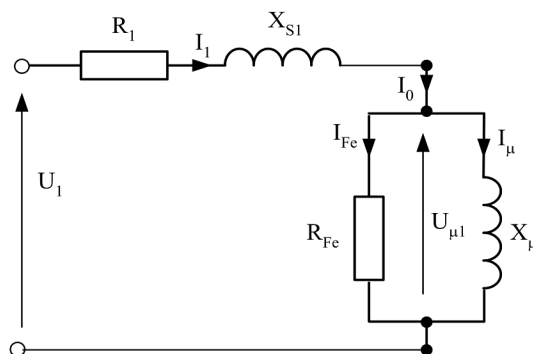


Rys. 3.16. Schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie obciążenia dopuszczalnego

Na schemacie tym uzwojenie wtórne reprezentowane jest tylko przez reaktancję rozproszenia X'_{S2} (sprowadzoną na stronę pierwotną), ponieważ rezystancja jego jest równa zero. Ogranicznik pracuje tak jak transformator znajdujący się w stanie zwarcia. Impedancję wejściową układu wyraża równanie 3.1:

$$\underline{Z}_{we} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = R_1 + j(X_{s1} + X'_{s2}) \quad (3.1)$$

Rys. 3.17 przedstawia schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie zwarciovym.



Rys. 3.17. Schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie zwarciovym

Po przejściu uzwojenia nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego, pojawi się rezystancja uzwojenia wtórnego R_{sc} . Ogranicznik można opisać teraz jak słabo obciążony transformator lub też transformator pracujący w stanie jałowym (przekładnik napięciowy). Impedancje ogranicznika, której wartość jest znacznie większa od impedancji w stanie normalnym, wyraża wzór 3.2:

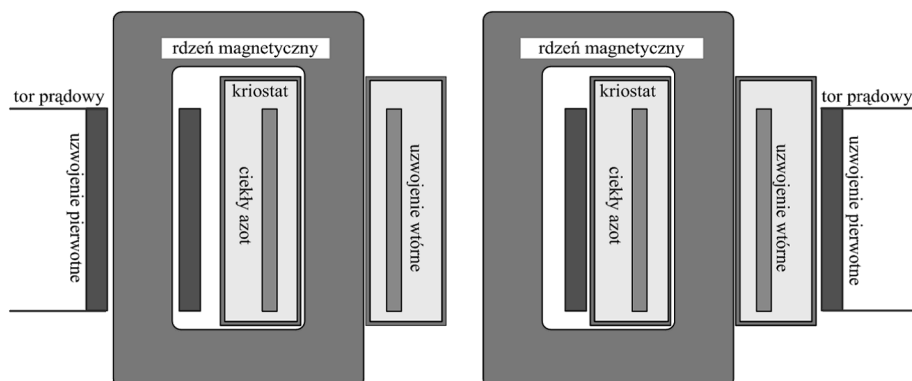
$$\underline{Z}_{we} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = R_1 + \frac{R_{Fe} X_{\mu}^2}{R_{Fe}^2 + X_{\mu}^2} + j \left(X_{s1} + \frac{X_{\mu} R_{Fe}^2}{R_{Fe}^2 + X_{\mu}^2} \right) \quad (3.2)$$

Analizując wzór 3.2 możemy stwierdzić duży wpływ parametrów rdzenia magnetycznego na wartość impedancji wejściowej ogranicznika, która decyduje o ograniczaniu prądu zwarciovego.

Istnieją dwa główne sposoby technicznej realizacji ograniczników z zamkniętym rdzeniem magnetycznym, różniące się rozmieszczeniem uzwojeń. W pierwszym przypadku uzwojenie pierwotne i wtórne umieszczone są wspólnie, na jednej kolumnie rdzenia. W drugim przypadku uzwojenie pierwotne umieszczone jest na jednej kolumnie, natomiast wtórne – na drugiej.

W obu przypadkach uzwojenie nadprzewodnikowe umieszczone jest w kriostacie. Uzwojenie pierwotne znajduje się w temperaturze otoczenia, nie obciążając tym samym układu chłodzenia. Rdzeń magnetyczny powinien znajdować się w temperaturze otoczenia. Stwarza to konieczność stosowania kriostatów niemetalicznych z „ciepłym otworem” (Rys. 3.7).

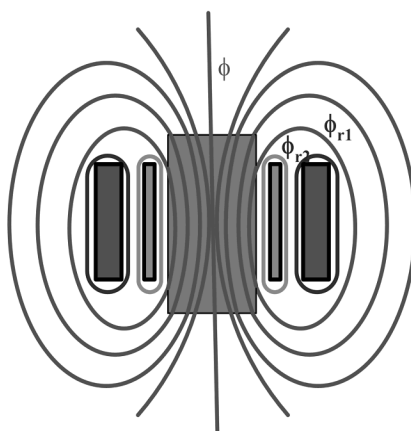
Sposób realizacji ograniczników z zamkniętym rdzeniem magnetycznym ilustruje Rys. 3.18.



Rys. 3.18. Sposoby realizacji ograniczników z zamkniętym rdzeniem magnetycznym [15]

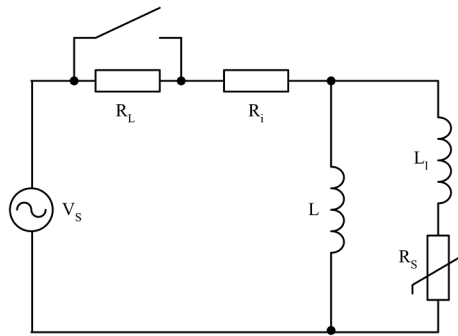
b) Ograniczniki indukcyjne z otwartym rdzeniem magnetycznym

W ogranicznikach indukcyjnych z otwartym rdzeniem magnetycznym strumień magnetyczny kolumny zamyka się przez nieograniczoną przestrzeń powietrzną (Rys. 3.19). Rozkład strumienia magnetycznego w powietrzu istotnie wpływa na efektywność ograniczania prądu.



Rys. 3.19. Droga strumieni magnetycznych ogranicznika z otwartym rdzeniem magnetycznym. Φ_{r1} – strumień rozproszenia uzwojenia pierwotnego, Φ_{r2} – strumień rozproszenia uzwojenia wtórnego, Φ – strumień główny

Schemat zastępczy ogranicznika indukcyjnego z otwartym rdzeniem magnetycznym przedstawia Rys. 3.20, [16].

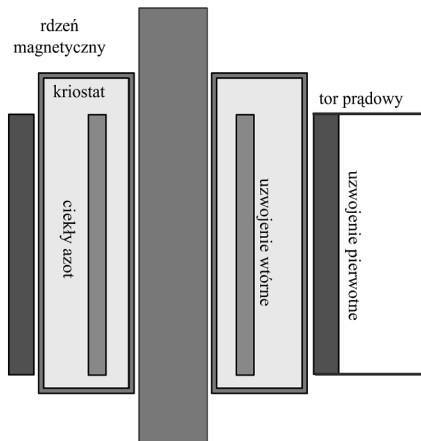


Rys. 3.20. Schemat zastępczy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego z otwartym rdzeniem magnetycznym [16]

Na schemacie R_S reprezentuje rezystancję nadprzewodnika, L_1 reaktancję rozproszenia uzwojenia wtórnego. R_i jest sumą rezystancji wewnętrznej źródła i linii zasilającej, R_L jest rezystancją obciążenia. Praca ogranicznika w stanie normalnym, jak i w stanie zwarcia jest analogiczna do pracy ogranicznika z zamkniętym rdzeniem magnetycznym.

Zaletą ogranicznika indukcyjnego z otwartym rdzeniem magnetycznym, w stosunku do ogranicznika z rdzeniem zamkniętym, jest łatwy dostęp do uzwojeń i kriostatu, prostsza budowa i mniejsza masa. Wadą jest wytwarzanie pola w dużym obszarze przestrzeni, co prowadzi do spowolnienia procesu przechodzenia uzwojenia nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego, a tym samym spowolnienia ograniczenia prądu. Ważnym zagadnieniem przy projektowaniu ograniczników z otwartym rdzeniem magnetycznym jest wybór rdzenia o odpowiednim stosunku jego wysokości do średnicy.

Sposób realizacji ograniczników z otwartym rdzeniem magnetycznym ilustruje Rys. 3.21.



Rys. 3.21. Realizacja ogranicznika indukcyjnego z otwartym rdzeniem magnetycznym

W obu rozpatrywanych rodzajach ograniczników indukcyjnych poziom prądu wyzwalań ogranicznika, wyznacza się poprzez dobór przekładni transformatora. Praktycznie sprowadza się to do określenia liczby zwojów uzwojenia pierwotnego, ponieważ uzwojenie wtórne stanowi jeden zwoj. Chcąc zmienić wartość prądu wyzwalań ogranicznika można zmieniać liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego, lub zastosować uzwojenie pierwotne z odczepami. Pierwszy sposób jest możliwy do realizacji w ogranicznikach z otwartym rdzeniem magnetycznym, gdzie wymiana uzwojenia pierwotnego nie stanowi większego problemu. Drugi sposób stosuje się głównie w ogranicznikach z zamkniętym rdzeniem magnetycznym, gdzie wymiana uzwojenia pierwotnego jest niemożliwa.

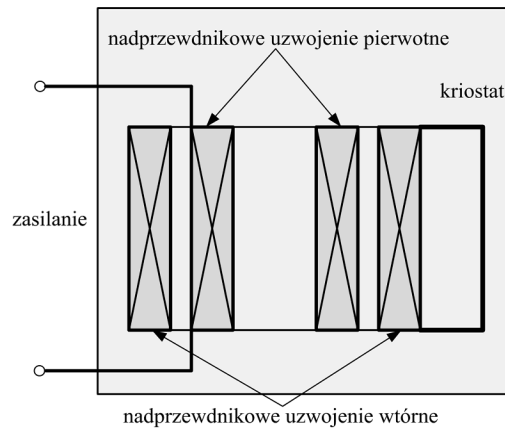
3.3.3. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego z regulowanym poziomem prądu wyzwalań

Poziom prądu wyzwalań (zadziałania ogranicznika) określony jest przez wartość krytycznego prądu nadprzewodnika, po przekroczeniu, którego nadprzewodnik przejdzie do stanu rezystywnego. Wartość krytycznego prądu nadprzewodnika jest parametrem zależnym od rodzaju i wymiarów geometrycznych zastosowanego elementu nadprzewodnikowego. W dotychczas omawianych ogranicznikach indukcyjnych wartość prądu wyzwalań, przy stałej wartości prądu krytycznego zastosowanego nadprzewodnika, określa się poprzez dobór odpowiedniej liczby zwojów uzwojenia pierwotnego, a więc poprzez zmianę przekładni transformatora. Zmiana wartości prądu wyzwalań w takich ogranicznikach wiąże się z koniecznością zmiany uzwojenia pierwotnego (zmiana przekładni transformatora). Tak, więc w praktyce każdy ogranicznik indukcyjny, zwłaszcza z zamkniętym rdzeniem magnetycznym, może być zaprojektowany tylko na jedną wartość prądu zwarciovego. Z tego powodu zrodziła się koncepcja nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z możliwością regulacji poziomu prądu wyzwalań, pozwalająca dostosować dany ogranicznik do konkretnych warunków pracy [17].

Podstawą konstrukcji ogranicznika jest transformator powietrzny (bezerdzeniowy), składający się z dwóch uzwojeń nadprzewodnikowych umieszczonych współosiowo. Uzwojeniem pierwotnym jest cewka wewnętrzna, włączona bezpośrednio do obwodu chronionego. Cewka zewnętrzna, stanowiąca uzwojenie wtórne, jest zwarta.

W normalnych warunkach pracy oba uzwojenia znajdują się w stanie nadprzewodzącym. Ponieważ sprzężenie magnetyczne pomiędzy nimi jest bardzo silne, impedancja układu jest bardzo mała i nie oddziałuje na obwód chroniony. Po wystąpieniu zwarcia prąd płynący w obu uzwojeniach wzrasta. Przekroczenie prądu krytycznego uzwojenia wtórnego, powoduje przejście nadprzewodnika do stanu rezystywnego, prowadzące do wzrostu impedancji ogranicznika i ograniczenia prądu zwarciovego.

Schemat ogranicznika z regulowanym poziomem prądu wyzwalań przedstawia Rys. 3.22.

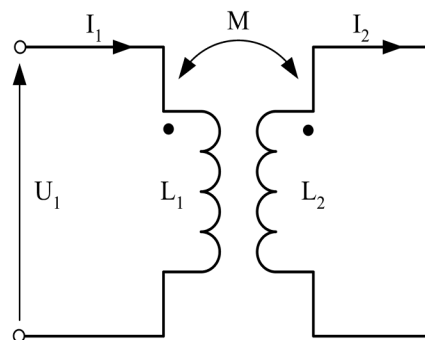


Rys. 3.22. Ogranicznik z regulowanym poziomem prądu wyzwalań [17]

Warunkiem poprawnej pracy ogranicznika jest to, żeby uzwojenie pierwotne, przez cały czas trwania zwarcia, znajdowało się w stanie nadprzewodzącym. Aby to zapewnić, wartość krytycznego prądu nadprzewodnika uzwojenia pierwotnego musi być o wiele większa od prądu krytycznego nadprzewodnika uzwojenia wtórnego.

Zasadę pracy ogranicznika z regulowanym poziomem wyzwalań można opisać stosując zmodyfikowane równania i zasadę pracy transformatora powietrznego. Możemy wyróżnić dwa stany ogranicznika: stan obciążenia dopuszczalnego, kiedy oba uzwojenia znajdują się w stanie nadprzewodzącym, oraz stan zwarcia, gdy uzwojenie wtórne przechodzi do stanu rezystywnego.

Rys. 3.23 przedstawia schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie obciążenia dopuszczalnego.



Rys. 3.23. Schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie obciążenia dopuszczalnego

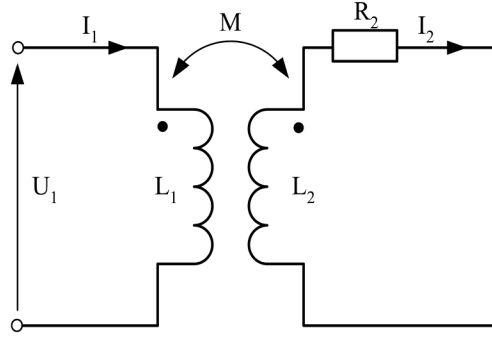
Na schemacie tym reprezentowane są tylko indukcyjności własne cewek nadprzewodnikowych (L_1 , L_2), podczas gdy ich rezystancja jest równa zero. Zależność na impedancję wejściową układu wyraża wzór 3.3:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{we} &= \frac{U_1}{I_1} = j\omega L_1 - \frac{j^2 \omega^2 M^2}{j\omega L_2} = j\omega L_1 - j\omega \frac{k^2 L_1 L_2}{L_2} \\ \underline{Z}_{we} &= j\omega (L_1 - k^2 L_1) = j\omega L_1 (1 - k^2)\end{aligned}\quad (3.1)$$

gdzie: k – współczynnik sprzężenia cewek ($0 < k < 1$),
 M – indukcyjność wzajemna.

Impedancja wejściowa ogranicznika, znajdującego się w stanie nadprzewodzącym, zależy od współczynnika sprzężenia oraz indukcyjności własnej uzwojenia pierwotnego.

Rys. 3.24 przedstawia schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie zwarcia.



Rys. 3.24. Schemat zastępczy ogranicznika znajdującego się w stanie zwarcia

W tym przypadku pracy, oprócz indukcyjności własnych cewek nadprzewodnikowych, reprezentowana jest także rezystancja uzwojenia wtórnego (R_2), będąca rezystancją nadprzewodnika po zaniku nadprzewodzenia. Zależność na impedancję wejściową układu wyraża wzór 3.4:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{we} &= \frac{U_1}{I_1} = j\omega L_1 - \frac{j^2 \omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2} = j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} - \frac{j\omega^3 L_2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \\ \underline{Z}_{we} &= \frac{\omega^2 k^2 L_1 L_2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 k^2 L_1 L_2^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right)\end{aligned}\quad (3.2)$$

W stanie zwarcia, uzwojenie pierwotne musi znajdować się w stanie nadprzewodzącym.

Aby to osiągnąć należy spełnić warunek:

$$I_{C_2} < k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} I_{C_1} \quad (3.3)$$

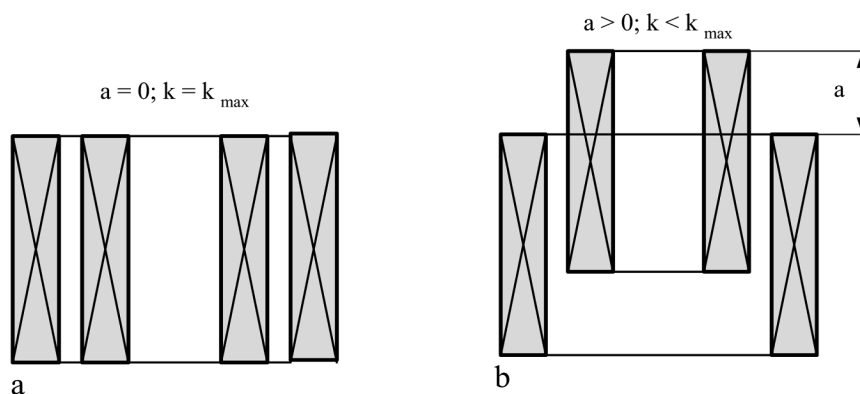
gdzie: I_{C_1} – krytyczna wartość prądu uzwojenia pierwotnego,
 I_{C_2} – krytyczna wartość prądu uzwojenia wtórnego.

Analizując wzory 3.3 i 3.4 można stwierdzić, że aby zmienić wartość impedancji wejściowej ogranicznika, która decyduje o ograniczaniu prądu zwarciovego, należy zmienić wartość współczynnika sprzężenia uzwojenia lub wartość indukcyjności własnej uzwojenia pierwotnego. Zmiana indukcyjności własnej uzwojenia pierwotnego nie wchodzi w tym przypadku w grę, ponieważ wiązałoby to się ze zmianą parametrów uzwojenia (zmiana liczby zwojów, zmiana wymiarów geometrycznych). O wiele łatwiej zmienić jest wartość współczynnika sprzężenia pomiędzy cewkami.

Wartość współczynnika sprzężenia k można wyznaczyć w sposób doświadczalny na podstawie zależności 3.6, [18]:

$$k = \frac{\underline{Z}_z - \underline{Z}_P}{j4\omega\sqrt{L_1L_2}} = \frac{4j\omega M}{j4\omega\sqrt{L_1L_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} \quad (3.4)$$

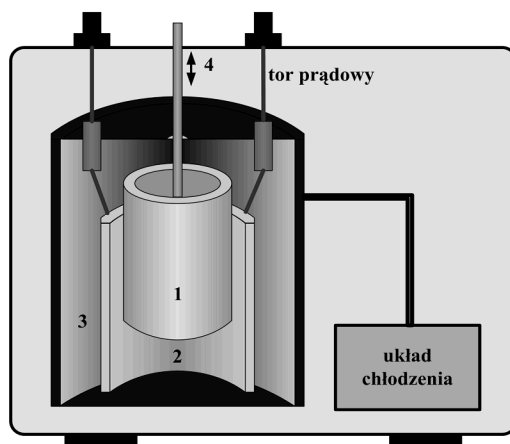
W tym celu łączymy szeregowo cewki ogranicznika, raz zgodnie a drugi raz przeciwnie i mierzymy impedancję przy maksymalnym sprzężeniu, tj., gdy odległość między cewkami wynosi zero (cewki są dokładnie jedna w drugiej jak na Rys. 3.22). Następnie przemieszczamy cewkę wewnętrzną, względem nieruchomej cewki zewnętrznej, na pewną odległość a_1 i ponownie mierzymy wartość impedancji, Rys. 3.25.



Rys. 3.25. Sposób wyznaczania charakterystyki $k = f(a)$ [17]

Pomiary powtarzamy dla odległości a_2 , a_3 , a_3 itd. Znając wyznaczone w ten sposób wartości impedancji przy zgodnym, Z_z i przy przeciwnym Z_p , połączeniu cewek, możemy wyznaczyć charakterystykę $k = f(a)$ ogranicznika. Znajomość tej charakterystyki pozwala na wybór pożądanej wartości sprzężenia między cewkami, a tym samym na wybór poziomu ograniczania prądu.

Techniczną realizacją zmiany współczynnika sprzężenia uzwojeń jest budowa ogranicznika z ruchomym (ślizgowym) uzwojeniem pierwotnym, względem nieruchomego uzwojenia wtórnego Rys. 3.26.

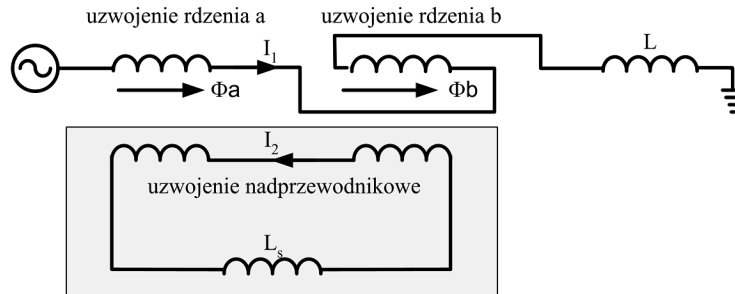


Rys. 3.26. Realizacja techniczna ogranicznika z ruchomym uzwojeniem pierwotnym:
 1 – nadprzewodnikowe uzwojenie pierwotne, 2 – nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne,
 3 – kriostat, 4 – regulacja położenia uzwojenia pierwotnego
 względem nieruchomego uzwojenia wtórnego

3.3.4. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego z dwoma obwodami magnetycznymi i wspólnym uzwojeniem nadprzewodnikowym

Jednofazowy ogranicznik prądu ze wspólnym uzwojeniem nadprzewodnikowym składa się z dwóch niezależnych rdzeni magnetycznych oraz jednego, wspólnego, uzwojenia nadprzewodnikowego prądu stałego, sprzęgającego oba obwody magnetyczne [4], [19]. W normalnych warunkach pracy nadprzewodnik, znajdujący się w stanie nadprzewodzącym przy prądzie stałym, nie oddziałuje na obwód prądu przemiennego a tym samym nie wnosi żadnej impedancji do obwodu chronionego. Ponadto w skład ogranicznika wchodzi dwa konwencjonalne uzwojenia prądu przemiennego. Są one nawinięte na oddzielnych rdzeniach i przeciwnie ze sobą połączone. Takie nawinięcie powoduje, że w każdej chwili czasowej, prąd płynący przez jedno z uzwojeń dodaje się do amperozwojów uzwojenia nadprzewodnikowego,

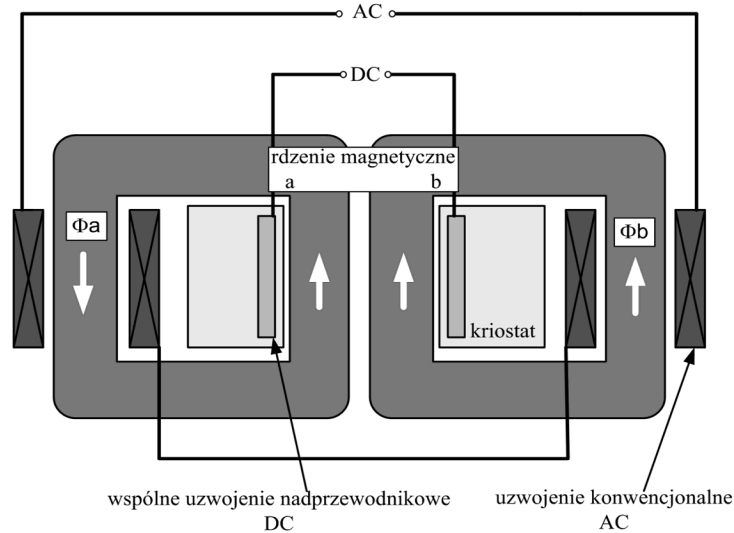
podczas gdy prąd płynący przez drugie – odejmuje się. Schemat elektryczny ogranicznika ze wspólnym uzwojeniem nadprzewodnikowym oraz jego budowę przedstawiono na Rys. 3.27 i Rys. 3.28.



Rys. 3.27. Schemat elektryczny ogranicznika ze wspólnym uzwojeniem nadprzewodnikowym [4]:

Φ_a i Φ_b , - strumienie w rdzeniach a i b, L – indukcyjność obwodu prądu przemiennego,
 L_s – indukcyjność obwodu z uzwojeniem nadprzewodnikowym

W normalnych warunkach pracy prąd stały płynący przez uzwojenie nadprzewodnikowe nie powoduje utraty nadprzewodzenia i przejścia do stanu rezystywnego. Oba rdzenie magnetyczne znajdują się w stanie nasycenia, a ich przenikalność jest mała. Strumienie magnetyczne w obu rdzeniach, indukowane przez uzwojenia konwencjonalne, są skierowane przeciwnie tak, więc suma tych strumieni w uzwojeniu nadprzewodnikowym jest równa zero.



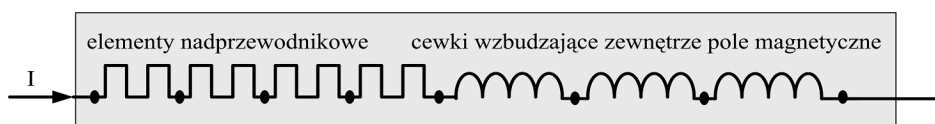
Rys. 3.28 Ogranicznik indukcyjny ze wspólnym uzwojeniem nadprzewodnikowym [20]

W czasie zwarcia, gwałtowny wzrost prądu prowadzi do znacznego zwiększenia przenikalności magnetycznej obu rdzeni magnetycznych. Przy czym w pierwszym półokresie prądu zwarcowego zmienia się przenikalność jednego rdzenia, podczas gdy w drugim – drugiego. Wzrost, w danej chwili, przenikalności jednego rdzenia powoduje, że suma strumieni obu rdzeni, w uzwojeniu nadprzewodnikowym jest różna od zera, co powoduje indukowanie się prądu w uzwojeniu nadprzewodnikowym. Przekroczenie przez prąd indukowany wartości prądu krytycznego nadprzewodnika powoduje jego przejście do stanu rezystywnego. Związany z tym wzrost indukcyjności oddziałuje na uzwojenia prądu przemiennego, powodując ograniczenie prądu zwarcowego. Poziom ograniczania prądu ogranicznika można w prosty sposób określić poprzez dobór odpowiedniej liczby zwojów uzwojeń prądu przemiennego.

Uzwojenie nadprzewodnikowe wykonane jest najczęściej w postaci pierścienia z nadprzewodnika Bi-2212, lecz stosuje się także uzwojenia cylindryczne, wykonane z taśm nadprzewodnikowych Bi-2223.

3.3.5. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu hybrydowego

Koncepcja nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu hybrydowego powstała w wyniku próby poprawienia parametrów pracy ograniczników rezystancyjnych, zwłaszcza skrócenia ich czasu zadziałania [3]. Ograniczniki hybrydowe składają się z elementu nadprzewodnikowego, włączonego szeregowo w obwód chroniony oraz połączonego z nim szeregowo uzwojenia konwencjonalnego, wzbudzającego zewnętrzne pole magnetyczne. Schemat elektryczny ogranicznika przedstawia Rys. 3.29.

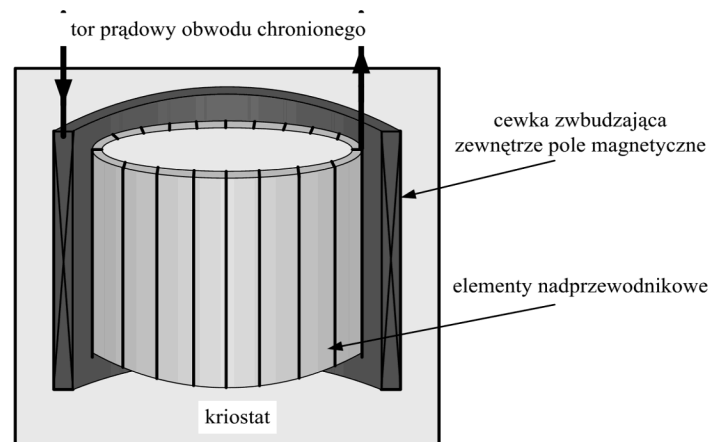


Rys. 3.29. Schemat elektryczny ogranicznika hybrydowego [3]

W normalnych warunkach pracy, gdy prąd w obwodzie nie przekracza wartości krytycznego prądu nadprzewodnika, element nadprzewodnikowy znajduje się w stanie nadprzewodzącym i rezystancja jego jest równa zero. Pole magnetyczne równoległe do powierzchni nadprzewodnika, generowane przez uzwojenie wzbudzające, nie oddziałuje na element nadprzewodnikowy. Po wystąpieniu zwarcia w obwodzie, przejście elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego, a tym samym ograniczenie prądu zwarcowego, spowodowane jest nie tylko przekroczeniem krytycznej wartości prądu nadprzewodnika (jak ma to miejsce w klasycznych ogranicznikach rezystancyjnych), ale także przekroczeniem

krytycznego natężenia pola magnetycznego nadprzewodnika. Prąd zwarciový przepływający przez uzwojenie wzbudzające, generuje pole magnetyczne. Pole to, którego natężenie jest o wiele większe, niż natężenie pola generowanego w normalnych warunkach pracy, zaczyna oddziaływać na nadprzewodnik, powodując szybsze przejście do stanu rezystywnego. Wpływając na wartości tego pola, poprzez odczepy cewki, możemy zmieniać czas zadziałania ogranicznika. Im większe natężenie pola, tym krótszy czas zadziałania ogranicznika.

Techniczną realizacją ogranicznika jest umieszczenie elementu nadprzewodnikowego, wykonanego najczęściej z nadprzewodnika masywnego Bi-2212 lub YBCO, wewnątrz cewki wzbudzającej, wykonanej z drutu miedzianego lub folii aluminiowej, Rys. 3.30.



Rys. 3.30. Nadprzewodnikowy ogranicznik hybrydowy [3]

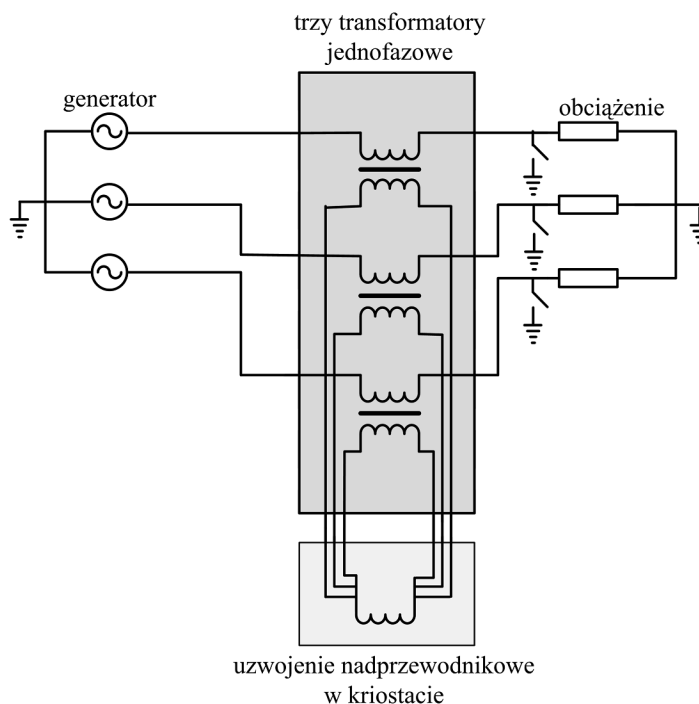
W celu regulacji natężenia pola magnetycznego, generowanego przez cewkę, stosuje się odczepy, w $1/3$, $2/3$ i $3/3$ długości cewki. Nadprzewodnik, chłodzony ciekłym azotem, wraz z uzwojeniem wzbudzającym umieszczony jest w kriosztacie. Prąd do ogranicznika doprowadzany jest za pośrednictwem przepustów prądowych.

3.3.6. Ograniczniki trójfazowe

Ze względów technicznych i ekonomicznych adaptacja jednofazowych nadprzewodnikowych ograniczników prądu do potrzeb sieci trójfazowych jest nieuzasadniona. Prowadzone są aktualnie prace badawcze mające na celu opracowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu przeznaczonych do pracy w sieciach trójfazowych. Efektem tych prac jest powstanie trzech projektów ograniczników trójfazowych, wykorzystujących uzwojenia nadprzewodnikowe.

a) *Trójfazowy ogranicznik prądu z jednym uzwojeniem nadprzewodnikowym*

Rys. 3.31 przedstawia schemat elektryczny trójfazowego ogranicznika prądu z jednym uzwojeniem nadprzewodnikowym [21].



Rys. 3.31. Ogranicznik trójfazowy z jednym uzwojeniem nadprzewodnikowym [21]

Uzwojenie nadprzewodnikowe połączone jest z uzwojeniami wtórnymi trzech transformatorów jednofazowych, których uzwojenia pierwotne włączone są w przewody linii trójfazowej. W normalnych warunkach pracy, przy obciążeniu symetrycznym, suma prądów uzwojeń wtórnych transformatorów jest równa zero, a więc w uzwojeniu nadprzewodnikowym prąd nie płynie.

Przy zwarcii niesymetrycznym, a w szczególności przy jednofazowym zwarciu doziemnym, wypadkowy prąd asymetrii płynący przez uzwojenie nadprzewodnikowe, jest różny od zera. Przekroczenie przez prąd asymetrii krytycznej gęstości prądu nadprzewodnika spowoduje jego przejście do stanu rezystywnego. Wynikiem przejścia jest zanik przepływu prądu w uzwojeniu wtórnym zwartego transformatora, wzrost siły elektromotorycznej w uzwojeniu pierwotnym, a w efekcie obniżenie napięcia wymuszającego prąd zwarcia, a tym samym ograniczenie jego wartości.

Rozpatrywany przypadek jest idealny. W rzeczywistych układach trójfazowych nie można uzyskać całkowitej symetrii obwodu i podczas pracy normalnej, płyną przez uziemione punkty neutralne generatorów i transformatorów pewne prądy, wywołane asymetrią. Suma prądów asymetrii płynących w uzwojeniach wtórnych transformatorów, musi być mniejsza od prądu krytycznego uzwojenia nadprzewodnikowego.

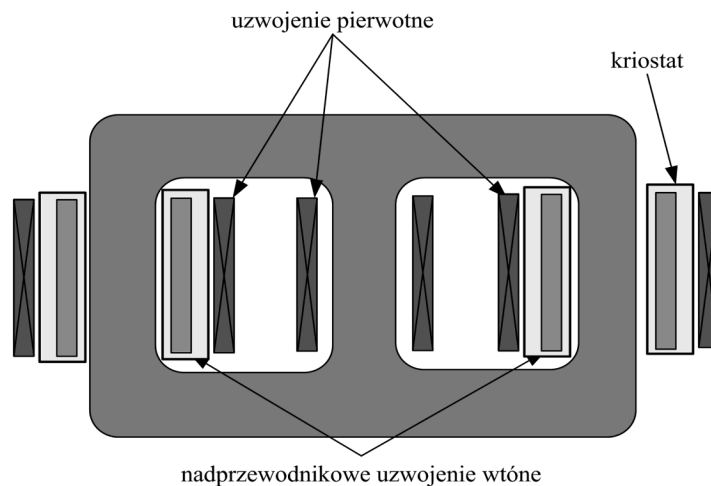
Do wykonania uzwojenia nadprzewodnikowego wykorzystuje się nadprzewodniki wysokotemperaturowe, w postaci taśm, z nadprzewodnika Bi-2223, lub cylindrów z nadprzewodnika Bi-2212.

b) Trójfazowy ogranicznik prądu z dwufazowym obwodem nadprzewodnikowym

Zasada działania i budowy ogranicznika prądu z dwufazowym obwodem nadprzewodnikowym oparta jest na budowie nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego. Ogranicznik ten składa się z trzech konwencjonalnych uzwojeń pierwotnych, umieszczonych na trzech kolumnach rdzenia magnetycznego, oraz dwóch nadprzewodnikowych uzwojeń wtórnych, umieszczonych tylko na kolumnach zewnętrznych.

Uzwojenia nadprzewodnikowe, w postaci cylindrów lub pierścieni, wykonane są z nadprzewodnika wysokotemperaturowego Bi-2212 lub Bi-2223.

Zasada działania ogranicznika opiera się na założeniu, że dwa jednofazowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego mogą ograniczać prąd w układach trójfazowych. Schemat budowy ogranicznika przedstawia Rys. 3.32, [22].



Rys. 3.32. Ogranicznik trójfazowy z dwufazowym obwodem nadprzewodnikowym [22]

W normalnych warunkach pracy, kolumny z wtórnymi uzwojeniami nadprzewodnikowymi, są ekranowane przed strumieniami magnetycznymi, indukowanymi przez miedziane uzwojenia pierwotne. W związku z tym reaktancja uzwojeń pierwotnych jest bardzo mała. W kolumnie środkowej, bez uzwojenia nadprzewodnikowego, indukowany strumień magnetyczny nie może zamykać się przez skrajne kolumny, ekranowane przez uzwojenia nadprzewodnikowe. W związku z tym reaktancja uzwojenia pierwotnego kolumny środkowej również będzie mała.

W warunkach zwarcia w którejkolwiek fazie, wzrostowi wartości prądu w uzwojeniach pierwotnych, towarzyszy wzrost wartości strumieni magnetycznych indukowanych w kolumnach. W chwili, gdy wartość prądu płynącego w uzwojeniach nadprzewodnikowych przekroczy wartość prądu krytycznego nadprzewodnika, nastąpi jego przejście do stanu rezystywnego. Spowoduje to wzrost siły elektromotorycznej w uzwojeniach pierwotnych, co w efekcie doprowadzi do ograniczenia prądu zwarciovego.

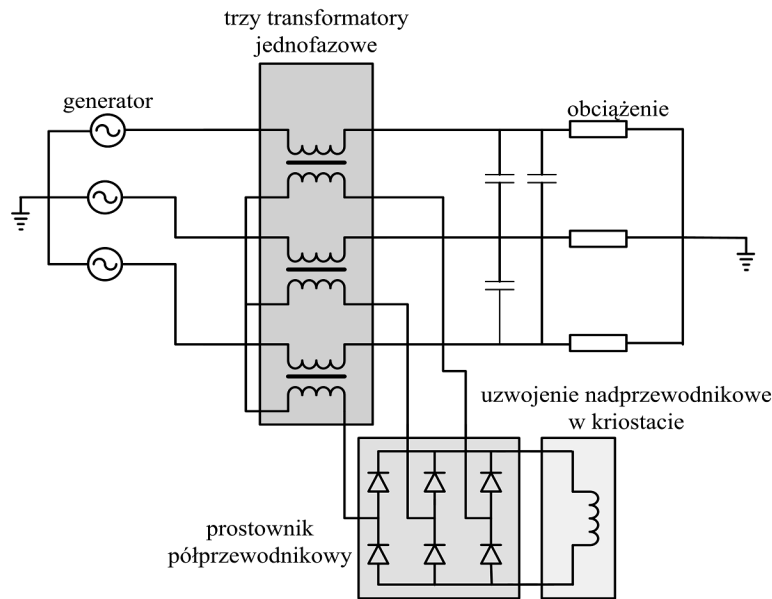
c) Trójfazowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z mostkiem półprzewodnikowym

Schemat trójfazowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z mostkiem półprzewodnikowym przedstawia Rys. 3.33, [23].

Ogranicznik ten składa się z trzech transformatorów jednofazowych, z uzwojeniami pierwotnymi włączonymi do przewodów linii trójfazowej, diodowego mostka prostowniczego, oraz uzwojenia nadprzewodnikowego. Uzwojenie to połączone jest z uzwojeniami wtórnymi transformatorów poprzez mostek prostowniczy. Mostek prostowniczy, konwertuje prąd przemienny w uzwojeniach wtórnych transformatorów na prąd stały płynący przez uzwojenie nadprzewodnikowe. Prąd ten jest proporcjonalny do wartości szczytowej napięcia w uzwojeniach wtórnych.

W normalnych warunkach pracy, przy obciążeniu symetrycznym, suma prądów uzwojeń wtórnych transformatorów jest równa zero, a więc w uzwojeniu nadprzewodnikowym prąd nie płynie.

Przy zwarcu niesymetrycznym, wzrost prądu w jednej z faz spowoduje pojawienie się w obwodzie wtórnym transformatorów wypadkowego prądu asymetrii różnego od zera. Prąd ten, wyprostowany przez mostek diodowy, przepływając przez uzwojenie nadprzewodnikowe, powoduje przejście nadprzewodnika do stanu rezystywnego, po przekroczeniu wartości prądu krytycznego. Pojawienie się dużej rezystancji na zaciskach mostka, powoduje zablokowanie diod półprzewodnikowych, czemu towarzyszy wzrost impedancji mostka, a w efekcie ograniczenie prądu zwarciovego.



Rys. 3.33. Ogranicznik trójfazowy z mostkiem półprzewodnikowym [23]

Podobnie jak w ogranicznikach z jednym uzwojeniem nadprzewodnikowym, uzwojenie ogranicznika z mostkiem półprzewodnikowym wykonuje się z nadprzewodnika wysokotemperaturowego Bi-2223 w postaci taśm, lub Bi-2212, w postaci cylindrów.

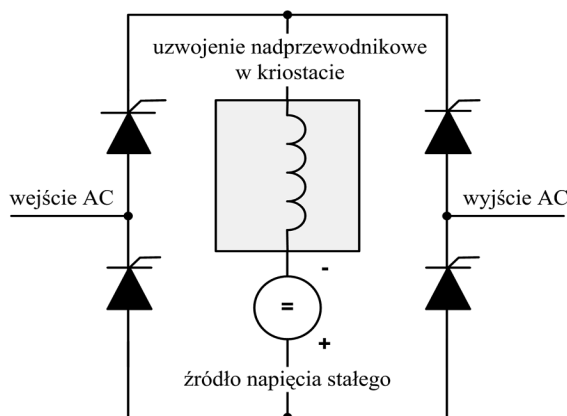
3.4. Ogranicznik z uzwojeniem nadprzewodnikowym w układzie mostka tyrystorowego

Zasada pracy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w układzie mostka tyrystorowego, (Rys. 3.34) oparta jest na nieliniowej charakterystyce pracy elementów półprzewodnikowych, współpracujących z elementem nadprzewodnikowym [1].

Ogranicznik ten składa się z mostka tyrystorowego, włączonego bezpośrednio do obwodu chronionego, oraz gałęzi z uzwojeniem nadprzewodnikowym i źródłem napięcia stałego, polaryzującego bramki tyrystorów.

W normalnych warunkach pracy nadprzewodnik znajduje się w stanie nadprzewodzącym przy prądzie stałym, nie wnosząc tym samym żadnej impedancji do zabezpieczanej linii. Jak długo prąd stały, polaryzujący bramki tyrystorów, jest mniejszy od prądu w obwodzie chronionym, tak długo tyrystory przewodzą i prąd przepływa przez mostek bez ograniczania. W chwili pojawienia się zwarcia w obwodzie chronionym, prąd płynący przez tyrystory wzrasta, a po przekroczeniu

wartości prądu polaryzacji bramek, tyrystory zaczynają przechodzić parami do stanu blokowania. Każda z par tyrystorów na przemian przewodzi i blokuje prąd zwarciový w każdym półokresie, załączając tym samym gałąź z uzwojeniem nadprzewodnikowym na przepływ prądu zwarciový. Prąd ten, po przekroczeniu krytycznej wartości prądu nadprzewodnika, powoduje jego przejście do stanu rezystywnego i tym samym gwałtowny wzrost impedancji układu, prowadzące do ograniczenia prądu zwarciový. Po ustąpieniu zwarcia tyrystory podejmują na nowo przewodzenie prądu, odcinając tym samym wpływ uzwojenia nadprzewodnikowego.



Rys. 3.34. Ogranicznik nadprzewodnikowy w układzie mostka tyrystorowego [1]

Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu w układzie mostka tyrystorowego posiada wiele potencjalnych zalet w stosunku do innych typów ograniczników nadprzewodnikowych. Można tu wymienić: automatyczne załączanie uzwojenia nadprzewodnikowego do obwodu chronionego, szybkie zadziałanie w pierwszym półokresie prądu zwarciový, dużą sprawność, oraz, co jest najważniejsze, możliwość bardzo precyzyjnego ustawienia prądu wyzwalań ogranicznika. Można to osiągnąć poprzez określenie wartości prądu stałego, polaryzującego bramki tyrystorów, przekroczenie, którego spowoduje zadziałanie ogranicznika.

4. OGRANICZNIKI REZYSTANCYJNE

4.1. Wprowadzenie

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu (SFCL) stanowią najbardziej perspektywiczny obszar zastosowania wysokotemperaturowych nadprzewodników. Włączone w obwód, w stanie nadprzewodnictwa, nie wprowadzają żadnych istotnych obciążeń sieci. Przy przekroczeniu granicznej wartości prądu obciążenia sieci, przechodzą szybko do stanu rezystywnego wprowadzając rezystancję umożliwiającą ograniczenie prądu w sieci.

Idea nadprzewodnikowych ograniczników prądu powstała już 20 lat temu. Jednak koszty budowy, wymiary, waga i przede wszystkim koszty eksploatacji nie pozwalały na realizację tej idei. Istniejące wtedy klasyczne nadprzewodniki charakteryzowały się zerową rezystancją w stanie nadprzewodnictwa, znaczną rezystancją w stanie normalnym i krótkim czasem przejścia z jednego do drugiego stanu. Dla uzyskania stanu nadprzewodnictwa wymagały jednak schłodzenia do temperatury kilku K. Taką temperaturę uzyskać można jedynie przy użyciu ciekłego helu, a utrzymanie tej temperatury wiązało się z ciągłym dostarczaniem ciekłego helu do ogranicznika. Wysokie koszty zakupu helowej skraplarki uniemożliwiały racjonalne wykorzystanie nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.

W ostatnich latach, kiedy masowo zaczyna się produkować wysokotemperaturowe ceramiczne nadprzewodniki (HTS), których koszty chłodzenia poniżej ich krytycznej temperatury są niewielkie, idea budowy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu szybko została zrealizowana.

Najważniejszymi parametrami ograniczników prądu są: napięcie nominalne i prąd nominalny. Z ekonomicznego punktu widzenia istotną rolę odgrywają też straty AC w ograniczniku, które określają niezbędną moc układu chłodzącego dla utrzymania w stanie nadprzewodzącym nadprzewodnikowe elementy ogranicznika.

Od materiału przeznaczonego na ogranicznik prądu typu rezystancyjnego wymaga się: znikomej rezystancji przy normalnej pracy zabezpieczanej sieci, znacznej rezystancji w procesie ograniczania prądu w sieci, szybkiego powrotu do stanu nadprzewodnictwa po ustaniu konieczności ograniczania prądu i niezawodności działania.

W ciągu ostatnich kilku lat odkryto wiele materiałów, które można zastosować w ogranicznikach nadprzewodnikowych. Najbardziej obiecującymi przy projektowaniu nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego są materiały: YBCO, Bi-2212, Bi-2223 (Tab2.2).

Technologia produkcji tych materiałów została już na tyle dobrze opracowana, że można było rozpocząć produkcję na większą skalę nadprzewodnikowych elementów dla ograniczników SFCL. Najczęściej spotykanymi metodami ich otrzymania to metoda spiekania, wytapiania, oraz metoda otrzymywania

cienkich warstw. Prowadzone są prace nad uzyskaniem nowych materiałów nadprzewodnikowych HTS. Jednym z kryteriów określającym ich przydatność do wykonania ograniczników jest wielkość rezystancji resztkowej. Przyjmuje się, że jej wartość nie może przekraczać $1 \mu\Omega/\text{cm}$.

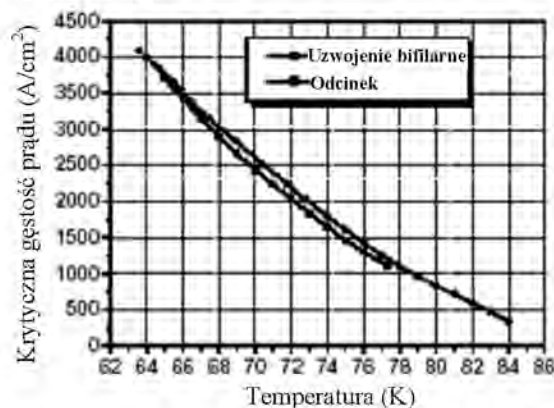
Niektóre materiały HTS posiadają polikrystaliczną strukturę. Rezystancja na granicy kryształów sprawia, że nawet w temperaturze nadprzewodnictwa materiały te wykazują pewną rezystancję. W materiałach tych wspomniane wyżej kryterium wielkości rezystancji resztkowej, dla określania ich przydatności dla SFCL, nie jest właściwe.

4.2. Materiały nadprzewodnikowe wykorzystywane przy konstrukcji ograniczników prądowych typu rezystancyjnego

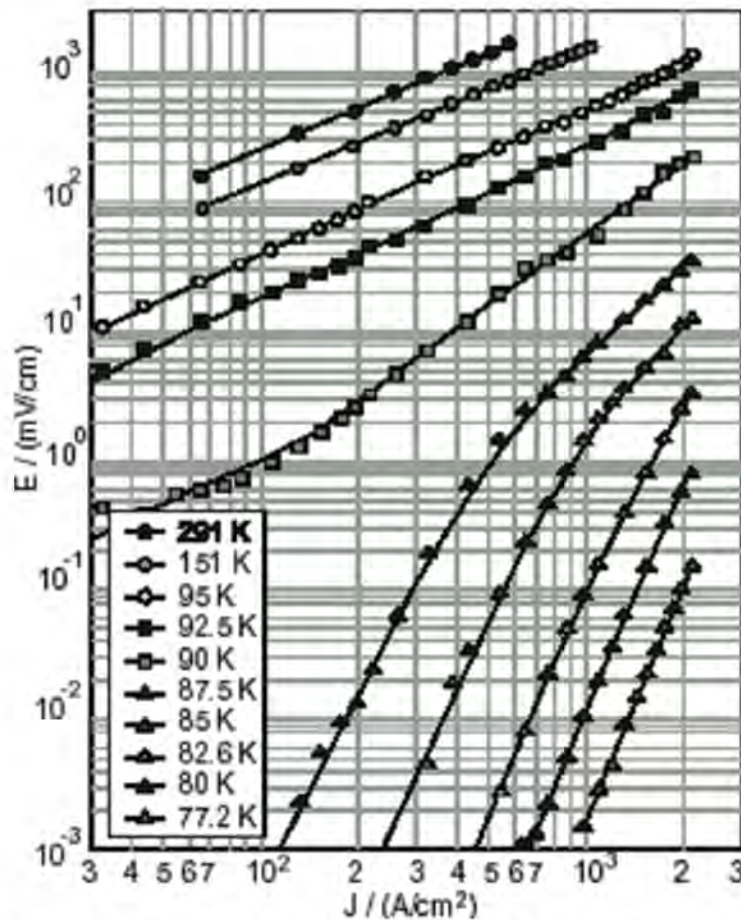
W technologii budowy ograniczników prądowych stosuje się materiały nadprzewodnikowe II rodzaju Bi-2223, Bi-2212 oraz YBCO123 (Tab. 2.2).

Materiały Bi-2223 oraz Bi-2212 są najczęściej wykorzystywane do produkcji przewodów HTS i przepustów HTS. Materiał Bi-2223 wykonany jest metodą spiekania. Jego budowa strukturalna ma postać $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$. Budowa jego ma postać krystaliczną a temperatura krytyczna wynosi 110 K. W temperaturze ciekłego azotu wartość krytycznej gęstości prądu osiąga $2,65 \times 10^7 \text{ A/m}^2$.

Materiał Bi-2212 jest jednym z bardziej znanych i wykorzystywanych materiałów nadprzewodnikowych. Jego budowa strukturalna ma postać $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$. Krytyczna temperatura tego nadprzewodnika wynosi 125 K. Gęstości prądu uzyskiwane w krótkich próbkach oraz ogranicznikach typu bifilarnego wykonanych z tego materiału przedstawia Rys. 4.1.



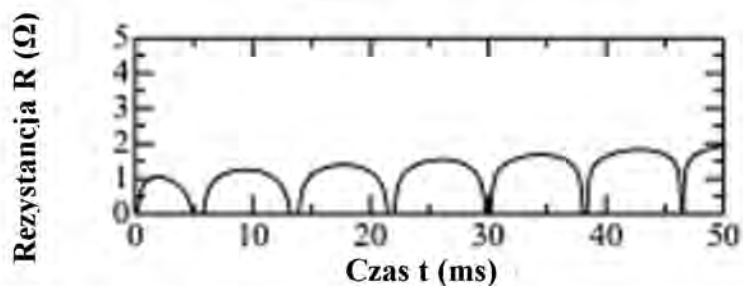
Rys. 4. 1. Zależność krytycznej gęstości prądu J_c od temperatury dla krótkiej próbki i dla układu bifilarnego wykonanych z materiału Bi-2212 [8]



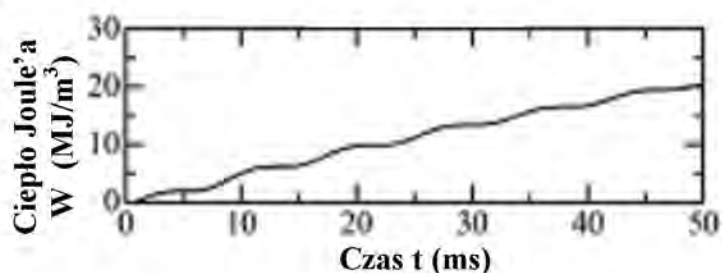
Rys. 4. 2. Natężenie pola elektrycznego nadprzewodnika Bi-2212 w funkcji gęstości prądu dla różnych wartości temperatur [2]

Dla większości nadprzewodnikowych materiałów istnieje silna zależność między maksymalną wartością krytyczną prądu a temperaturą tego nadprzewodnika. Zależność tę dla materiału BSCCO 2212 przedstawia Rys. 4.2.

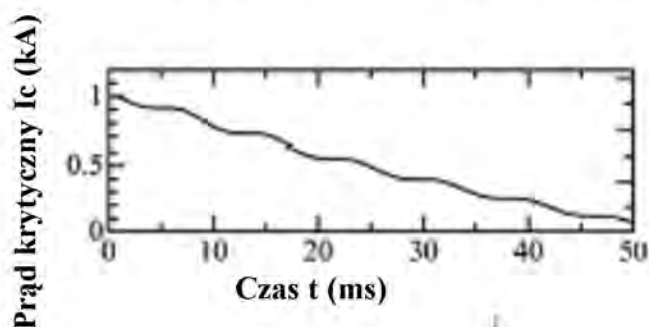
Jeżeli wartość prądu płynącego przez masywny element z takiego nadprzewodnika przekroczy wartość krytyczną, to pojawi się w nim faza rezystywna i jego temperatura wzrośnie redukując wartość krytyczną prądu [2]. Obniżenie wartości prądu powoduje ponowne przywrócenie stanu nadprzewodnictwa. Włączając taki element do obwodu prądu zmiennego, można obserwować, w przypadku prądu przekraczającego wartość krytyczną, pojawianie się i zanikanie strefy rezystywnej (Rys. 4.3.). Ilość wydzielanego ciepła w funkcji czasu, dla elementu nadprzewodnikowego włączonego do takiego obwodu, przedstawia Rys. 4.4. Zmianę wartości prądu krytycznego takiego elementu w tym procesie przedstawia Rys. 4.5.



Rys. 4. 3. Pojawianie się i zanikanie strefy rezystywnej w elemencie wykonanym z nadprzewodnika i włączonym w obwód prądu zmiennego [3]



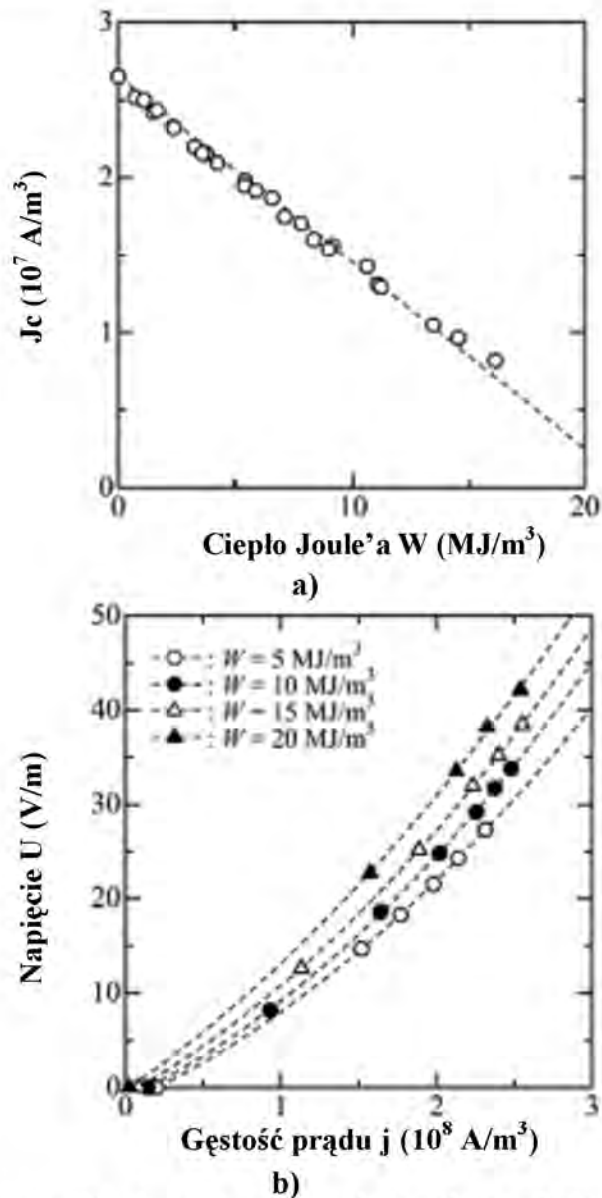
Rys. 4. 4. Ciepło wydzielane w nadprzewodniku włączonym obwód prądu zmiennego [3]



Rys. 4. 5. Zmiana krytycznej wartości prądu w funkcji czasu dla elementu nadprzewodnika włączonego w obwód prądu zmiennego [3]

Ilość ciepła, jaka wydzielą się w czasie, kiedy w nadprzewodniku istnieje strefa rezystywna, limituje gęstość krytyczną tego prądu. Zależność tę dla materiału Bi-2223 pokazuje Rys. 4.6.

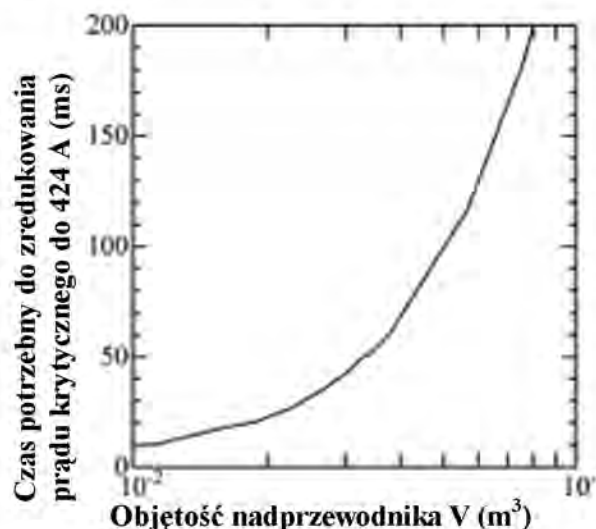
W oparciu o charakterystykę prądową nadprzewodnika określić można jego charakterystykę napięciową. Pokazuje to Rys. 4.6.



Rys. 4. 6. Zmiana wartości krytycznej prądu nadprzewodnika w funkcji mocy cieplnej wydzielanej przy przepływie prądu zmiennego (a).
oraz charakterystyka napięciowa tego nadprzewodnika (b) [3].

Przy ustalonym przekroju nadprzewodnika wartość napięcia na ograniczniku zależy od długości elementu nadprzewodnikowego. Wartość prądu ograniczanego można zmieniać przez zmianę rezystancji ogranicznika SFCL, to jest zmieniając długość nadprzewodnika. Ale przy projektowaniu takiego ogranicznika uwzględnić

trzeba zjawisko zmniejszania się gęstości ciepła Joule'a ze wzrostem objętości nadprzewodnika. Konsekwencją tego będzie zmiana czasu reakcji ogranicznika w sytuacji, kiedy nastąpi przeciążenie w sieci. Czas przełączania będzie się wydłużać wraz ze wzrostem objętości nadprzewodnikowego elementu. Zależność tą dla Bi-2223 pokazuje Rys. 4.7.



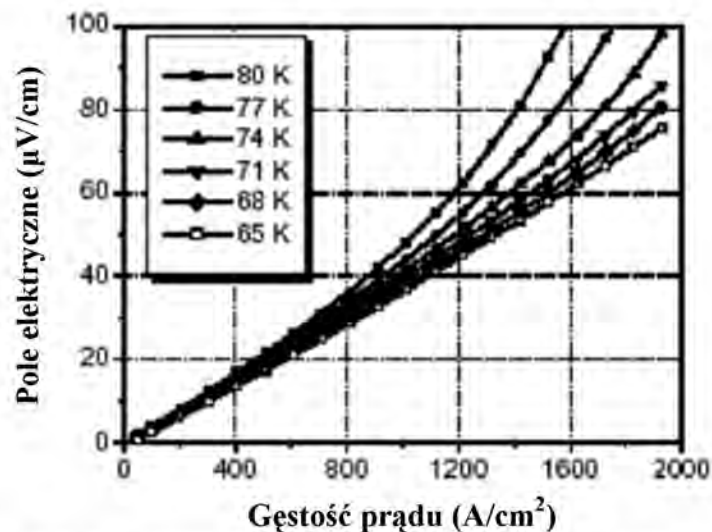
Rys. 4. 7. Czas niezbędny do ograniczenia prądu od wartości 1000A do 424A w funkcji objętości użytego w ograniczniku nadprzewodnika [3]

4.2.1 Polikrystaliczne materiały nadprzewodnikowe

W badaniach nad zastosowaniem nadprzewodnikowych ograniczników prądu często wykorzystywany jest materiał YBCO[3]. Jego budowa strukturalna ma postać $YBa_2Cu_3O_7$. Materiał YBCO ma polikrystaliczną budowę. Mimo, że wykonywanie dużych elementów jest dosyć proste, materiał ten jest mało homogeniczny, ma niższą gęstość krytyczną prądu J_c . Ponadto wartość tego prądu wykazuje dużą zależność od wartości zewnętrznego pola magnetycznego. Rozkład gęstości prądu w takim elemencie jest nierównomierny, co powodować może miejscowe przegrzanie. Pewną wartość rezystancji materiał ten ma nawet przy niewielkich wartościach prądu. W temperaturze ciekłego azotu rezystywność jego wynosi ok. 10 nΩ cm.

Badania wykazują, że nadprzewodnikowy element ogranicznika rezystancyjnego wykonany z polikrystalicznego materiału YBCO, posiada rezystancję resztkową, która jest wypadkową rezystancji istniejącej na granicy kryształów nadprzewodnikowych. W odróżnieniu od krystalicznego materiału nadprzewodnikowego, zmiana temperatury słabo wpływa na maksymalną wartość

gęstości prądu w nadprzewodniku wykonanym z materiału polikrystalicznego. Materiał YBCO w odróżnieniu od innych opisywanych materiałów HTS, charakteryzuje się nieznacznym tylko wzrostem gęstości prądu wraz z obniżaniem temperatury. Ze względu na znaczny wzrost kosztów chłodzenia urządzeń poniżej temperatury 77K, nie jest celowa eksploatacja urządzeń z YBCO poniżej tej temperatury. Ulepszenie technologii otrzymywania tego materiału poprzez domieszkowanie innymi metalami pozwoli na znaczne poprawienie jego parametrów elektrycznych. Już obecnie otrzymano próbki, w których gęstość prądu sięga 5 kA/cm^2 . Typowe gęstości prądu uzyskiwane w tym materiale przedstawia wykres na Rys. 4.8. Widać słabą zależność gęstości prądu od temperatury.



Rys. 4. 8. Natężenie pola elektrycznego w funkcji gęstości prądu dla różnych temperatur nadprzewodnika YBCO 123 [8]

Materiał ten wykorzystuje się w ogranicznikach prądu, w których element nadprzewodnikowy wykonany jest w technologii cienkowarstwowej, dla otrzymywania ograniczników mających kształt meandrów. Wykonuje się również z niego pręty o długości ponad 100 mm i średnicy kilku milimetrów. Taki pręt wytrzyma, bez negatywnych konsekwencji, szybkie zmiany temperatury w procesie przejścia trwającego nawet 1 s. Jednak dla uzyskania odpowiedniej wartości rezystancji, ogranicznik wykonać trzeba z wielu takich prętów połączonych w szereg. Stosowane technologie łączenia prętów powodują pojawienie się w miejscach połączeń zbyt dużej rezystancji, co nie pozwala na razie na budowę takiego ogranicznika.

4.2.2 *Materialy stopowe*

Materialy stopowe mają wyższą (w stosunku do polikrystalicznych) wartość J_c , ale ich produkcja jest trudniejsza i bardziej czasochłonna. Wymagany jest przy tym odpowiedni dobór komponentów, w ściśle określonych proporcjach. Otrzymanie stopu o ukierunkowanej strukturze, posiadającego własności nadprzewodnika, łączy się ze ścisłym przestrzeganiem warunków procesu produkcji jak np. wygrzewanie końcowe materiału do ok. 1000°C a następnie schładzanie do temperatury 920°C z prędkością 0,5°C na godzinę. Proces produkcji musi być tak zaplanowany by uniknąć mikropęknięć i naprężeń mechanicznych materiału.

4.2.3 *Materialy cienkowarstwowe*

Materialy cienkowarstwowe, przeznaczone na budowę SFCL, wykonuje się z BSCCO 2212 oraz z YBCO. Wykonanie cienkich warstw polega na pokrywaniu powierzchni ceramicznych lub metalowych warstwą nadprzewodnika tworzącą polikrystaliczną strukturę. Możliwe jest też otrzymywanie epitaksjalnej warstwy nadprzewodnikowej, jednak otrzymanie większych jej wymiarów jest trudne, kosztowne i czasochłonne.

Technologia otrzymywania cienkich warstw jest jednak bardzo perspektywiczna i obecnie aktywnie rozwijana. Wysiłki skierowane są przede wszystkim na zwiększenie gęstości prądu w materiale nadprzewodnikowym. Już teraz poddaje się polikrystaliczne warstwy odpowiedniej obróbce cieplnej (wygrzewanie, topienie i kontrolowane stygnięcie) w procesie, w którym następuje krystalizacja materiału nadprzewodnikowego. Umożliwia to zwiększenie wartości krytycznej prądu nadprzewodnika z kilkuset do ponad 1000 A/cm².

Innym sposobem poprawienia parametrów elektrycznych cienkiej warstwy nadprzewodnika jest domieszkowanie warstwy YBCO platyną. Krytyczne gęstości prądu takiej warstwy osiągają 1800-2000 A/cm². Pomyślne przeprowadzono próby domieszkowania cienkiej warstwy na elemencie cylindrycznym osiągając krytyczną gęstość prądu powyżej 1700 A/cm².

4.3. *Materialy konstrukcyjne nadprzewodnikowych ograniczników prądowych*

4.3.1 *Izolacja elektryczna w nadprzewodnikowych ogranicznikach*

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu są urządzeniami pracującymi w specyficznych warunkach. Pracują w kriogenicznych temperaturach (od ok. 64 K) w atmosferze azotu lub zanurzone w ciekłym azocie. Z racji swojego

zadania poddawane zostają silnym stresom termicznym. Od tego typu ogranicznika oczekuje się szybkiego schładzania po ustaniu obciążenia, oraz szybkiego nagrzewania w całej objętości w sytuacji pojawienia się przeciążenia. Gwałtownym zmianom temperatury towarzyszyć będą znacznej wielkości mechaniczne naprężenia, które w skrajnym przypadku uszkodzić mogą nadprzewodnikowy materiał.

Ograniczniki pracują często w sieciach wysokiego napięcia. Planowana jest budowa ogranicznika nadprzewodnikowego prądu dla sieci 200 - 300 kV. Wytrzymałość na przebicie stosowanej izolacji musi być odpowiednio wysoka. Badania nad wytrzymałością takiej izolacji uwzględniać muszą nie tylko niską temperaturę i atmosferę pracy ogranicznika, ale także zmiany warunków przebicia elektrycznego w sytuacji, w której gwałtownie wzrasta temperatura elementu nadprzewodnikowego a ciecz chłodząca zmienia się w gaz.

Dlatego materiał izolacji cechować musi: - dostatecznie wysoka mechaniczna wytrzymałość w niskiej temperaturze; -wystarczająco duży moduł plastyczności w niskiej temperaturze (dla uniknięcia pęknięcia i kruszenia się izolacji), - wysoka wartość napięcia przebicia; - wartość współczynnika rozszerzalności bliska współczynnikowi rozszerzalności materiału nadprzewodnikowego.

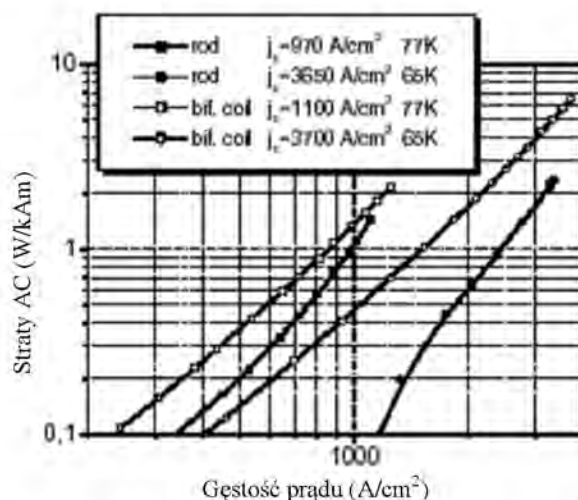
4.4. Straty energetyczne nadprzewodnikowego ogranicznika w obwodzie prądu zmiennego

Na ekonomiczność pracy SFCL bardzo duży wpływ ma wielkość strat zmiennoprądowych (AC). Przy badaniu tych strat mocy w ogranicznikach prądu typu rezystancyjnego, wykonanych w różnych technologiach, widać dużą zależność wartości tych strat od przyjętej technologii.

W ogranicznikach o podobnych parametrach wykonanych z tych samych materiałów, straty AC różnią się znacznie w zależności od kształtu i technologii wykonania elementu nadprzewodnikowego. Najmniejsze straty występują w ogranicznikach meandrowych i masowych prętowych (rdzeniowych), a nieco większe w ogranicznikach wykonanych w technologii bifilarnej. Rysunki 4.9 – 4.11 przedstawiają straty AC w ogranicznikach wykonanych z różnych materiałów i o różnej konstrukcji: meandrowej, prętowej i bifilarnej. Na Rys. 4.9. przedstawione są straty AC w ogranicznik prądu wykonanego z materiału polikrystalicznego dla różnych wartości temperatury.

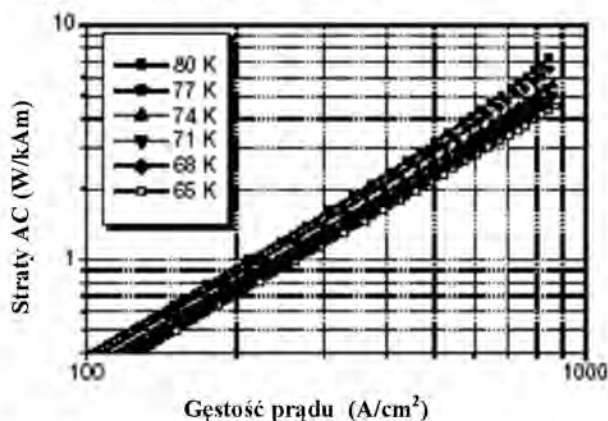
W ograniczniku prądowym wykonanym z Bi-2212 w kształcie bifilarnego uzwojenia, straty sięgają 2 W/m. W ogranicznikach wykonanych z YBCO straty te są znacznie większe i wynoszą ok. 10 W/m (Rys. 4.11). Straty te, przy porównywalnych gęstościach prądu i przy niewielkich jego wartościach są proporcjonalne do I^2 , co świadczy, że wynikają one z rezystancji na granicy ziaren nadprzewodnikowych. Modyfikując ten materiał i obniżając temperaturę

ogranicznika z 80 K do 65 K, straty AC można znacznie obniżyć. Zmiana technologii chłodzenia umożliwi dalszą redukcję tych strat.



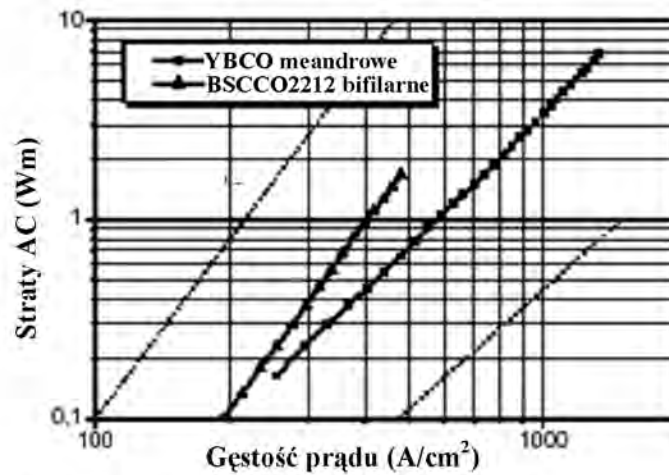
Rys. 4. 9. Straty AC w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu o konstrukcji prętowej i bifilarnej [8]

Straty AC w ogranicznikach prądu typu rezystancyjnego są na ogół małe. Należy jednak pamiętać, że zastosowanie tego typu ogranicznika w miejscu, w którym występuje nawet niewielkie pole magnetyczne, zwiększa znacznie straty AC, które należy uwzględnić przy konstrukcji ogranicznika.



Rys. 4. 10. Straty w nadprzewodnikowym ograniczniku prądu wykonanym z materiału polikrystalicznego o konstrukcji prętowej [8]

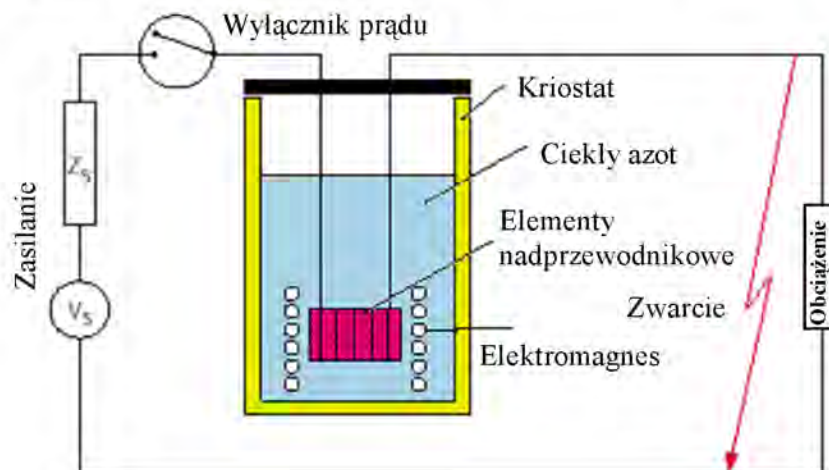
Należy przy tym zwracać uwagę na orientację pola magnetycznego względem nadprzewodnika ze względu na znacznie większą zależność wartości prądu krytycznego nadprzewodnika od składowej prostopadłej indukcji magnetycznej.



Rys. 4. 11. Straty AC w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu o konstrukcji meandrowej i bifilarnej [5]

Właściwość ta wykorzystywana może być w układach sterowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego.

W sytuacji przekroczenia wartości prądu ograniczenia w sieci, pole magnetyczne inicjowane w cewce umieszczonej w pobliżu elementu nadprzewodnikowego, powoduje redukcję wartości krytycznej prądu. Element nadprzewodnikowy ogranicznika przechodzi do stanu rezystywnego ograniczając prąd w sieci. Schemat takiego układu przedstawia Rys. 4.12 a, a charakterystykę prądową w czasie przejścia Rys. 4. 12 b



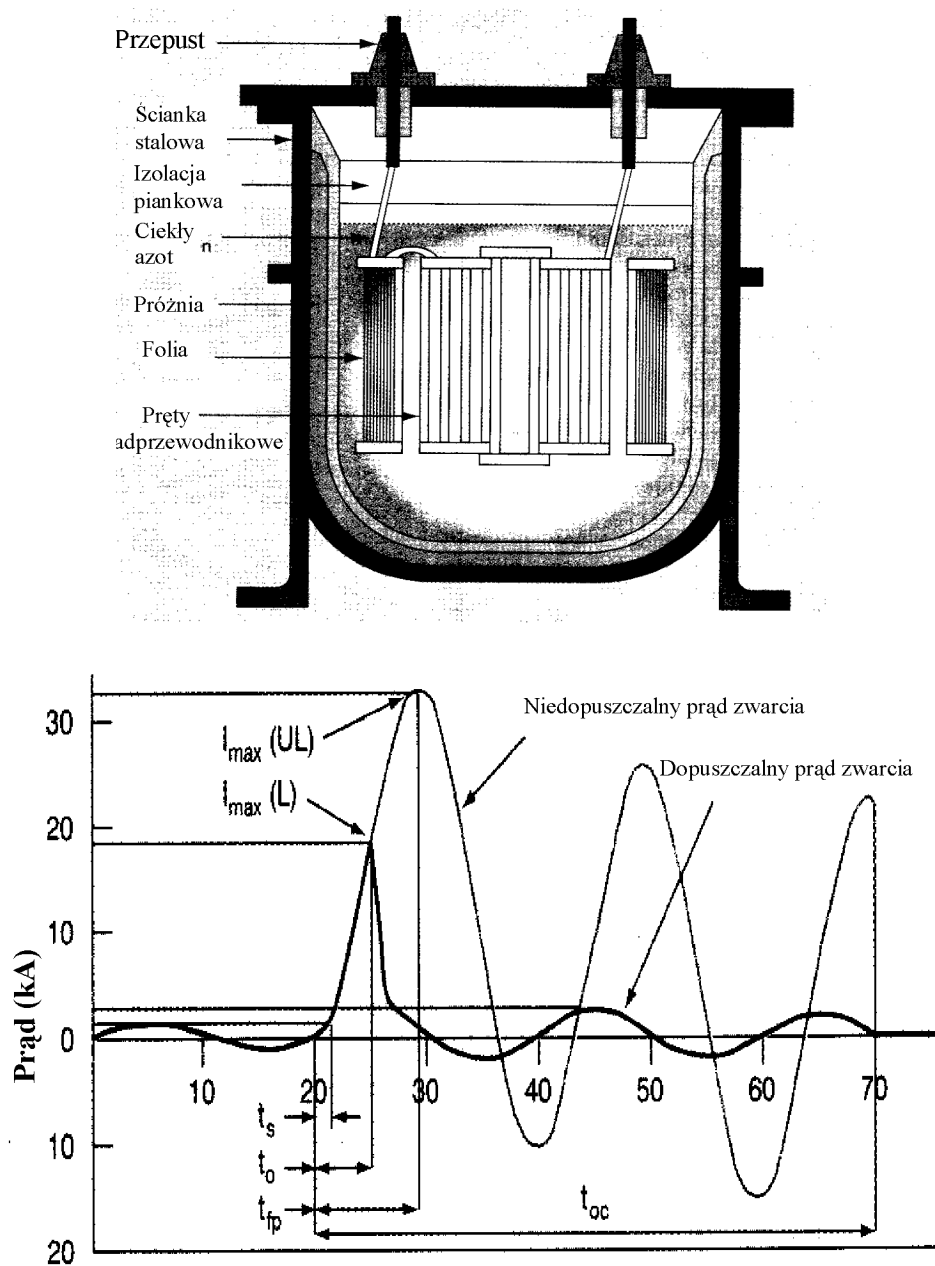
Rys. 4.12.a Schemat budowy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu ze sterowaniem za pomocą pola magnetycznego [10]



Rys. 4. 12. b Wykres zależności $i(t)$ w czasie działania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu ze sterowaniem za pomocą pola magnetycznego [10]

Podobny model sterowanego polem magnetycznym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego wykonanego na Uniwersytecie w Cambridge przedstawia Rys. 4.13.

Porównując straty AC w przedstawionych nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu widać, że wartości tych strat zależą nie tylko od materiałów, z jakich są wykonane, ale i od technologii wytwarzania i kształtu elementów nadprzewodnikowych. Badania nad udoskonaleniem technologii wytwarzania materiałów i konstrukcji ograniczników pokazują, że możliwości w zakresie poprawienia parametrów elektrycznych, są bardzo duże. Najbardziej perspektywiczna do zastosowania w konstrukcjach SFCL wydaje się być technologia cienkich warstw. Przy jej zastosowaniu otrzymuje się, jak dotychczas, najwyższe gęstości prądu. Technologia ta umożliwia ponadto pełną automatyzację procesu wytwarzania elementów nadprzewodnikowych ograniczników prądów zwarciovych.



Rys. 4. 13. Przekrój modelu ogranicznika prądu sterowanego zewnętrznym polem magnetycznym wykonanego na Uniwersytecie Cambridge i przebieg prądu.

4.5. Zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego

Ograniczniki typu rezystancyjnego mają niewielki ciężar w stosunku do ograniczników typu indukcyjnego, niewielkie wymiary, prostą konstrukcję i z racji swojej prostoty działania duże perspektywy zastosowania. Nowe nadprzewodnikowe materiały jak YBCO, Bi-2212, Bi-2223 (Tab. 2.2) oraz możliwość otrzymania ich różnorodnej konfiguracji (pierścienie, cienkie warstwy itd.), różne formy ich otrzymywania, jak np. wykonanie stopów, możliwość odlewu różnych form, dają możliwość powielania konstrukcji rezystancyjnego typu ograniczników, z wysokim stopniem odwzorowania. Przy komercyjnym zastosowaniu nadprzewodnikowych ograniczników typu rezystancyjnego daje im to pewną przewagę nad nadprzewodnikowymi ogranicznikami typu indukcyjnego. Kolejnym etapem będzie automatyzacja procesu produkcji elementów takich ograniczników.

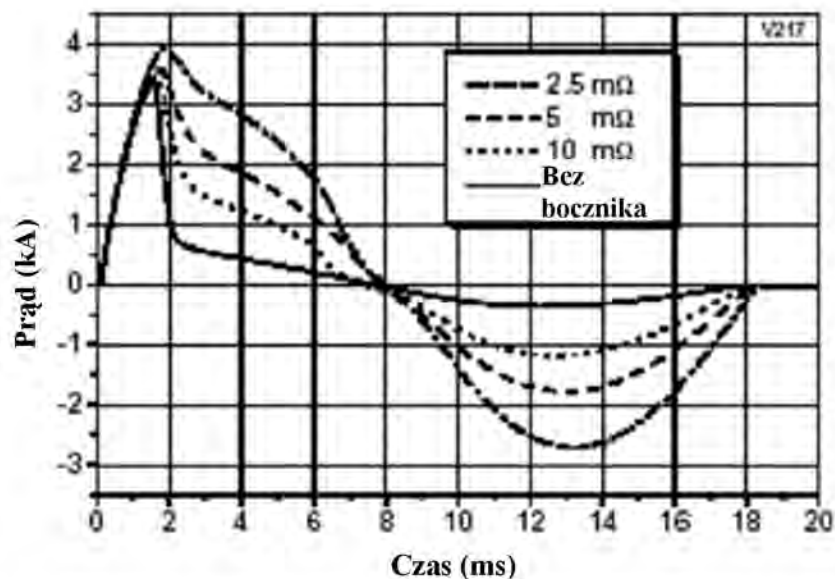
Należy jednak dodać, że ze względu na bezpośrednie włączenie w obwód sieci nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego, w pierwszej fazie ograniczenia, cały prąd płynie przez ten ogranicznik. Istnieje ryzyko, że temperatura nadprzewodnika może w sposób niekontrolowany wzrosnąć powyżej wartości dopuszczalnej, co w konsekwencji doprowadzić może do zniszczenia całego ogranicznika prądu. Dlatego chłodzenie elementu nadprzewodnikowego na całej jego długości i zapewnienie możliwości bocznikowania prądu w procesie przechodzenia ogranicznika ze stanu nadprzewodnictwa do stanu rezystywnego wymagają szczególnej uwagi. Dotyczy to zarówno kontaktu elektrycznego jak i cieplnego między nadprzewodnikiem a bocznikującym go metalem normalnym. Ponieważ nie opracowano jeszcze wystarczająco dobrej i niezawodnej metody łączenia tych dwóch elementów, dlatego przy stosowaniu tego typu ogranicznika, dla zabezpieczenia przed ryzykiem uszkodzenia elementu nadprzewodnikowego, należy zastosować, dodatkowy szybki wyłącznik konwencjonalny.

4.6. Rola bocznika w nadprzewodnikowych ogranicznikach rezystancyjnych

W ogranicznikach nadprzewodnikowych typu rezystancyjnego, bocznik odgrywa istotną rolę. Jakkolwiek działanie ogranicznika typu rezystancyjnego bez bocznika jest możliwe, to we wszystkich projektach opisanych w publikacjach jest zastosowany. Przyczyną są procesy przejściowe w zabezpieczanej sieci, jak też niedoskonałości materiału HTS z którego wykonany jest ogranicznik.

Ogranicznik bez bocznika, włączony szeregowo w obwód zabezpieczany, w przypadku przeciążenia, reaguje bardzo szybko przejściem do stanu rezystywnego. Ze względu jednak na indukcyjność obwodu powstawać mogą

niebezpieczne przepięcia. Ponadto, ze względu na niehomogeniczność materiału nadprzewodnikowego, w różnych jego punktach powstawać będą lokalne przegrzania, które mogą zniszczyć ogranicznik. Bocznik zabezpiecza przed przegrzaniem i zniszczeniem nadprzewodnika przy jego przejściu do stanu rezystywnego. Zapewnić też musi szybką dyssypację ciepła w całej objętości nadprzewodnika dla skrócenia czasu jego przejścia do stanu rezystywnego. Z tych względów proponowane jest bocznikowanie nadprzewodnika cienką warstwą złota lub srebra, jednak wprowadzenie tych materiałów zwiększa straty związane z indukowaniem się prądów wirowych i zwiększa ilość ciekłego azotu koniecznego do utrzymania w stanie nadprzewodzącym element nadprzewodnikowy ogranicznika.



Rys. 4. 14. Wpływ rezystancji bocznika w nadprzewodnikowym (prętowym) ograniczniku prądu na kształt ograniczanego prądu [5]

Rezystancja tego bocznika musi być tak dobrana, by z jednej strony zapewnić efektywne zabezpieczenie elementu nadprzewodnikowego – tj. musi mieć odpowiednio małą rezystancję, z drugiej strony, nie może spowodować przegrzania tego elementu, co określa równanie:

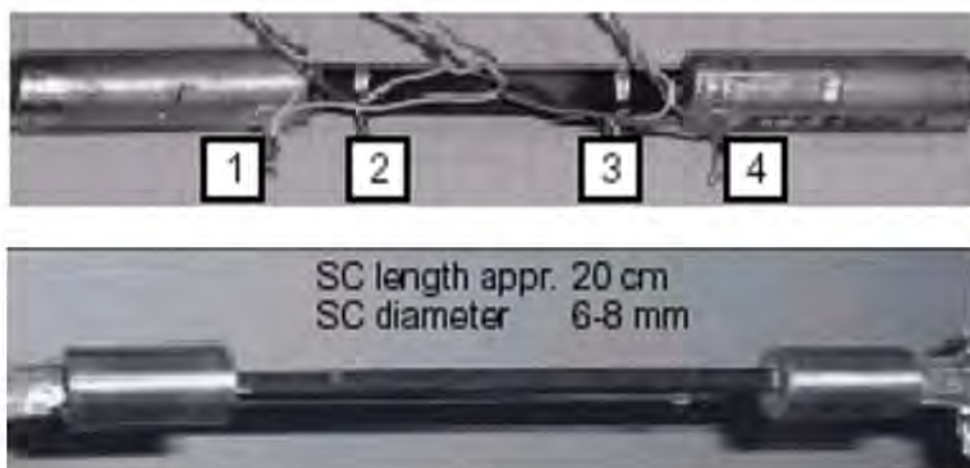
$$\dot{T} = E^2 / C_v \rho \quad (4.1)$$

gdzie: T – temperatura; E – pole elektryczne;
 C_v – ciepło właściwe;
 ρ – rezystancja

Znając wartość E i zakładając limit czasu wyłączenia $t_{\max}$ oraz maksymalną temperaturę ogranicznika T , której nie można przekroczyć, na podstawie tych danych można określić wartość rezystancji bocznika elementu nadprzewodnikowego.

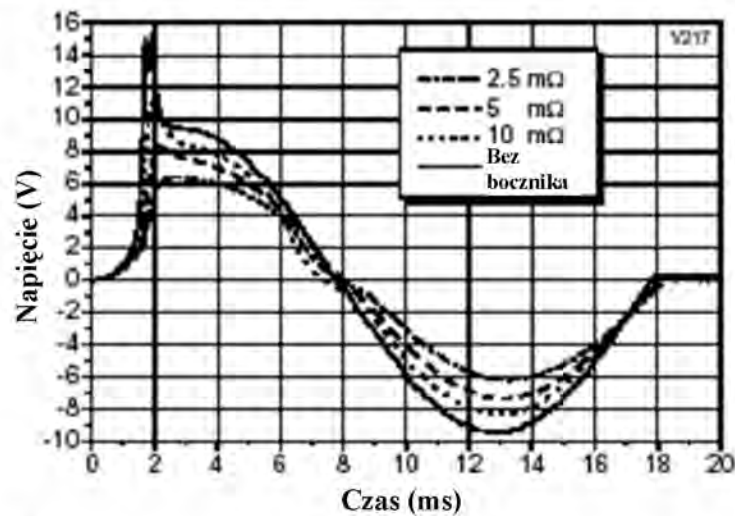
Na Rys. 4.14. przedstawiona jest charakterystyka przejścia SFCL, w którym zastosowano boczniki o różnej rezystancji, oraz charakterystyka SFCL bez bocznika. Widać, że efekt ograniczenia prądu jest bardziej widoczny przy konstrukcji ogranicznika bez bocznika prądowego. Szybkie przejście nadprzewodnika do stanu rezystywnego powoduje szybkie ograniczenie prądu w obwodzie. Dołączenie bocznika sprawia, że zanik prądu rozciąga się w czasie. Spadek prądu w obwodzie jest mniej gwałtowny, ale nie ma negatywnych skutków na jego trwałość.

Model takiego ogranicznika przedstawia Rys. 4.15.



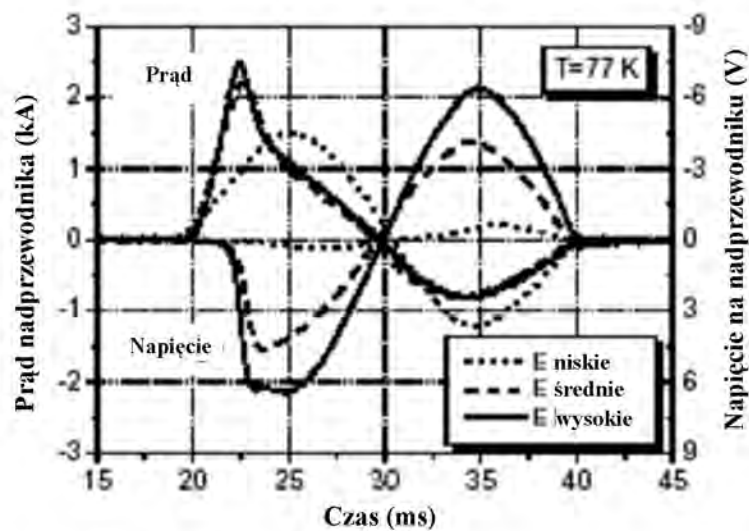
Rys. 4.15. Modele nadprzewodnikowych prętowych ograniczników prądu z materiału YBCO [2],
cyfry 1;2;3;4 –oznaczają punkty pomiarowe napięcia na ograniczniku [2]

Konsekwencją gwałtownego zaniku prądu w ograniczniku bez bocznika, może być powstawanie przepięć. Widać to na Rys. 4.16. i Rys. 4.17. Wprowadzenie bocznika metalowego bardzo wyraźnie redukuje wielkość przepięcia.



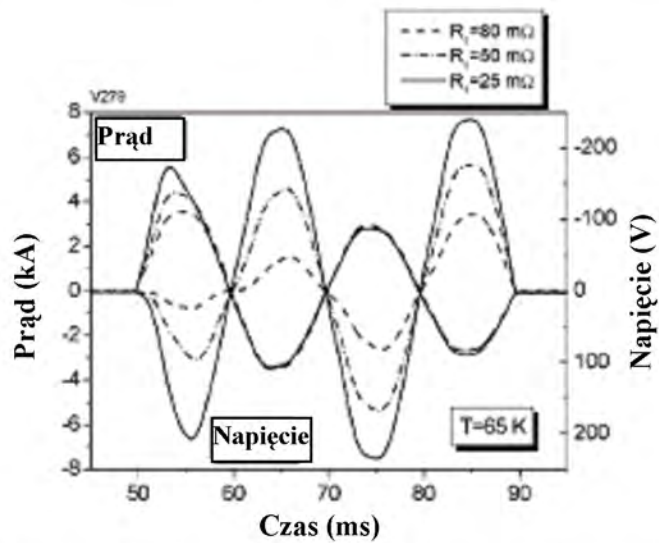
Rys. 4. 16. Wpływ rezystancji bocznika w nadprzewodnikowym (prętowym) ograniczniku prądu wykonanym z materiału Bi- 2212 na wartość napięcia. [5]

Podobny przebieg prądu obserwować można w prętowym ograniczniku wykonanym z YBCO. Pokazuje to Rys.4. 17.



Rys.4. 17. Wpływ rezystancji bocznika na wartość napięcia w nadprzewodnikowym (prętowym) ograniczniku prądu wykonanym z materiału YBCO[8], linia kropkowana –ogranicznik z bocznikiem o małej rezystancji

Wpływ rezystancji bocznika na kształt krzywej prądu i napięcia w bifilarnym ograniczniku prądu przedstawia Rys. 4.18.



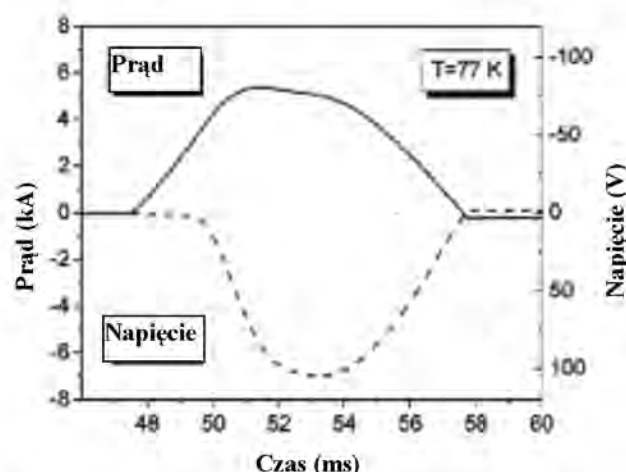
Rys. 4. 18. Charakterystyka prądowa bifilarnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu wykonanego z materiału Bi- 2212 [6]

Nieco inną charakterystykę prądową ma ogranicznik meandrowy. Modele fizyczne takich ograniczników przedstawiają rysunki 4.19 a, b i c.

Przebieg wielkości prądu i napięcia w procesie przejścia w meandrowym ograniczniku prądu wykonanym z materiału YBCO przedstawia Rys. 4.20.



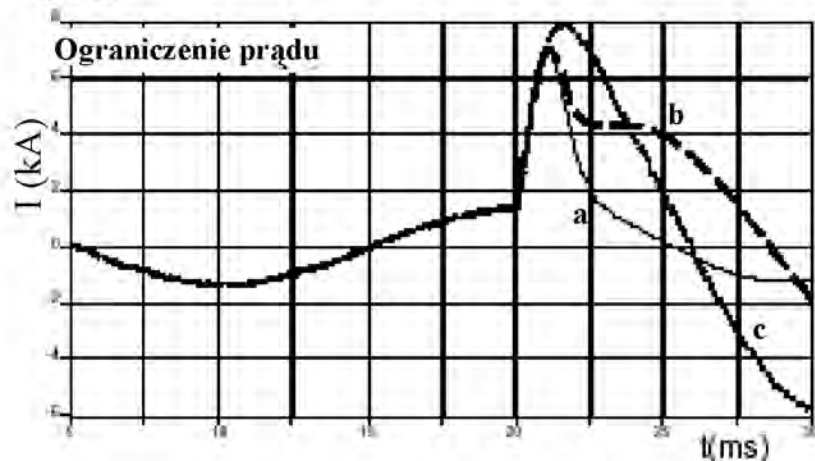
Rys. 4. 19. Modele nadprzewodnikowych meandrowych ograniczników prądu [6]



Rys. 4. 20. Przebiegi prądów i napięcia w procesie przejścia w meandrowym ograniczniku prądu wykonanym z materiału YBCO [6]

Porównując ograniczniki prądowe meandrowe i bifilarne, w których współczynnik ograniczenia prądowego jest podobny, czas stabilizacji ogranicznika meandrowego jest znacznie krótszy niż ogranicznika bifilarnego.

W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu SFCL stosowane są również boczniki indukcyjne. Charakterystykę ogranicznika z takim bocznikiem przedstawiają w postaci linii (b) rysunki 4. 21 i 4. 22. Dla porównania przedstawiono charakterystykę ogranicznika bez bocznika (a) oraz z bocznikiem rezystywnym (c)



Rys. 4. 21. Charakterystyka prądowa ogranicznika: bez bocznika (a); z bocznikiem indukcyjnym (b); z bocznikiem rezystywnym (c) [11]



Rys. 4. 22. Charakterystyka napięciowa ogranicznika: bez bocznika (cienka linia ciągła);
z bocznikiem indukcyjnym (gruba linia przerywana);
z bocznikiem rezystywnym (linia kropkowana) [11]

Z przedstawionych charakterystyk widać, że bocznik indukcyjny ogranicza prąd w stopniu podobnym do ogranicznika rezystywnego, jednak zależności czasowe są mniej korzystne. Można przyjąć, że do zastosowania w ogranicznikach SFCL, lepiej tę rolę spełnia bocznik rezystancyjny.

4.7. Przykład konstrukcji nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Konstrukcja nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego opisana została w kilku publikacjach [2,5,6,8]. Do jego budowy użyto nadprzewodnika B 2212 (Tab.2.2). Dla umożliwienia ograniczania wartości prądu i zapewnienia odpowiedniej wartości rezystancji nadprzewodnikowego materiału musi on mieć ściśle określony: przekrój poprzeczny i długość elementu nadprzewodnikowego. Produkowane cylindry z tego nadprzewodnika wykonane w specjalnej technologii mają zbyt małą rezystancję. Aby wykonać ogranicznik o odpowiedniej rezystancji wykonuje się bifilarny układ zwojów wykonany na tym cylindrze. Zwiększa to sumaryczną długość nadprzewodnika do kilku metrów, zapewniając wymagane parametry elektryczne. Jego schemat budowy pokazuje Rys. 4.23., a jego model przedstawia Rys. 4.24.

Parametry ogranicznika uwzględniać muszą nie tylko wartość przepływającego prądu przy określonym napięciu, jaki odpowiada normalnej pracy sieci, ale również warunki wymiany cieplnej nadprzewodnika w sytuacji awaryjnej, tj. w sytuacji, kiedy element nadprzewodnikowy ogranicznika przechodzi do stanu rezystywnego i prąd bocznikowany jest elementem z metalu o określonej wartości rezystancji.

Problemy z procesem dyssypacji energii cieplnej, jaka wydziela się w procesie ograniczania prądu powstają przy zwiększaniu długości nadprzewodnika.



Rys.4. 23. Ogranicznik prądu o konstrukcji bifilarnej, wykonany z materiału Bi-2212 [2]



Rys.4. 24. Badany model ogranicznika o konstrukcji bifilarnej
Powierzchnia przekroju nadprzewodnika wynosi $0,24 \text{ cm}^2$

W zależności od materiału nadprzewodnikowego i sposobu jego wykorzystania, proces wykonania bifilarnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu składa się z kilku etapów.

W pierwszym etapie przygotowujemy cylinder z nadprzewodnika Bi- 2212 o grubości odpowiedniej do przewidywanej wartości ograniczanego prądu. Produkowane cylindry z tego nadprzewodnika wykonane w specjalnej technologii

mają zbyt małą rezystancję dla zapewnienia efektywnego i oczekiwanego ograniczenia prądu. Zmienić to można tworząc bifilarny układ zwojów wykonany na tym cylindrze, który zwiększa sumaryczną długość nadprzewodnika do kilku metrów, o odpowiednich parametrach elektrycznych.

Cylinder z materiału zapewniającego odpowiednią rezystancję bocznika nakłada się na cylinder z nadprzewodnika. Istotne jest, by obie części były dokładnie elektrycznie i cieplnie połączone. Rezystancja w podanym przykładzie nie mogła być większa od $1\mu\Omega$ przy 65 K. Dlatego stosowana jest specjalna technologia lutowania, zapewniająca dokładność połączenia obu elementów, przy grubości warstwy łączącej nie przekraczającej 0,2 mm. Dla wzmocnienia konstrukcji, wewnątrz nadprzewodnikowego cylindra umieszczony został cylinder ze wzmocnionego plastiku i przyklejony do nadprzewodnikowego cylindra.

W końcowym etapie cylinder tnie się na bifilarne elementy – zwoje. Wysokość takiego elementu w podanym przykładzie wynosi 6 mm, a szczelina między elementami 1 mm. Przy grubości ścianek nadprzewodnikowego cylindra równej 4 mm, otrzymujemy nadprzewodnik o przekroju około $0,24\text{ cm}^2$. Przy założonym prądzie ograniczenia 800 A, daje to około 3600 A/cm^2 . Połączone w szereg elementy dają długość 540 cm (przy cylindrze o średnicy 50 mm i długości cylindra 30 cm). Oba cylindry nadprzewodnikowy i z normalnego metalu są cięte jednocześnie. Nienaruszony zostaje cylinder wewnętrzny ze wzmocnionego plastiku. W efekcie otrzymuje się bifilarny przewód o spiralnym kształcie. Na zewnątrz znajduje się element uzwojenia z metalu normalnego, pod nim, równolegle, dokładnie z nim połączony, element z nadprzewodnikowego materiału. W końcowej fazie, szczeliny po nacięciach wypełniane są przez elastyczny materiał stanowiący jednocześnie elektryczną izolację elementów i mechaniczne wzmocnienie konstrukcji. Końce cylindra są posrebrzane dla zapewnienia dobrego styku elektrycznego.

Wartość prądu ogranicznika limituje maksymalna wartość prądu, jaka może w stanie rezystywnym płynąć przez bocznik. Prąd płynący przez ogranicznik w stanie rezystywnym dzieli się w ten sposób, że 95% jego wartości płynie przez bocznik a tylko 5% przez nadprzewodnik.

Czas wyłączenia zależy w znacznym stopniu od parametrów bocznika. Wartość rezystancji bocznika w stanie przejściowym dosyć wolno wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Powoduje to nieznaczny spadek wartości amplitudy prądu w pierwszej fazie działania ogranicznika. W opisywanym ograniczniku, temperatura osiągała wartość 160 K po 60 ms.

Parametry nadprzewodnikowego ogranicznika typu rezystancyjnego zależą w znacznym stopniu od użytego materiału i technologii budowy. Podejmowane były próby wykonania ograniczników prądu typu rezystancyjnego z materiału YBCO, przy zastosowaniu cienkowarstwowej technologii. Trudności wynikały z niskich wartości prądu krytycznego oraz częstego występowaniem lokalnych obszarów ulegających przegrzaniu. Jednak ostatnio pojawiły się informacje [6,12]

o zastosowaniu nowego typu materiału YBCO, umożliwiające wykonanie ograniczników typu rezystancyjnego i produkcję elementów o odpowiednich kształtach.

Tab.4. 1 Parametry nadprzewodnikowych ograniczników prądu z różnych materiałów i wykonanych w różnej technologii

	BSCCO	Pręt	Bifilarne zwoje	YBCO	Pręt	Meandry
Rezystancja (mΩcm)	2 - 3	3	2,5	2 - 3	2	2
Rezystancja kontaktów (μΩ)	<1	1	0,3 (65 K)	<1	1	0,6 (77 K).
Gęstość prądu (kA/cm ²)	4	4	>3.7	4		1.5
Straty AC (W/kA m)	<4 65K	3 65K	4-6 65K	<5 77K	5 dla 1kA/cm 77K	5-8 dla 1kA/cm ² 77K
Współczynnik ograniczania	3-5	8,8 bocznikiem		3-5	9,8 bez bocznika	
Bocznik metalowy	niezbędny			niezbędny		

Proces wykonania takiego elementu jest wielofazowy. Wynikiem jest cienka warstwa YBCO o grubości ok. 100μm. Warstwa takiego nadprzewodnika wykazuje różne wartości parametrów elektrycznych w zależności od orientacji domen ułożonych na płaszczyźnie. Gęstości prądu w tych próbkach przekraczały znacznie wartość 10⁶A/cm². Wielkości tych próbek wynoszą ok 15-20 mm długości i 2-5 mm szerokości (przy grubości warstwy ok. 100 μm). Próbki te były cięte i sklepane srebrną pastą. Przy prądzie zasilania 1500 A (impuls prądu trwał ok. 25 ms) napięcie na tym elemencie sięgało wartości 4 V. Pomyślnie przeprowadzono próby pokrycia nadprzewodnikiem powierzchni 10 x 10 cm². Tą techniką wykonano już model ogranicznika prądu 100 kVA.

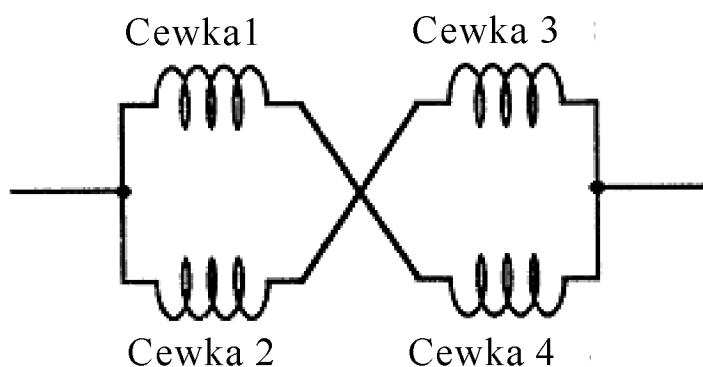
Trwają prace nad konstrukcją ogranicznika prądu wykonanego w technice cienkowarstwowej na 30 MVA przy nominalnym prądzie 2500 A. Materiał nadprzewodnikowy ogranicznika YBCO będzie nakładany na płytkach ceramicznych o powierzchni 20 x 20 cm².

Porównania parametrów nadprzewodnikowych ograniczników prądu,

wykonanych z różnych materiałów i przy zastosowaniu różnych technologii przedstawia tabela 4.1.

4.8. *Perspektywy rozwoju technologii budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu*

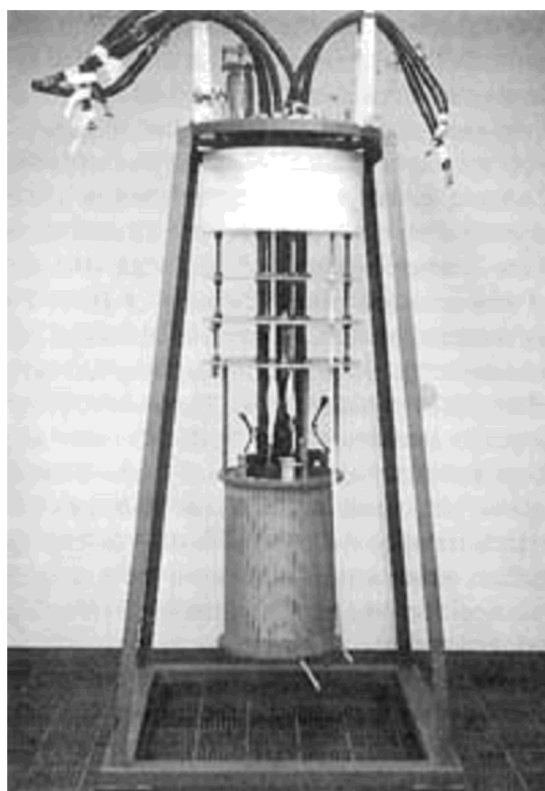
Wraz z rozwojem technologii chłodzenia zmienia się również zakres zastosowania różnych materiałów wykorzystywanych w konstrukcji nadprzewodnikowych ograniczników prądu. Pojawienie się na rynku kriochłodziarek kontaktowych (cryocoolerów), umożliwiło pełną automatyzację procesu chłodzenia SFCL. Kriochłodziarki nie tylko mogą podtrzymywać temperaturę azotową wymaganą przy chłodzeniu SFCL wykonanych z wysokotemperaturowych nadprzewodników, ale dzięki niskiej (do 4 K) temperaturze, jaką można uzyskać z ich pomocą, dają możliwość zastosowania w ogranicznikach prądu, również klasycznych nadprzewodników.



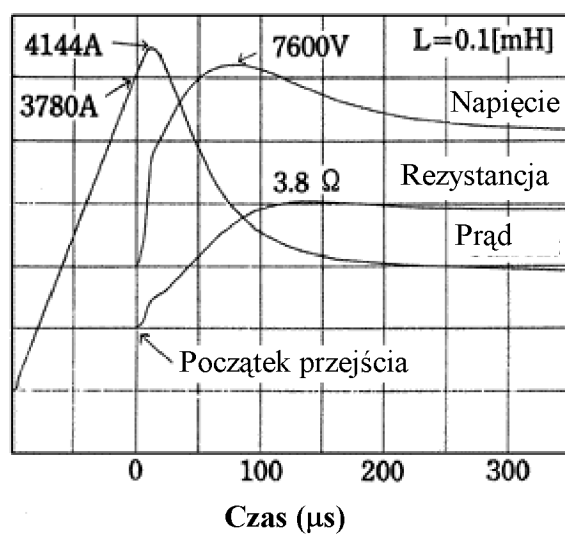
Bezindukcyjne uzwojenie nadprzewodnikowe

Rys. 4. 25. Schemat połączeń sekcji ogranicznika prądowego wykonanych z nadprzewodnika NbTi

Na Rys. 4.25. przedstawiono schemat takiej konstrukcji, a model takiego ogranicznika wykonany przez firmę Toshiba pokazuje Rys. 4.26. Jego charakterystykę przedstawia Rys. 4.26b. Uzwojenia z klasycznego nadprzewodnika wykonano łącząc szeregowo-równolegle 4 jego sekcje, tak by zminimalizować indukcyjność takiego układu. Uzwojenie wykonano z przewodu NbTi o niskich stratach AC.



a)

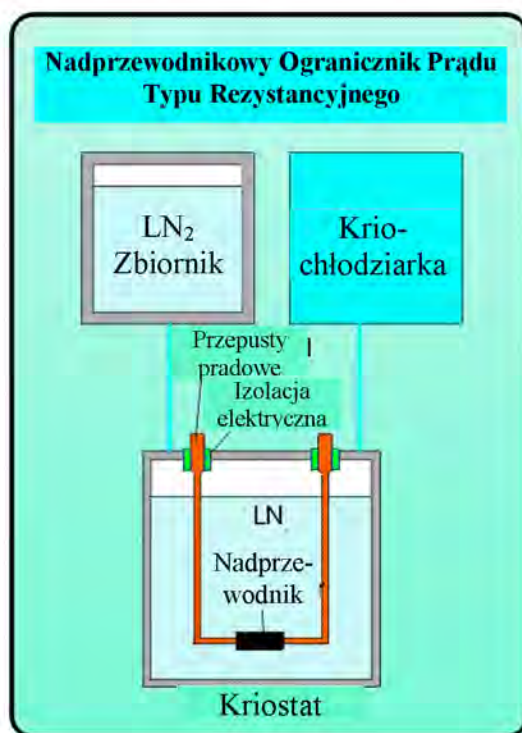


b)

Rys. 4. 26. Model ogranicznika prądu wykonany z klasycznego nadprzewodnika (a), oraz jego charakterystyka (b) [9]

Każdy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu wymaga chłodzenia do temperatury, poniżej której element nadprzewodnikowy przechodzi do stanu nadprzewodnictwa. Uzupełnianie ciekłego azotu lub ciekłego helu w kriostacie, w którym umieszczony jest ogranicznik prądu jest nieekonomiczne. Dlatego należy przewidzieć zastosowanie krio-chłodziarki utrzymującej cały układ w zakładanej temperaturze. Jego działanie musi umożliwiać ciągłą pracę przez długi okres czasu, oraz umożliwić pełną automatyzację procesu eksploatacji.

Rys. 4.27 przedstawia schemat ogólny układu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu, w którym do wspomagania układu chłodzenia zastosowano krio-chłodziarkę.



Rys. 4.27. Schemat ogólny układu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z krio-chłodziarką w układzie chłodzenia

Do optymalizacji konstrukcji oraz zapewnienie poprawnego działania takiego zestawu niezbędne są badania, które pozwolą na zminimalizowanie wymiarów i strat cieplnych układu przy określonym obciążeniu zabezpieczanej sieci i pewnej, zakładanej częstotliwości występowania awarii. Pozwoli to na dobór odpowiedniego układu chłodzenia, który w ogranicznikach prądu stanowi znaczny procent całych kosztów budowy.

5. OGRANICZNIKI INDUKCYJNE

5.1. Wprowadzenie

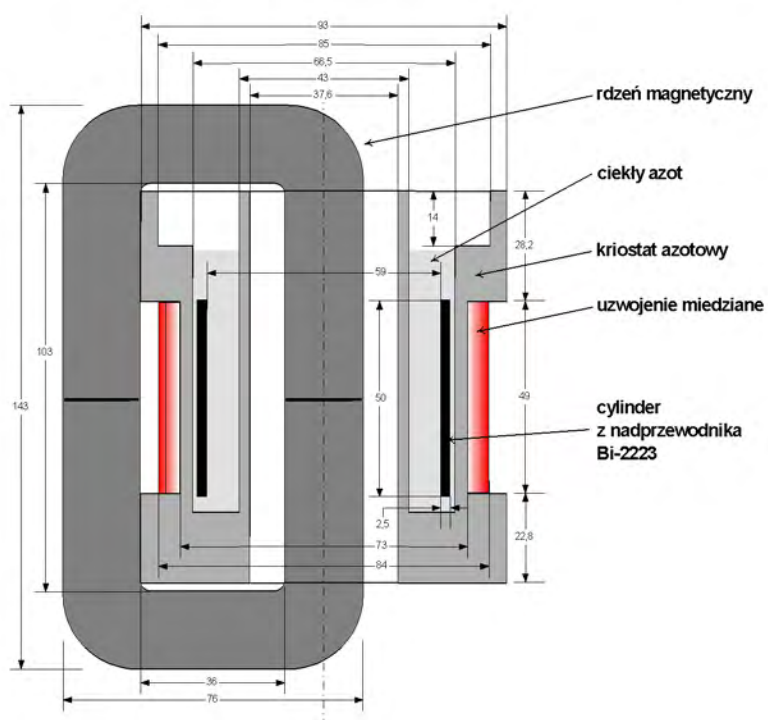
Nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych typu indukcyjnego wykazują małą impedancję podczas pracy w warunkach znamionowych oraz dużą impedancję w warunkach zwarcia, dzięki czemu mogą w istotnym stopniu ograniczać wartość prądów zwarcia. W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań modeli fizycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego zaprojektowanych i zbudowanych przez Autorów. Do budowy wszystkich badanych modeli ograniczników typu indukcyjnego wykorzystano dostępne w handlu cylindry nadprzewodnikowe Bi-2223 o prądach krytycznych 112 A, 625 A i 1210 A w temperaturze 77 K przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, oraz kilka zamkniętych i otwartych rdzeni magnetycznych o różnych wymiarach. Ograniczniki te mają budowę transformatora ze zwartym uzwojeniem wtórnym w postaci cylindra z nadprzewodnika wysokotemperaturowego i konwencjonalne, miedziane uzwojenie pierwotne. Nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne podczas znamionowych warunków pracy ogranicznika jest w stanie nadprzewodzącym i pełni rolę ekranu magnetycznego, uniemożliwiając strumieniowi magnetycznemu indukowanemu w uzwojeniu pierwotnym wnikanie do rdzenia magnetycznego ogranicznika. Uzwojenie pierwotne, wykonane z miedzi, włączone jest bezpośrednio do chronionego obwodu elektrycznego. Ograniczniki badane były w temperaturze ciekłego azotu – 77 K oraz w temperaturze pokojowej – 295 K, z rdzeniami zamkniętymi i otwartymi o różnych wymiarach. Parametry konstrukcyjne modeli ograniczników badanych przez Autorów są szczegółowo opisane przed prezentacją wyników badań eksperymentalnych i symulacji komputerowych.

5.2. Ograniczniki prądu z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi

5.2.1. Ograniczniki prądu z cylindrami nadprzewodnikowymi 625 A (77 K)

Na Rys. 5.1 przedstawiony jest przekrój jednego z modeli nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego, zbudowanego w oparciu o cylinder Bi-2223 o prądzie krytycznym 625 A (77 K). Podstawowe części składowe ogranicznika przedstawione na Rys. 5.1, Rys. 5.2 i Rys. 5.3 to:

1. cylinder z nadprzewodnika wysokotemperaturowego Bi-2223,
2. kriostat azotowy wykonany z ertalonu (ternamid) z nawiniętym uzwojeniem miedzianym,
3. zamknięty rdzeń magnetyczny zwijany z blachy transformatorowej.



Rys. 5.1. Przekrój nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego z cylindrem Bi-2223 o $I_c = 625$ A (77 K)



Rys. 5.2. Widok modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego



Rys. 5.3. Części składowe ogranicznika prądu: **1** – rdzeń magnetyczny o przekroju 2 cm x 2 cm, **2** – kriostat z uzwojeniem miedzianym, **3** – cylinder 625 A (77 K) z Bi-2223

Podstawowe parametry modeli ograniczników (Rys. 5.1, Rys. 5.2, Rys. 5.3) przedstawione są w Tab. 5.1.

Tab. 5.1. Parametry ograniczników z pierścieniem 625 A (77 K)

Uzwojenie pierwotne z Cu		
Średnica przewodu	0,7 mm	
Liczba zwojów	236	
Wysokość uzwojenia	49 mm	
Wewnętrzna średnica uzwojenia	73 mm	
Prąd ograniczenia	2,65 A	
Nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne – cylinder Bi-2223		
Temperatura krytyczna	108 K	
Średnica wewnętrzna	59 mm	
Wysokość	50 mm	
Grubość ścianki	2,5 mm	
Prąd krytyczny I_c przy 77 K	625 A	
Rdzenie magnetyczne zamknięte		
Przekrój	20 mm x 20 mm	20 mm x 30 mm
Wysokość kolumny	103 mm	103 mm
Szerokość okna	36 mm	36 mm

Miarą skuteczności działania ograniczników prądu typu indukcyjnego z uzwojeniem pierwotnym miedzianym i wtórnym nadprzewodnikowym jest wzrost jego impedancji mierzonej na zaciskach uzwojenia pierwotnego wywołany utratą nadprzewodnictwa przez uzwojenie wtórne. W stanie nadprzewodzącym uzwojenia wtórnego rdzeń ferromagnetyczny jest całkowicie ekranowany, nie przewodzi

strumienia magnetycznego i jego wpływ na wartość impedancji można pominąć, natomiast po przejściu do stanu rezystywnego całkowicie znika ekranowanie. Można więc przyjąć, że porównanie impedancji ogranicznika bez rdzenia i z rdzeniem jest miarą ograniczania prądu. Ponieważ napięcia są tu proporcjonalne do impedancji, stopień ograniczania prądu możemy określić przez porównanie napięcia ogranicznika z rdzeniem i bez rdzenia.

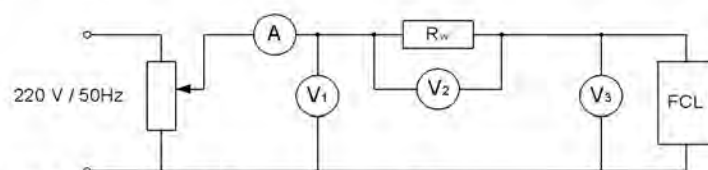
Stopień ograniczania prądu przez ogranicznik indukcyjny może charakteryzować bezwymiarowy współczynnik ograniczania zdefiniowany jako stosunek różnicy napięć na ograniczniku kompletnym i ograniczniku bez rdzenia do napięcia na ograniczniku bez rdzenia:

$$\kappa = \frac{U - U_{br}}{U_{br}} \quad (5-1)$$

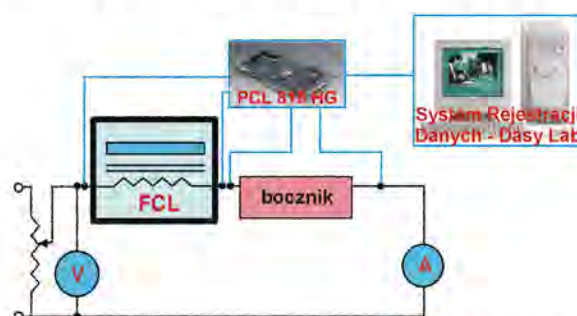
gdzie: U – napięcie na ograniczniku kompletnym,

U_{br} – napięcie na ograniczniku bez rdzenia magnetycznego.

Na Rys. 5.4 i Rys. 5.5 przedstawiono układy pomiarowe, które były wykorzystywane do badania nadprzewodnikowych indukcyjnych ograniczników prądu. Rys. 5.4 przedstawia układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk napięciowo-prądowych indukcyjnego ogranicznika prądu. Charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników badano również w układzie pomiarowym przedstawionym na Rys. 5.5, w którym korzystano z karty pomiarowej PCL 818 HG i programu DASY-Lab 6.0.



Rys. 5.4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk napięciowo-prądowych ogranicznika prądu

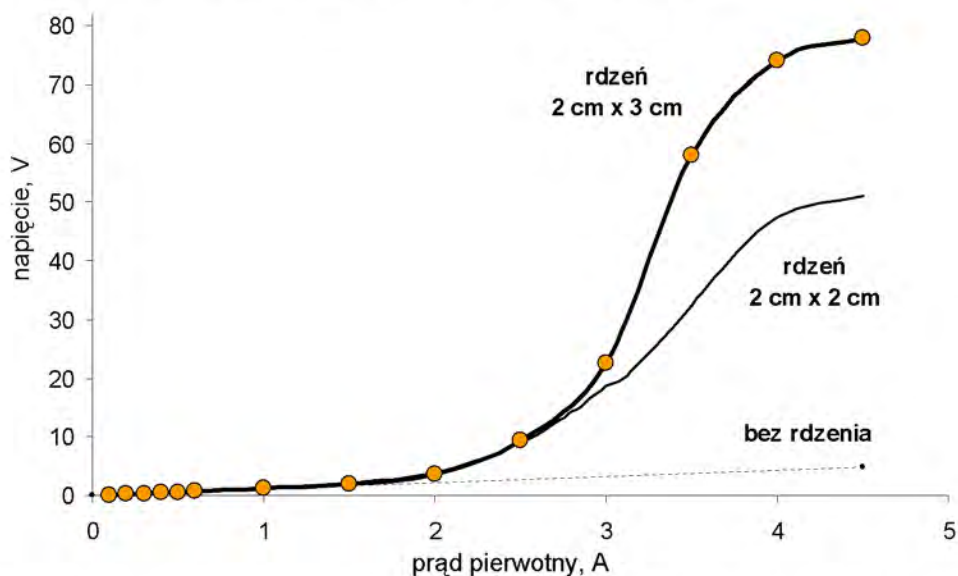


Rys. 5.5. Schemat układu pomiarowego wykorzystujący kartę pomiarową PCL 818 HG i program DASY-Lab 6.0 do wyznaczania charakterystyk napięciowo-prądowych ogranicznika prądu

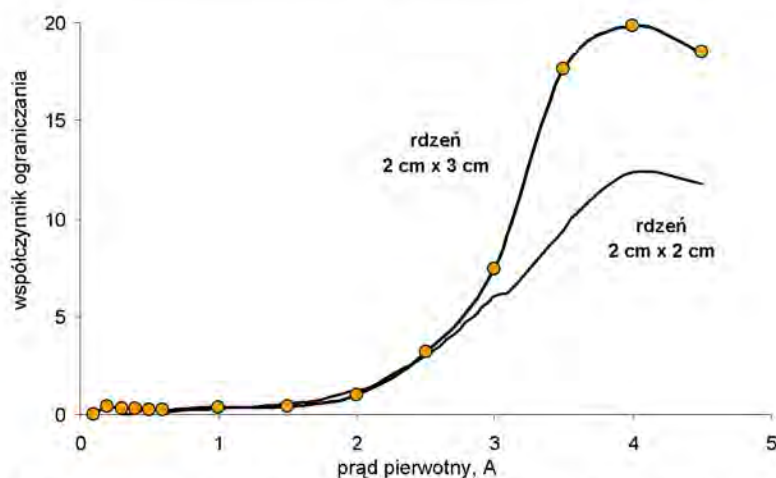


Rys. 5.6. Indukcyjny nadprzewodnikowy ogranicznik prądu podczas badań

Charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi o przekrojach $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ oraz $2\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ z cylindrami Bi-2223 o $I_c = 625\text{ A}$ (77 K) zamieszczone są na Rys. 5.7. Zależności współczynników ograniczania od wartości prądu pierwotnego w tych ogranicznikach przedstawia Rys. 5.8. Stopień ograniczania prądu w ograniczniku z rdzeniem $2\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ jest większy niż w ograniczniku z rdzeniem o mniejszym przekroju $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$. Maksymalne wartości współczynników ograniczania równe odpowiednio 19,8 i 12,4 osiągają badane ograniczniki dla prądu pierwotnego o wartości 4 A.



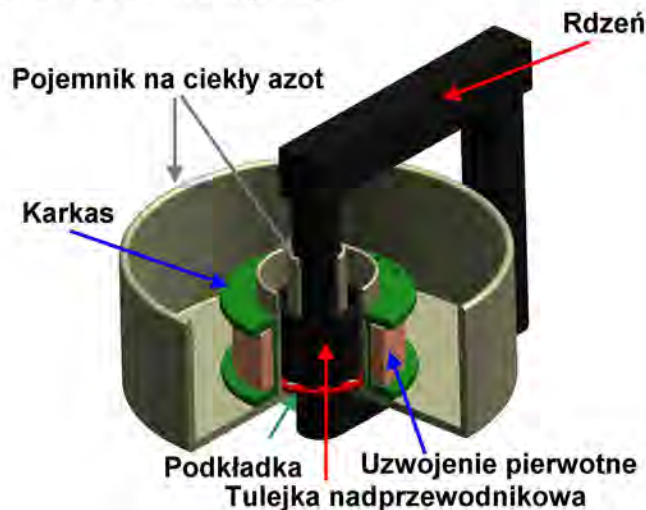
Rys. 5.7. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem Bi-2223 o $I_c = 625\text{ A}$ (77 K) w temperaturze 77 K



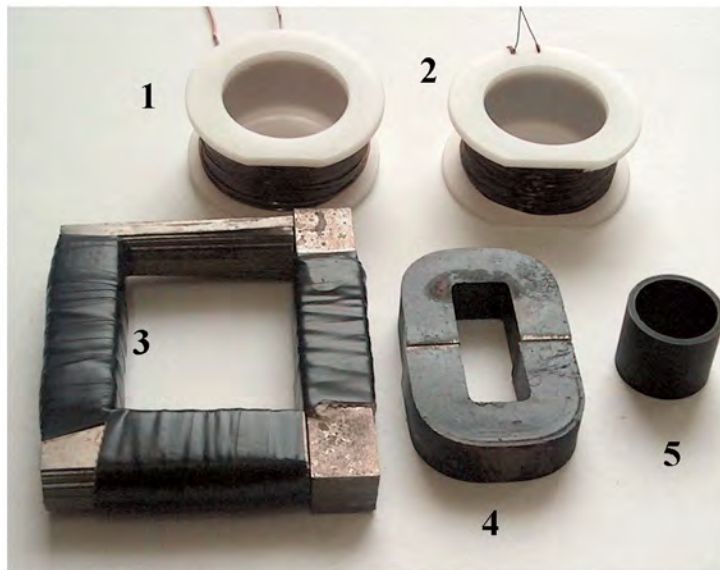
Rys. 5.8. Współczynniki ograniczania nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem Bi-2223 o $I_c = 625$ A (77 K) w temperaturze 77 K

5.2.2. Ograniczniki prądu z cylindrami nadprzewodnikowymi 112 A (77 K)

Widok jednego z modeli przedstawia Rys. 5.9 oraz Rys. 5.11. Parametry ograniczników zamieszczone są w Tab. 5.2. Na Rys. 5.10 pokazane są części składowe ograniczników prądu z zamkniętym rdzeniem magnetycznym składanym z kształtek i zwijanym o przekroju 10 mm x 10 mm i cylindrem nadprzewodnikowym o prądzie krytycznym $I_c = 112$ A (77 K).

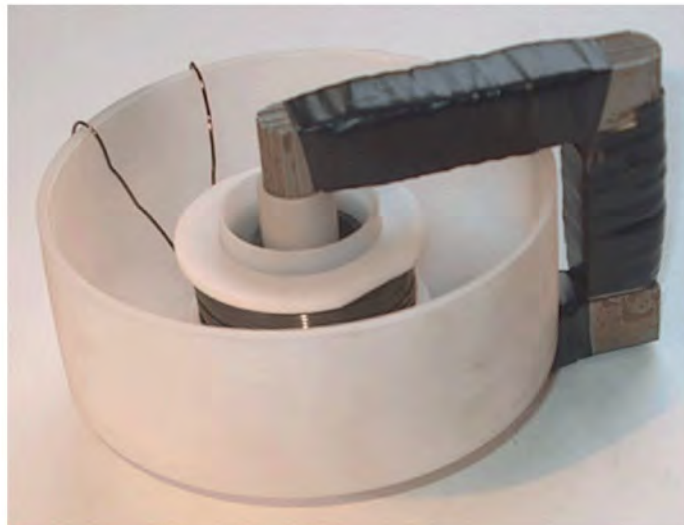


Rys. 5.9. Widok nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z rdzeniem zamkniętym i cylindrem Bi-2223 o $I_c = 112$ A (77 K)



Rys. 5.10. Części składowe ograniczników prądu z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K):

- 1 - miedziane uzwojenie pierwotne o 448 zwojach,
- 2 - miedziane uzwojenie pierwotne o 112 zwojach,
- 3 - rdzeń magnetyczny składany z kształtek,
- 4 - rdzeń magnetyczny zwijany,
- 5 - cylinder z nadprzewodnika Bi-2223



Rys. 5.11. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z zamkniętym rdzeniem magnetycznym składanym z kształtek, uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów 448 i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K) w kriostacie azotowym

Tab. 5.2. Parametry ograniczników z pierścieniem 112 A (77 K) i rdzeniami zamkniętymi

Uzwojenie pierwotne z Cu		
1	Średnica przewodu	0,7 mm
	Liczba zwojów	112
	Wysokość uzwojenia	14 mm
	Wewnętrzna średnica uzwojenia	26 mm
	Prąd ograniczenia	1 A
2	Średnica przewodu	0,7 mm
	Liczba zwojów	448
	Wysokość uzwojenia	14 mm
	Wewnętrzna średnica uzwojenia	26 mm
	Prąd ograniczenia	0,25 A
Nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne – cylinder Bi-2223		
Temperatura krytyczna		108 K
Średnica wewnętrzna		15 mm
Wysokość		15 mm
Grubość ścianki		1,5 mm
Prąd krytyczny I_c przy 77 K		112 A
Rdzenie magnetyczne zamknięte		
	składany z kształtek	zwijany
Przekrój	10 mm x 10 mm	10 mm x 10 mm
Wysokość okna	45 mm	49 mm
Szerokość okna	40 mm	11 mm

Rdzenie składane z kształtek wykonywane są z blachy transformatorowej. Rdzenie takie można w prosty sposób modelować w warunkach laboratoryjnych dobierając wymagany kształt i pole przekroju poprzecznego oraz wymiary kolumny i okna. Jest to duża zaleta podczas badań, gdy na drodze eksperymentalnej poszukiwany jest optymalny kształt i pole przekroju rdzenia. Rdzenie zwijane wykonane z blachy transformatorowej są kształtowane przez producenta i w warunkach laboratoryjnych praktycznie nie ma możliwości zmiany ich wymiarów i pola przekroju.

Rys. 5.11 przedstawia model ogranicznika z zamkniętym rdzeniem składanym z kształtek, uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów 448 i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K) w kriostacie azotowym. W ograniczniku tym istnieje możliwość chłodzenia zarówno samego cylindra nadprzewodnikowego jak i cylindra łącznie z pierwotną cewką miedzianą. Rdzeń magnetyczny pracuje w temperaturze pokojowej.

Rys. 5.12 przedstawia kompletny model ogranicznika z zamkniętym rdzeniem zwijanym, uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów 448 i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K). Szerokość okna zwijanego rdzenia magnetyczny o przekroju 10 mm x 10 mm, który mieści się w cylindrze 112 A

(77 K) jest na tyle mała, że uniemożliwia zastosowanie kriostatu azotowego i niezależne chłodzenie cylindra nadprzewodnikowego. Ogranicznik ten umieszczany jest w całości (łącznie z rdzeniem magnetycznym) w kąpeli ciekłego azotu.

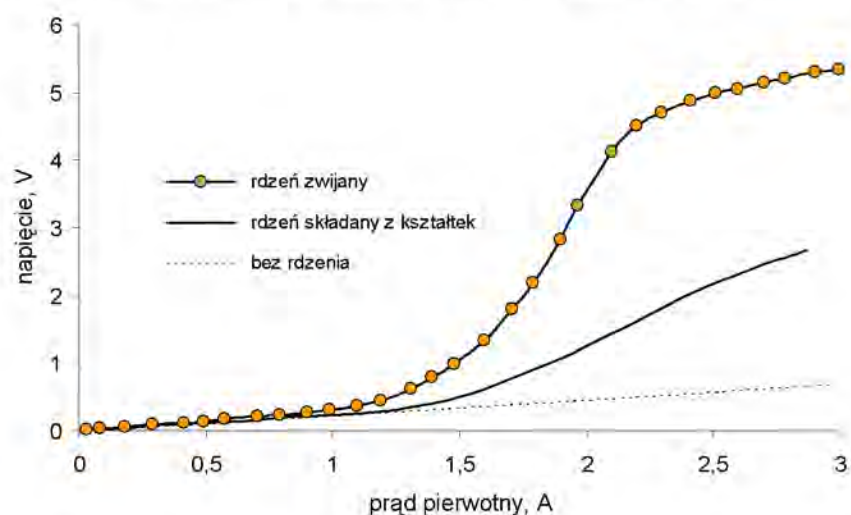


Rys. 5.12. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z zamkniętym rdzeniem magnetycznym zwijanym, uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów 448 i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K)

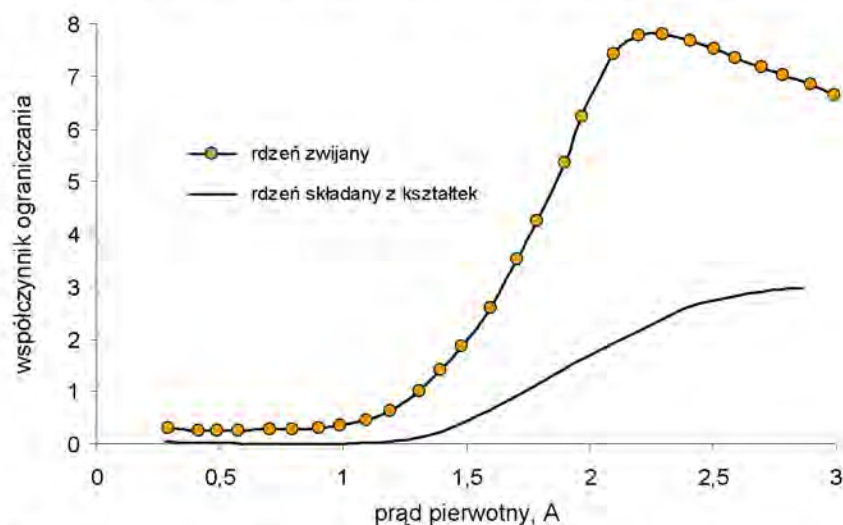
Charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi zwijanym i składanymi z kształtek z cylindrami Bi-2223 o $I_c = 112$ A (77 K) i uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów równej 112 przedstawione są na Rys. 5.13. Zależności współczynników ograniczania od wartości prądu pierwotnego w tych ogranicznikach przedstawia Rys. 5.14. Stopień ograniczania prądu w ograniczniku z rdzeniem zwijanym jest większy niż w ograniczniku z rdzeniem składanym z kształtek. Maksymalną wartość współczynnika ograniczania równą 7,8 ogranicznik z rdzeniem zwijanym osiąga dla prądu pierwotnego o wartości 2,3 A. Maksymalna wartość współczynnika ograniczania w ograniczniku z rdzeniem składanym z kształtek zbliża się do 3 dla maksymalnego prądu w pomiarach.

Rys. 5.15 przedstawia charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi zwijanym oraz składanym z kształtek oraz cylindrami Bi-2223 o $I_c = 112$ A (77 K) i uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów równej 448. Zależności współczynników ograniczania od wartości prądu pierwotnego w tych ogranicznikach przedstawia Rys. 5.16. Stopień ograniczania prądu w ograniczniku z rdzeniem zwijanym jest większy niż w ograniczniku

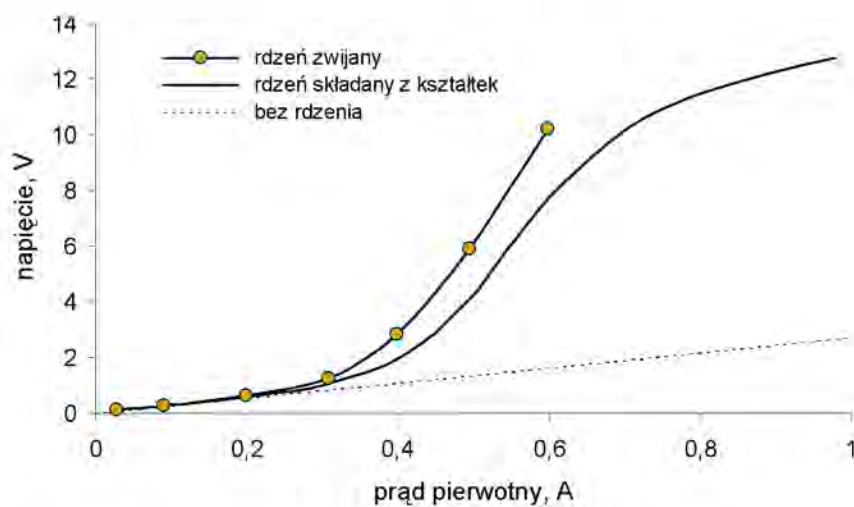
z rdzeniem składanym z kształtek. Maksymalna wartość współczynnika ograniczania dla ogranicznika z rdzeniem zwijanym nie została osiągnięta podczas pomiarów. Maksymalna wartość współczynnika ograniczania dla ogranicznika z rdzeniem składanym z kształtek wynosi 4,3 dla prądu pierwotnego o wartości 0,7 A.



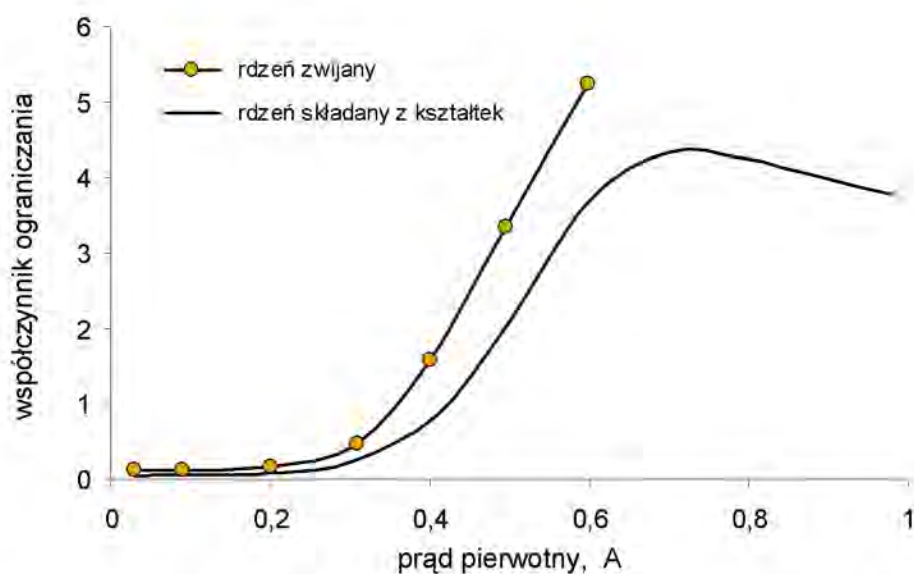
Rys. 5.13. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem o $I_c = 112$ A (77 K) w temperaturze 77 K z 112 zwojami pierwotnymi



Rys. 5.14. Współczynniki ograniczania nadprzewodnikowych ograniczników prądu dla warunków jak na Rys. 5.13



Rys. 5.15. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem o $I_c = 112$ A (77 K) w temperaturze 77 K z 448 zwojami pierwotnymi



Rys. 5.16. Współczynniki ograniczania nadprzewodnikowych ograniczników prądu dla warunków jak na Rys. 5.15

5.2.3. Podsumowanie wyników badań eksperymentalnych ograniczników z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi

- Wykorzystując cylindry z nadprzewodnika Bi-2223 o prądach krytycznych 112 A (77 K) oraz 625 A (77 K) można zbudować nadprzewodnikowe indukcyjne ograniczniki prądu o zadowalających parametrach.
- Zwiększenie przekroju poprzecznego rdzenia magnetycznego poprawia charakterystykę napięciowo-prądową ogranicznika i zwiększa współczynnik ograniczania prądu.
- Zastosowanie rdzenia zwijanego o większej przenikalności magnetycznej poprawia charakterystykę napięciowo-prądową ogranicznika i zwiększa współczynnik ograniczania prądu.

5.3. Ograniczniki prądu z otwartymi rdzeniami magnetycznymi

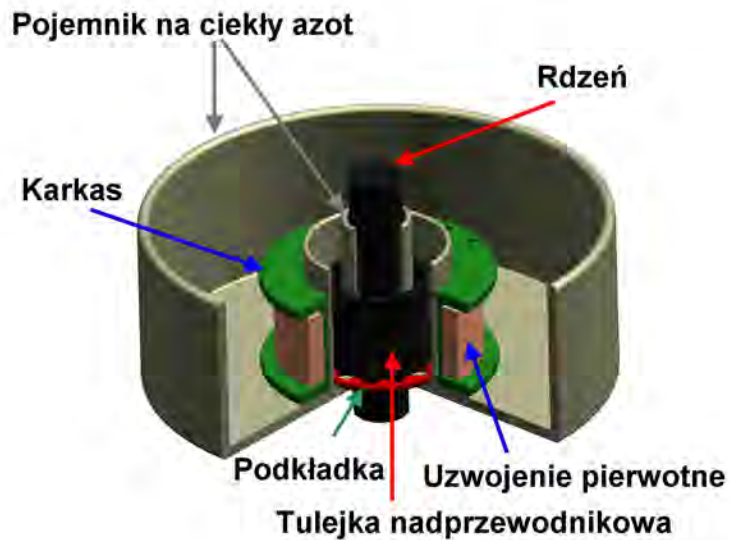
Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu z otwartym rdzeniem magnetycznym są jednym z typów ograniczników indukcyjnych. Podstawową zaletą ograniczników indukcyjnych z otwartym rdzeniem magnetycznym jest prosta konstrukcja, mała waga łatwość wymiany uzwojeń pierwotnych i nadprzewodnikowych cylindrów stanowiących uzwojenia wtórne. Pole magnetyczne generowane w dużej przestrzeni na zewnątrz ogranicznika z otwartym rdzeniem magnetycznym wydłuża czas jego zadziałania oraz może zakłócić pracę innych urządzeń w sąsiedztwie ogranicznika. Podobnie jak w przypadku SFCL z zamkniętym rdzeniem zbudowano i przebadano kilka modeli o różnych parametrach rdzenia, cewki pierwotnej oraz cylindra nadprzewodnikowego.

5.3.1. Ograniczniki prądu z cylindrami nadprzewodnikowymi 112 A (77 K)

Parametry nadprzewodnikowych ograniczników prądu z otwartymi rdzeniami magnetycznymi zbudowanych w oparciu o cylinder z nadprzewodnika Bi-2223 o $I_c = 112$ A (77 K) przedstawione są w Tab. 5.3. Budowę jednego z tych ograniczników przedstawia Rys. 5.17. Na Rys. 5.18 pokazane są części składowe tych ograniczników.

Rys. 5.19 przedstawia kompletny ogranicznik z otwartym rdzeniem magnetycznym o wymiarach 8 mm x 8 mm x 35 mm, uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów 112 i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K) w kriostacie azotowym. W ograniczniku tym istnieje możliwość chłodzenia zarówno samego cylindra nadprzewodnikowego jak i cylindra łącznie z cewką miedzianą. Rdzeń magnetyczny pracuje w temperaturze pokojowej.

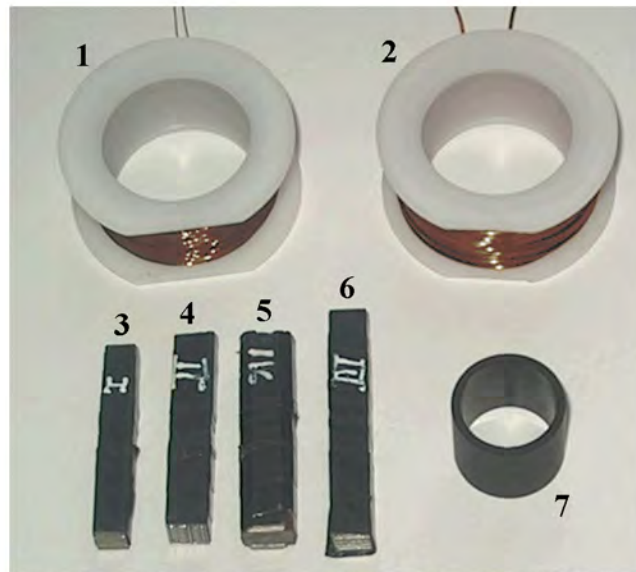
Przeprowadzone zostały badania charakterystyk napięciowo-prądowych dla ograniczników z uzwojeniami pierwotnymi o liczbie zwojów 112 i 448 oraz różnymi rdzeniami magnetycznymi.



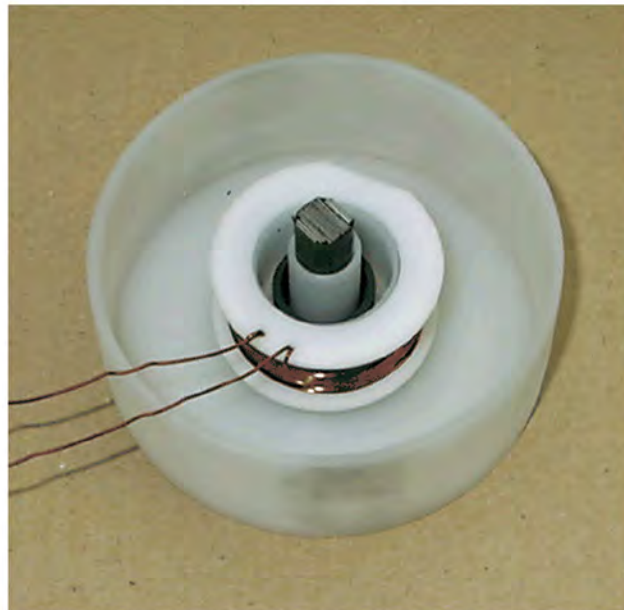
Rys. 5.17. Widok nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z rdzeniem otwartym i cylindrem Bi-2223 o $I_c = 112$ A (77 K)

Tab. 5.3. Parametry ograniczników z pierścieniem 112 A (77 K) i rdzeniem otwartym

Uzwojenie pierwotne z Cu				
1	Średnica przewodu	0,7 mm		
	Liczba zwojów	112		
	Wysokość uzwojenia	14 mm		
	Wewnętrzna średnica uzwojenia	26 mm		
	Prąd ograniczenia	1 A		
2	Średnica przewodu	0,7 mm		
	Liczba zwojów	448		
	Wysokość uzwojenia	14 mm		
	Wewnętrzna średnica uzwojenia	26 mm		
	Prąd ograniczenia	0,25 A		
Nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne – cylinder Bi-2223				
Temperatura krytyczna		108 K		
Średnica wewnętrzna		15 mm		
Wysokość		15 mm		
Grubość ścianki		1,5 mm		
Prąd krytyczny I_c przy 77 K		112 A		
Rdzenie magnetyczne otwarte				
Przekrój	5 mm x 5 mm	6 mm x 6 mm	8 mm x 8 mm	6 mm x 6 mm
Wysokość kolumny	35 mm	35 mm	35 mm	41 mm

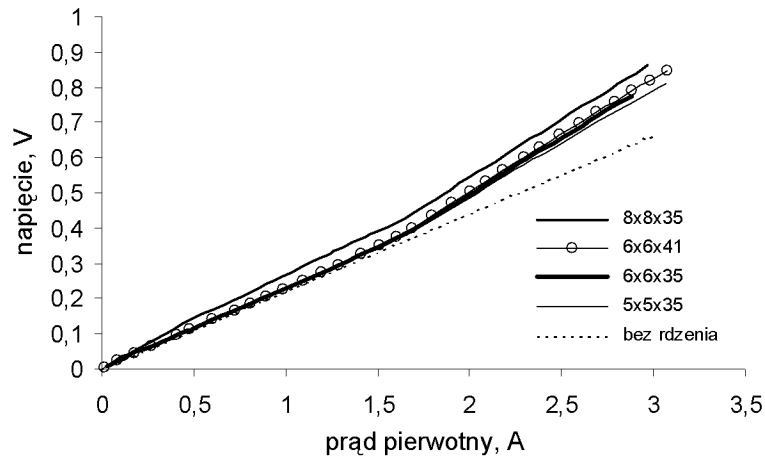


Rys. 5.18. Części składowe ograniczników prądu z otwartymi rdzeniami magnetycznymi i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K): 1 - miedziane uzwojenie pierwotne o 112 zwojach, 2 - miedziane uzwojenie pierwotne o 448 zwojach, 3 - rdzeń magnetyczny 5 mm x 5 mm x 35 mm, 4 - rdzeń magnetyczny 6 mm x 6 mm x 35 mm, 5 - rdzeń magnetyczny 8 mm x 8 mm x 35 mm, 6 - rdzeń magnetyczny 6 mm x 6 mm x 41 mm, 7 - cylinder z nadprzewodnika Bi-2223

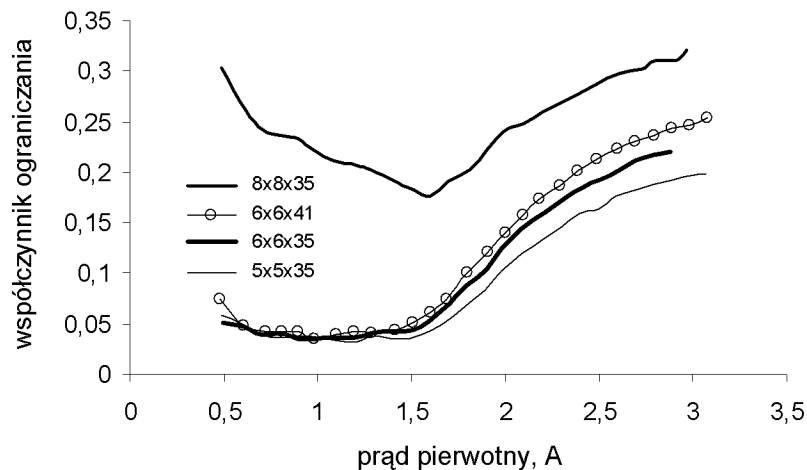


Rys. 5.19. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z otwartym rdzeniem magnetycznym i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 112$ A (77 K) w kriostacie azotowym

Charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników z otwartymi rdzeniami magnetycznymi i z cylindrami Bi-2223 o $I_c = 112$ A (77 K) oraz uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów równej 112 zamieszczone są na Rys. 5.20. Zależności współczynników ograniczania od wartości prądu pierwotnego w tych ogranicznikach przedstawia Rys. 5.21. Stopień ograniczania prądu w tych ogranicznikach jest niezadowalający. Maksymalne wartości współczynników ograniczania nie przekraczają 0,35.

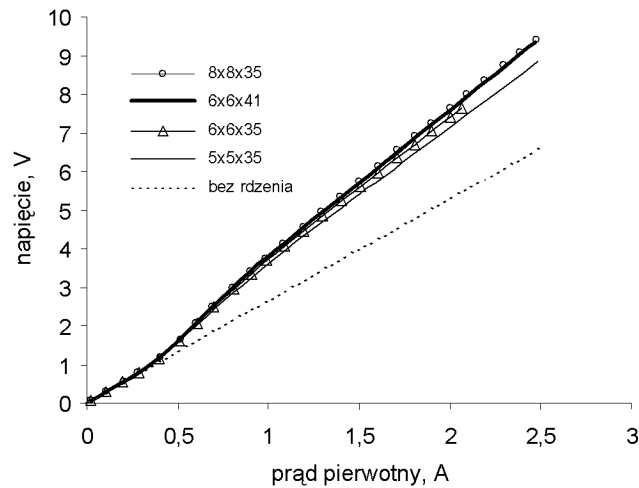


Rys. 5.20. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem o $I_c = 112$ A (77 K) w temperaturze 77 K z 112 zwojami pierwotnymi

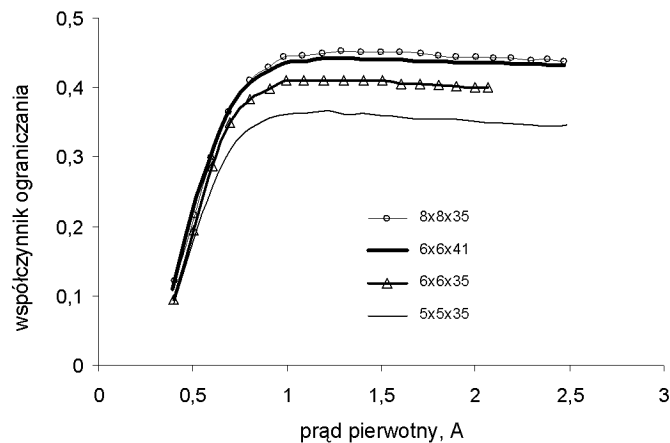


Rys. 5.21. Współczynniki ograniczania nadprzewodnikowych ograniczników prądu dla warunków jak na Rys. 5.20

Charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników z otwartymi rdzeniami magnetycznymi z cylindrami Bi-2223 o $I_c = 112$ A (77 K) oraz uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów równej 448 zamieszczone są na Rys. 5.22. Zależności współczynników ograniczania od wartości prądu pierwotnego w tych ogranicznikach przedstawia Rys. 5.23. Stopień ograniczania prądu w tych ogranicznikach jest również niezadowalający. Maksymalne wartości współczynników ograniczania nie przekraczają 0,46.



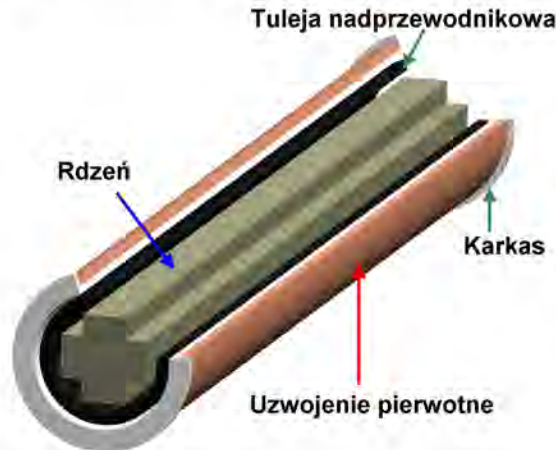
Rys. 5.22. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem o $I_c = 112$ A (77 K) w temperaturze 77 K z 448 zwojami pierwotnymi



Rys. 5.23. Współczynniki ograniczania nadprzewodnikowych ograniczników prądu dla warunków jak na Rys. 5.22

5.3.2. Ogranicznik prądu z cylindrem nadprzewodnikowym 1210 A (77 K)

Parametry nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z otwartym rdzeniem magnetycznym zbudowanego w oparciu o cylinder z nadprzewodnika Bi-2223 o $I_c = 1210$ A (77 K) przedstawione są w Tab. 5.4. Liczba zwojów i prąd uzwojenia pierwotnego dostosowane zostały do wymagań układu pomiarowego i układu zasilania w laboratorium. Budowę, części składowe oraz widok tego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu przedstawiają Rys. 5.24, Rys. 5.25, oraz Rys. 5.26.

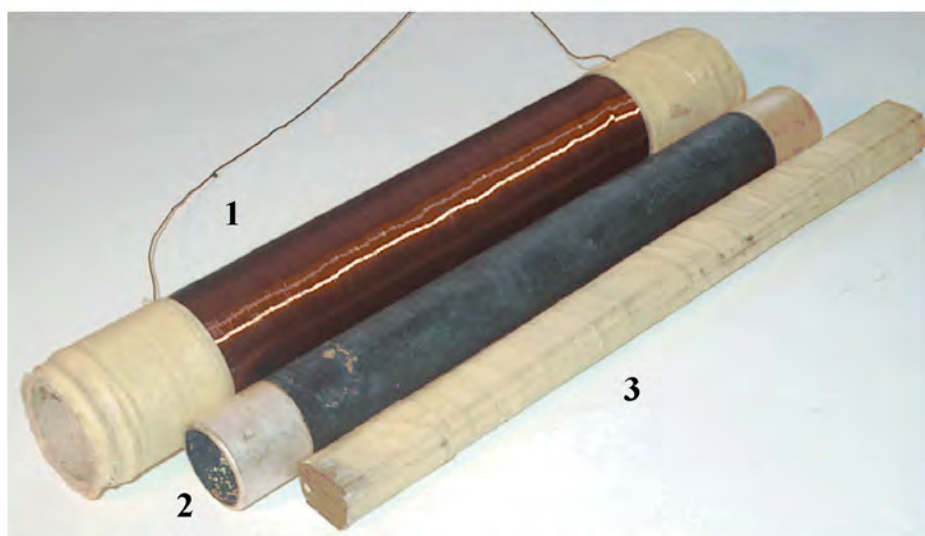


Rys. 5.24. Przekrój nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z otwartym rdzeniem magnetycznym i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 1210$ A (77 K)

Tab. 5.4. Parametry ogranicznika z pierścieniem 1210 A (77 K)

Uzwojenie pierwotne z Cu	
Średnica przewodu	0,45 mm
Liczba zwojów	1200
Wysokość uzwojenia	170 mm
Wewnętrzna średnica uzwojenia	20 mm
Prąd ograniczenia	1 A
Nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne – cylinder Bi-2223	
Temperatura krytyczna	108 K
Średnica wewnętrzna	18 mm
Wysokość	160 mm
Grubość ścianki	2 mm
Prąd krytyczny I_c przy 77 K	1210 A
Rdzeń magnetyczny otwarty	
Pole przekrój	110 mm ²
Wysokość kolumny	170 mm

Wyniki pomiarów charakterystyk napięciowo-prądowych tego ogranicznika przedstawione są na Rys. 5.27. Zastosowanie długiego cylindra nadprzewodnikowego, długiego rdzenia otwartego i długiego uzwojenia pierwotnego sprawiło, że otrzymane charakterystyki napięciowo-prądowe są zadowalające. Zależność współczynnika ograniczania od wartości prądu pierwotnego w tym ograniczniku przedstawia Rys. 5.28. Maksymalną wartość równą 10,5 współczynnik ograniczania osiąga przy prądzie pierwotnym równym 2,5 A.

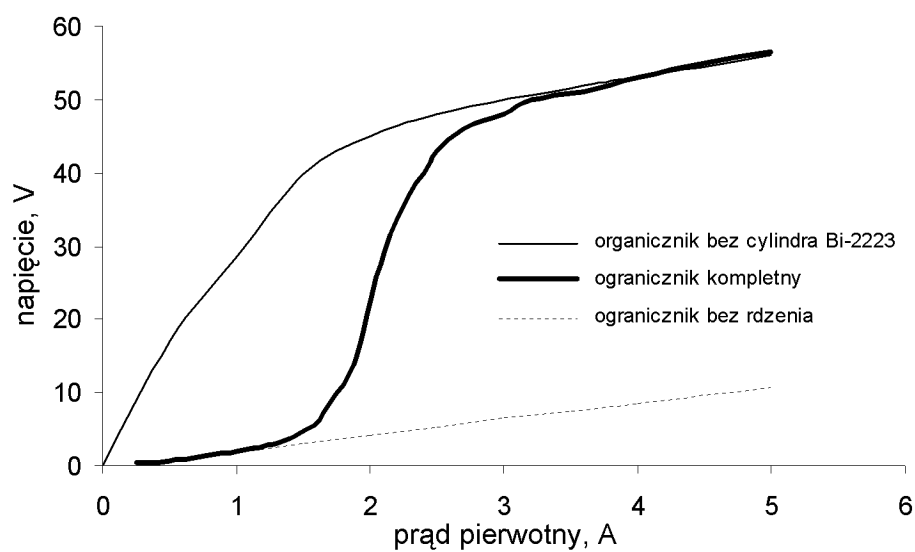


Rys. 5.25. Części składowe ogranicznika prądu z otwartym rdzeniem magnetycznym i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 1210$ A (77 K):

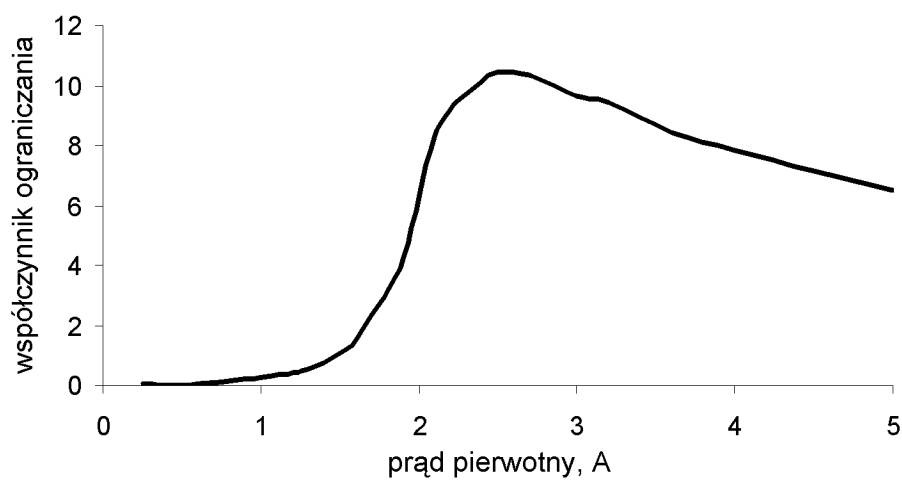
1 - miedziane uzwojenie pierwotne o 1200 zwojach,
2 - cylinder z nadprzewodnika Bi-2223, 3 - rdzeń magnetyczny



Rys. 5.26. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu z otwartym rdzeniem magnetycznym i cylindrem nadprzewodnikowym o $I_c = 1210$ A (77 K)



Rys. 5.27. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z cylindrem o $I_c = 1210$ A (77 K) w temperaturze azotowej

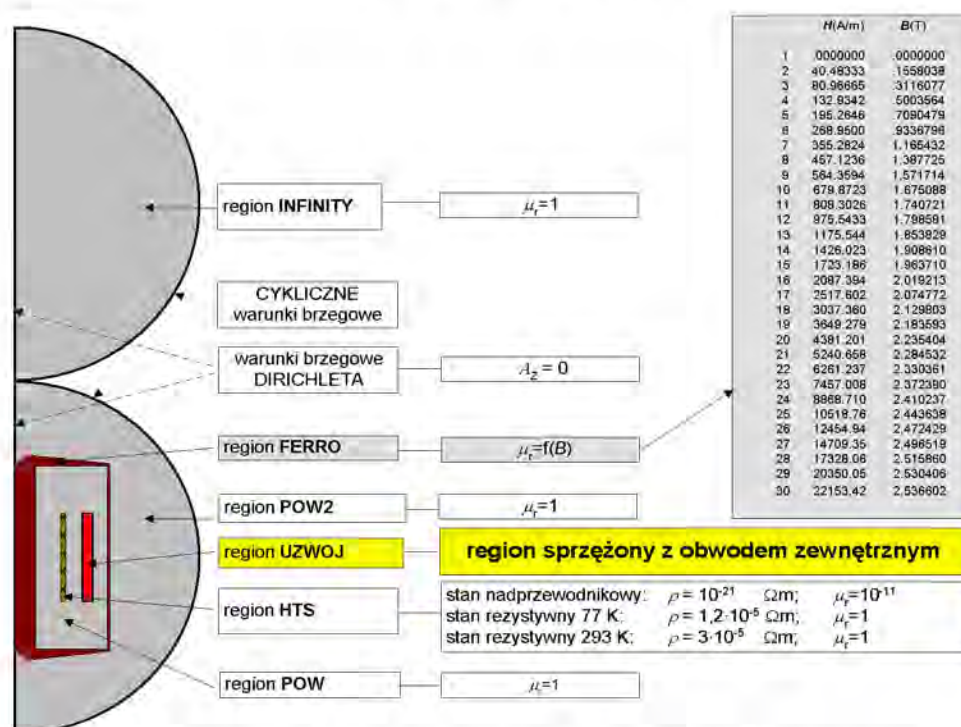


Rys. 5.28. Współczynnik ograniczania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z otwartym rdzeniem magnetycznym i cylindrem o $I_c = 1210$ A (77 K) w temperaturze azotowej

5.3.3. Podsumowanie wyników badań eksperymentalnych ograniczników z otwartymi rdzeniami magnetycznymi

- Parametry indukcyjnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu bazujących na krótkim pierścieniu nadprzewodnikowy 112 A (77 K) są niezadowalające.
- Zmiana współczynnika kształtu (długość/średnica) cylindra nadprzewodnikowego ma duży wpływ na charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników z otwartym rdzeniem.
- Parametry napięciowo-prądowe ogranicznika z otwartym rdzeniem magnetycznym zbudowanego w oparciu o długi pierścień nadprzewodnikowy 1210 A (77 K) nie odbiegają od parametrów ograniczników z rdzeniem zamkniętym.

5.4. Polowo-obwodowy model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego z cylindrem Bi-2223 625 A (77 K) i zamkniętym rdzeniem magnetycznym



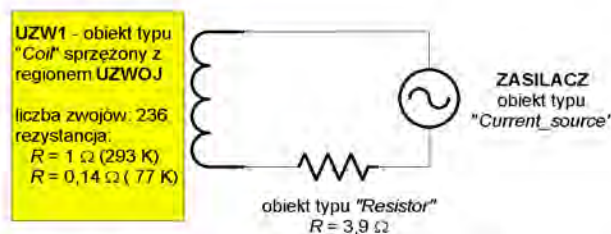
Rys. 5.29. Geometria i właściwości regionów części polowej modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego – Flux2D

Model numeryczny, zweryfikowany eksperymentalnie, pozwala w prosty i tani sposób wykorzystać wyniki eksperymentalne do uzyskania odpowiedzi na szereg pytań, związanych z działaniem i wpływem różnych parametrów na pracę nadprzewodnikowego ogranicznika prądu. Model numeryczny ogranicznika wykorzystany został do przeanalizowania wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego.

Model numeryczny opracowany został przy wykorzystaniu modułu magnetodynamicznego MD sprzężonego z obwodem zewnętrznym w programie polowym FLUX2D. Geometria układu rzeczywistego z Rys. 5.1 zastąpiona została uproszczoną geometrią osiowosymetryczną w przestrzeni 2D – Rys. 5.29. Model obliczeniowy składa się z 6 obszarów i 4 brzegów, na których zdefiniowane są warunki brzegowe:

CYKLICZNE – brzegu otwarty,

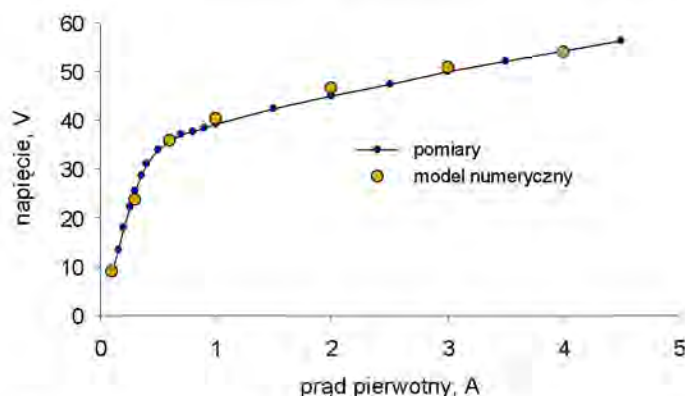
DIRICHLETA – oś obrotu.



Rys. 5.30. Schemat część obwodowej modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego – FLUX2D

Na Rys. 5.30 przedstawiono schemat części obwodowej modelu numerycznego ogranicznika prądu (FLUX2D), który odpowiada funkcjonalnie schematowi z Rys. 5.4. Do weryfikacji geometrii oraz właściwości fizycznych regionów modelu numerycznego wybrane zostały wyniki pomiarów w temperaturze pokojowej. Na Rys. 5.31 przedstawione zostały wyniki pomiarów napięcia na ograniczniku w funkcji prądu w temperaturze pokojowej oraz wyniki obliczeń przy wykorzystaniu modelu numerycznego.

Na Rys. 5.32 przedstawione zostały wyniki pomiarów napięcia na ogranicznikach (rdzenie magnetyczne o przekrojach 2 cm x 2 cm i 2 cm x 3 cm) w funkcji prądu w temperaturze 77 K oraz wyniki obliczeń przy użyciu modeli numerycznych w stanach nadprzewodzącym oraz rezystywnym. Linia przerywaną zaznaczone zostały teoretyczne przebiegi zmian napięcia na ogranicznikach w funkcji prądu przy założeniu, że cylinder nadprzewodnikowy znajduje się w stanie nadprzewodzącym, jeżeli prąd skuteczny płynący w nim jest mniejszy niż 625 A (2,65 A w uzwojeniu pierwotnym) oraz w stanie rezystywnym, gdy prąd skuteczny w pierścieniu nadprzewodnikowym jest większy niż 625 A.



Rys. 5.31. Charakterystyka napięciowo-prądowa nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z cylindrem o $I_c = 625$ A (77 K) i zamkniętym rdzeniem magnetycznym o przekroju poprzecznym 2 cm x 2 cm w temperaturze pokojowej (293 K)

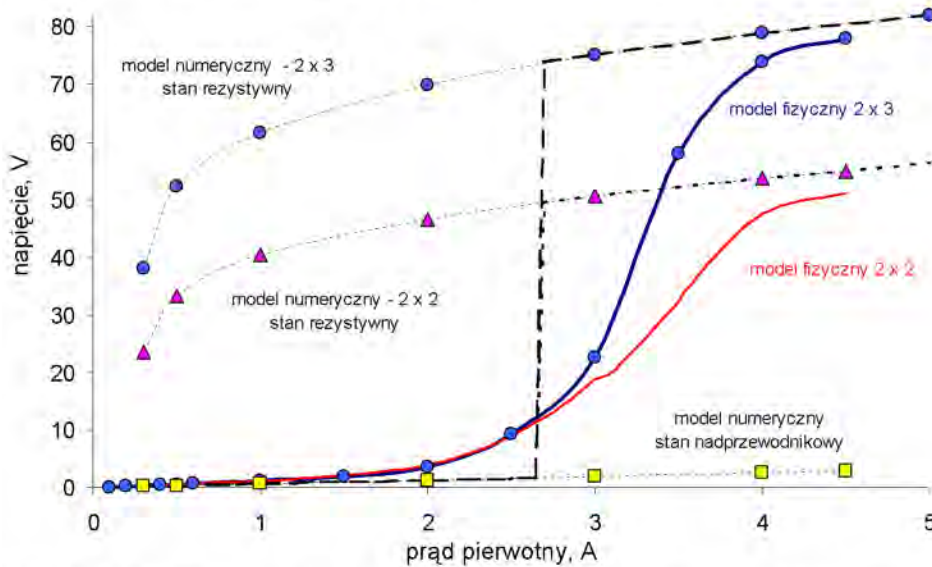
Dla prądu pierwotnego do 1 A charakterystyki napięciowo-prądowe modeli numerycznych w stanie nadprzewodzącym niemal pokrywają się z charakterystykami modeli fizycznych. Dla prądu pierwotnego powyżej 4 A charakterystyki modeli fizycznych zaczynają się zbliżać do charakterystyk napięciowo-prądowych modeli numerycznych w stanie rezystywnym.

Rzeczywista charakterystyka napięciowo-prądowa modelu fizycznego ograniczona jest od dołu charakterystyką modelu numerycznego w stanie nadprzewodzącym oraz od góry charakterystyką modelu w stanie rezystywnym (Rys. 5.32). Jak to można wywnioskować z wykresów na Rys. 5.32 prąd znamionowy tych ograniczników powinien mieścić się w przedziale od 1 A do 1,5 A a wtedy prąd ograniczany może być zawarty w przedziale od 5 A do 7,5 A (5-krotność prądu znamionowego). To pokazuje, że porównania pomiędzy charakterystykami z pomiarów można zastąpić porównaniami charakterystyk z obliczeń w modelach numerycznych w stanach nadprzewodzącym i rezystywnym. Aby otrzymać napięciowo-prądową charakterystykę numeryczną należy ustalić odpowiednią geometrię, właściwości regionów i stan (nadprzewodzący lub rezystywny) w połowej części modelu numerycznego z Rys. 5.29 i obliczać napięcia na ograniczniku dla różnych prądów w obiekcie **ZASILACZ** (typu "Current_source") w obwodowej części modelu numerycznego (Rys. 5.30).

W obliczeniach zmierzających do określenia wpływu wybranych parametrów na charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowego ogranicznika prądu jako parametr umożliwiający porównywanie charakterystyk wybrana została względna procentowa zmiana napięcia w odniesieniu do charakterystyk napięciowo-prądowych modelu numerycznego ogranicznika o geometrii modelu fizycznego z rdzeniem 2 cm x 2 cm i właściwościami regionów odpowiadających odpowiednim stanom (nadprzewodzącym lub rezystywnym):

$$\Delta U_{\%} = 100\% \cdot \frac{U - U_0}{U_0} \quad (5-2)$$

gdzie: U – napięcie na ograniczniku ze zmienioną geometrią, U_0 – napięcie na ograniczniku z rdzeniem 2 cm x 2 cm.

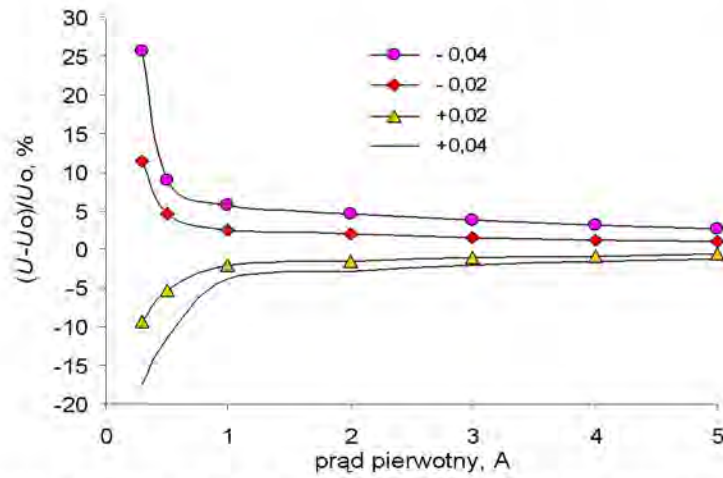


Rys. 5.32. Charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem o $I_c = 625$ A (77 K) z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi o różnych przekrojach w temperaturze 77 K.

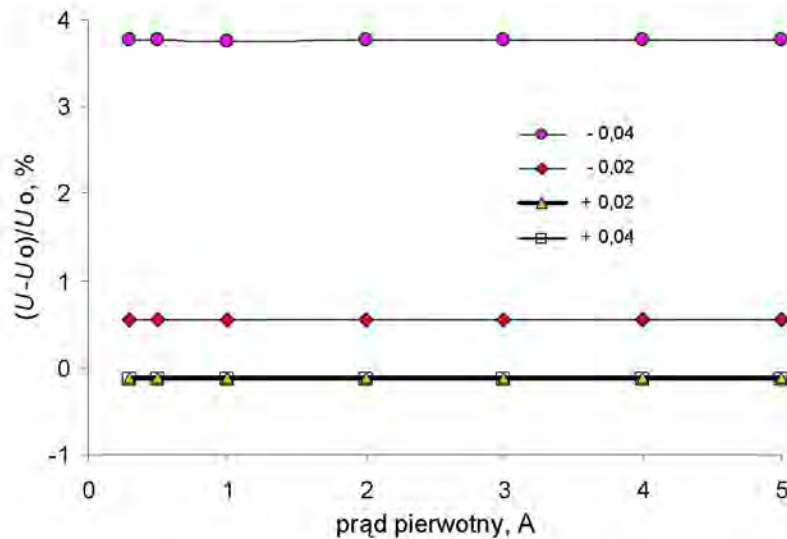
5.4.1. Wpływ parametrów konstrukcyjnych na napięcie na ograniczniku

Rys. 5.33 przedstawia zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych ogranicznika w stanie rezystywnym przy zmianie wysokości kolumny rdzenia magnetycznego. Rys. 5.34 przedstawia zmiany tych charakterystyk dla ogranicznika w stanie nadprzewodzącym. Liczby w legendzie opisujące poszczególne krzywe oznaczają długość (w metrach) o jaką wzrasta wysokość kolumny. Znak minus oznacza zmniejszenie wysokości w stosunku do wysokości kolumny modelu fizycznego.

Zwiększenie wysokości kolumny o 0,02 m i 0,04 m powoduje zmniejszenie napięcia w stanie rezystywnym o od 0,7 % do 17,4 % (Rys. 5.33) oraz minimalne zmniejszenie napięcia w stanie nadprzewodzącym ($\sim 0,1$ %, Rys. 5.34). Zmniejszenie wysokości kolumny o 0,02 m i 0,04 m powoduje zwiększenie napięcia w stanie rezystywnym o od 1 % do 25,6 % (Rys. 5.33) oraz zwiększenie napięcia w stanie nadprzewodzącym (Rys. 5.34) o 0,6 % oraz 3,8 %.



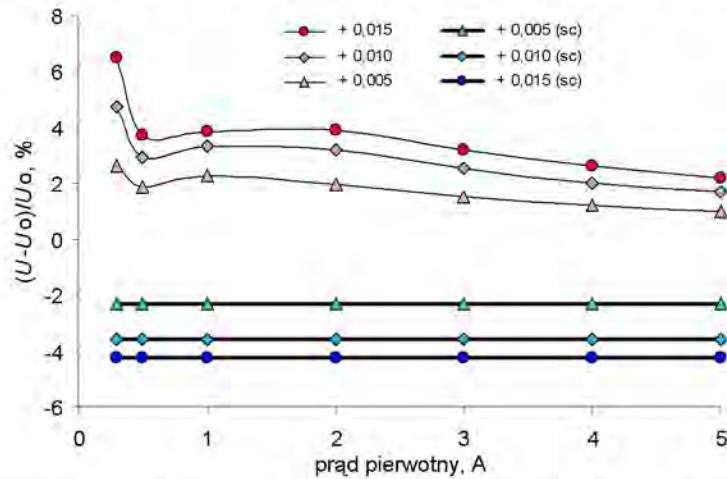
Rys. 5.33. Zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z cylindrem o $I_c = 625$ A (77 K) i zamkniętym rdzeniem magnetycznym o przekroju poprzecznym 2 cm x 2 cm w temperaturze 77 K w stanie rezystywnym przy zmianie wysokości kolumny rdzenia magnetycznego



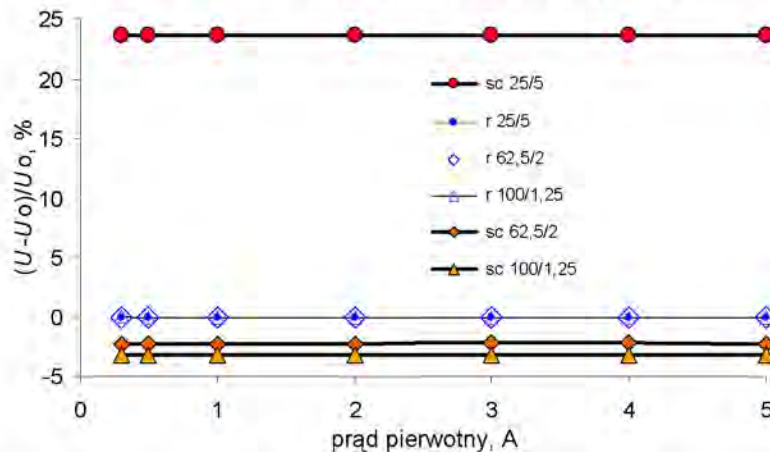
Rys. 5.34. Zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z cylindrem o $I_c = 625$ A (77 K) i zamkniętym rdzeniem magnetycznym o przekroju poprzecznym 2 cm x 2 cm w temperaturze 77 K w stanie nadprzewodzącym przy zmianie wysokości kolumny rdzenia magnetycznego

Rys. 5.35 przedstawia zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych ogranicznika w stanie rezystywnym oraz nadprzewodzącym (sc) przy zmianie

szerokości okna rdzenia magnetycznego. Liczby w legendzie opisujące poszczególne krzywe oznaczają długość (w metrach) o jaką wzrasta szerokość okna. Zwiększenie szerokości okna o odpowiednio 0,005 m, 0,01 m oraz 0,015 m powoduje zwiększenie napięcia w stanie rezystywnym w zakresie od 1 % do 6,5 % (Rys. 5.35) oraz zmniejszenie napięcia w stanie nadprzewodzącym o 2,3-4,2 % (Rys. 5.35).



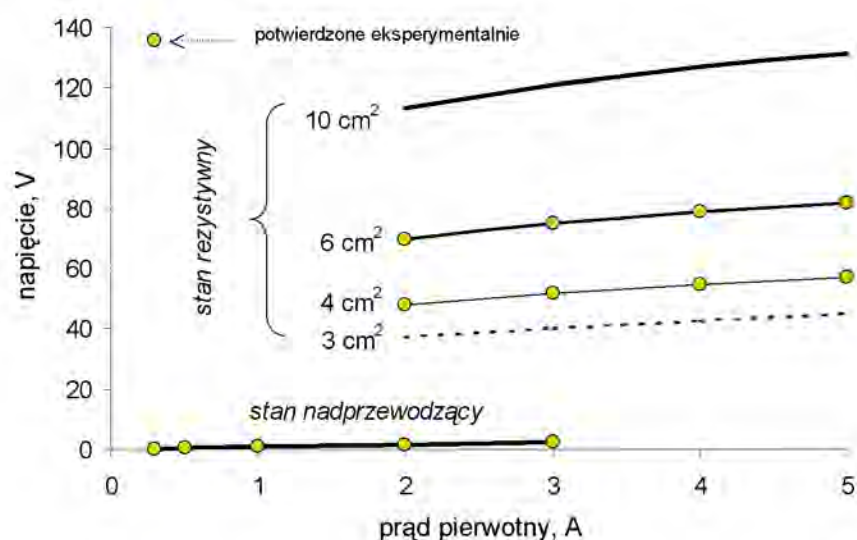
Rys. 5.35. Zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z cylindrem o $I_c = 625$ A (77 K) i zamkniętym rdzeniem magnetycznym o przekroju poprzecznym 2 cm x 2 cm w temperaturze 77 K w stanie rezystywnym oraz nadprzewodzącym (sc) przy zmianie szerokości okna rdzenia magnetycznego



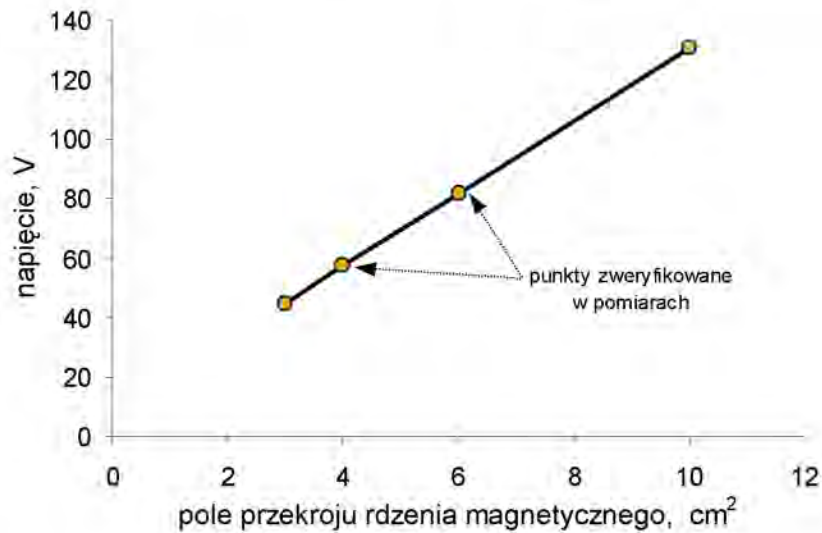
Rys. 5.36. Zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z zamkniętym rdzeniem magnetycznym o przekroju poprzecznym 2 cm x 2 cm w temperaturze 77 K w stanie rezystywnym (r) oraz nadprzewodzącym (sc) przy zmianie kształtu cylindra nadprzewodnikowego (wysokość (mm)/grubość (mm))

Rys. 5.36 przedstawia zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych ogranicznika w stanie rezystywnym (r) oraz nadprzewodzącym (sc) przy zmianie kształtu cylindra nadprzewodnikowego. Liczby w legendzie opisujące poszczególne krzywe oznaczają kształt cylindra nadprzewodnikowego (wysokość (mm)/grubość (mm)). W modelu fizycznym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu cylinder ma wymiary 50/2,5 (mm/mm). W trakcie obliczeń, kształt cylindra był tak zmieniany, aby utrzymać stałe pole przekroju cylindra = 125 mm². Zmniejszenie wysokości cylindra do 25 mm spowodowało znaczne zwiększenie napięcia (o 23,6 %) w stanie nadprzewodzącym (Rys. 5.36). Zwiększenie wysokości cylindra do 62,5 mm oraz 100 mm spowodowało zmniejszenie napięcia odpowiednio o 2,2 % oraz 3,2 % w stanie nadprzewodzącym. Zmiany w kształcie cylindra nie mają wpływu na napięcie na ograniczniku w stanie rezystywnym.

Na Rys. 5.37 pokazane zostały zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych ogranicznika w stanach nadprzewodzącym i rezystywnym w funkcji pola przekroju rdzenia stalowego. Zmiany pola przekroju rdzenia stalowego nie wpływają na charakterystyki napięciowo-prądowe modelu numerycznego ogranicznika w stanie nadprzewodnikowym. Można wnioskować na podstawie Rys. 5.37, że pole przekroju rdzenia stalowego powinno być tak duże, jak to możliwe dla danego pierścienia nadprzewodnikowego. W badanych modelach fizycznych ograniczników z pierścieniem o prądzie krytycznym = 625 A (77 K) tylko pierścień jest schłodzony do temperatury 77 K natomiast rdzeń stalowy i miedziane uzwojenie pierwotne pracują w temperaturze pokojowej (293 K).



Rys. 5.37. Zmiany charakterystyk napięciowo-prądowych w modelu numerycznym ogranicznika z cylindrem o $I_c = 625$ A (77 K) w funkcji pola przekroju rdzenia w temperaturze 77 K



Rys. 5.38. Napięcie na ograniczniku z cylindrem o $I_c = 625$ A (77 K) w funkcji pola przekroju rdzenia dla prądu 5 A w temperaturze 77 K

Taka konfiguracja redukuje zużycie ciekłego azotu, ponieważ straty w rdzeniu i uzwojeniu miedzianym nie podgrzewają ciekłego azotu. Jednak kriostat i naczynie azotowe w sposób istotny ograniczają (zwłaszcza w małych ogranicznikach) maksymalny przekrój rdzenia stalowego, który można zastosować. W badanych ogranicznikach z pierścieniem 625 A (77 K) kriostat ogranicza pole przekroju rdzenia do 10 cm². Biorąc pod uwagę tylko średnicę wewnętrzną pierścienia 625 A (77 K), pole przekroju rdzenia stalowego mogłoby wynosić 27 cm². Jako, że zależność napięcia na ograniczniku w stanie rezystywnym od pola przekroju rdzenia stalowego jest niemal liniowa (Rys. 5.38), to wzrost pola przekroju rdzenia do 27 cm² spowodowałby wzrost napięcia ograniczania 2,7 krotnie.

5.5. Podsumowanie wyników badań numerycznych i eksperymentalnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego

- Polowo-obwodowy model numeryczny wybranego ogranicznika prądu, zweryfikowany eksperymentalnie jest narzędziem pomocnym przy poszukiwaniu optymalnych zależności pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi i elektromagnetycznymi ogranicznika zmierzających do maksymalizacji współczynnika ograniczania prądu.

- Wzrost szerokości okna rdzenia magnetycznego ma korzystny, lecz niewielki wpływ na charakterystyki napięciowo-prądowe ogranicznika zarówno w stanie nadprzewodzącym jak i rezystywnym.
- Zmiany wysokości okna rdzenia magnetycznego mają mały i niejednoznaczny wpływ na charakterystyki napięciowo-prądowe ogranicznika.
- Wysokość cylindra nadprzewodnikowego powinna być nie mniejsza niż wysokość miedzianego uzwojenia pierwotnego. W przeciwnym wypadku wystąpi niekorzystny wzrost napięcia na ograniczniku w stanie nadprzewodzącym.
- Pole przekroju rdzenia magnetycznego ma bardzo silny wpływ na charakterystyki napięciowo-prądowe ogranicznika. Rdzeń magnetyczny powinien wypełniać wewnętrzną przestrzeń cylindra nadprzewodnikowego w stopniu możliwie największym.
- Chłodzenie wszystkich komponentów ogranicznika umożliwia zwiększenie (w znaczącym stopniu) pola przekroju poprzecznego rdzenia magnetycznego, którego wymiary w przypadku, gdy chłodzony jest tylko cylinder nadprzewodnikowy, ograniczane są przez kriostat.
- Cylindry z nadprzewodnika Bi-2223 o prądach krytycznych 112 A (77 K), 625 A (77 K) oraz 1210 A (77 K) umożliwiają budowanie nadprzewodnikowych indukcyjnych ograniczników prądu o zadowalających parametrach zarówno z zamkniętym jak i otwartym rdzeniem magnetycznym.
- W ogranicznikach indukcyjnych z zamkniętym rdzeniem magnetycznym zastosowanie rdzeni o większych przekrojach poprzecznych oraz o lepszych parametrach magnetycznych poprawia charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników indukcyjnych i zwiększa współczynniki ograniczania prądu, co potwierdzają zarówno badania eksperymentalne jak i obliczenia numeryczne.
- W ogranicznikach z otwartym rdzeniem magnetycznym decydującym parametrem jest kształt cylindra nadprzewodnikowego, który musi być możliwie wydłużony.

6. ZASTOSOWANIA NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU

6.1. *Wprowadzenie*

Rozwój systemów elektroenergetycznych powoduje wzrost poziomu prądów zwarcia. Wzrost ten negatywnie oddziałuje na urządzenia elektroenergetyczne. Zwiększanie się poziomu prądów zwarciovych zaostrza wymagania dynamicznej i cieplnej stabilności urządzeń energetycznych, takich jak: generatory, transformatory, wyłączniki prądowe i prowadzi do znacznego wzrostu projektowanych rozmiarów, ciężaru i kosztów tych urządzeń. Innym negatywnym efektem warunków zwarciovych jest zakłócenie równoległej pracy generatorów i maszyn elektrycznych. Jednym z obiecujących rozwiązań zagadnienia projektowania warunków zwarciovych jest zastosowanie szybko działającego nieliniowego ogranicznika prądów zwarcia. Sukcesy technologii wytwarzania nadprzewodników wysokotemperaturowych stwarzają warunki do wprowadzenia nadprzewodnikowych ograniczników prądu do praktyki przemysłowej już w niedalekiej przyszłości.

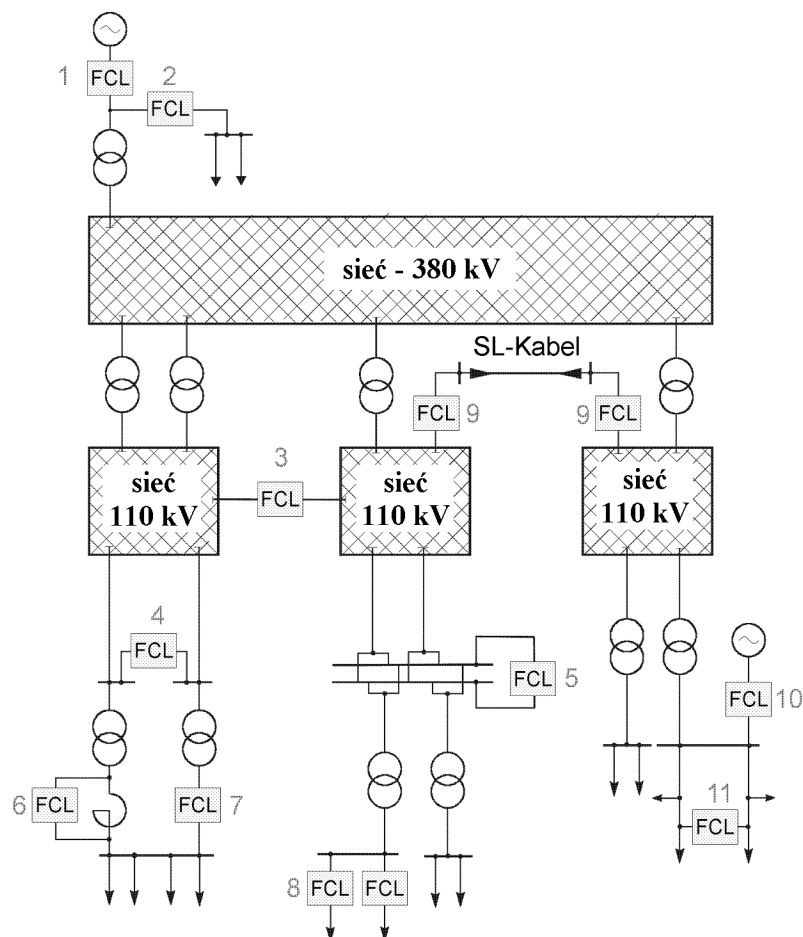
6.2. *Warunki współpracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu z siecią elektroenergetyczną*

Zachowanie się układu elektroenergetycznego podczas zwarcia jest charakteryzowane mocą zwarciovą, która jest odwrotnie proporcjonalna do impedancji zwarcioviej. Duża moc zwarciovą podczas znamionowej pracy prowadzi do małych spadków napięcia, wysokiej stabilności zarówno stacjonarnej jak i przejściowej oraz niewielkich zakłóceń systemu energetycznego. W przypadku zwarcia korzystna jest niska wartość mocy zwarcioviej, gdyż oznacza to małe naprężenia cieplne i mechaniczne w instalacjach i urządzeniach. Należy zatem znaleźć kompromis przy określaniu mocy zwarcioviej. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu oferuje optymalne rozwiązanie tego zagadnienia, ponieważ ogranicza automatycznie szczytowy prąd zwarcia dzięki szybkiemu przejściu od stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego. Dalsze korzyści, takie jak prawie zerowa impedancja podczas pracy znamionowej oraz szybkie i automatyczne odzyskanie stanu nadprzewodzenia po zadziałaniu czynią nadprzewodnikowy ogranicznik prądu bardzo atrakcyjnym składnikiem układów elektroenergetycznych.

6.3. *Lokalizacja nadprzewodnikowych ograniczników prądu w układach energetycznych*

Istnieje wiele lokalizacji w sieciach elektroenergetycznych o napięciach do 110 kV oraz do 380 kV (rys. 2), gdzie nadprzewodnikowe ograniczniki prądu

zwarcia oferują techniczne i ekonomiczne korzyści. Poniżej opisano możliwe lokalizacje nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcia w systemie energetycznym oraz określono ich zadania w przypadku zwarć, jak też korzyści ekonomiczne, jakie przynoszą wymienione lokalizacje (oznaczenia lokalizacji jak na rysunku 6.1).



Rys.6.1. Możliwości lokalizacji nadprzewodnikowych ograniczników prądu (FCL) w systemach elektroenergetycznych [17]

1. Przyłącze generatora systemu

Ogranicznik w przyłączy generatora zmniejsza moc zwarciovą w sieci w warunkach zwarcia. Prowadzi to do mniejszych naprężeń w instalacjach i urządzeniach.

2. Urządzenia pomocnicze elektrowni

Urządzenia pomocnicze elektrowni zwykle mają dużą moc zwarciovą, którą można znacznie zmniejszyć przy użyciu ogranicznika nadprzewodnikowego.

3. Sprzężenie pomiędzy sieciami

Sprzężenie sieci poprzez nadprzewodnikowy ogranicznik prądu przynosi korzyści w regulacji przepływu energii, stabilizacji napięcia, pewności zasilania, stabilizacji systemu na zakłócenia bez zwiększania mocy zwarciowej w sieciach.

4. Sprzężenie szyn zbiorczych transformatorów

Umieszczenie nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w łączniku sprzęgowym szyn zbiorczych powoduje powiększenie sieci energetycznej bez zwiększania jej mocy zwarciowej. Lokalizacja ta przynosi podobne korzyści jak lokalizacja opisana w p. 3).

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

5. Dławik zbocznikowany ogranicznikiem

Podczas pracy znamionowej nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwiera dławik zwarciowy, dzięki czemu unika się na nim spadku napięcia i strat mocy.

6. Przewód zasilający po stronie wtórnej transformatora

Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu w przewodzie zasilającym po stronie wtórnej transformatora zabezpiecza zasilane urządzenia. Dzięki mniejszym naprężeniom w tych urządzeniach można uzyskać oszczędności materiałów konstrukcyjnych poprzez mniejsze ich rozmiary.

7. Połączenie szyn zbiorczych

Zamiast użycia ogranicznika w przewodzie zasilającym wychodzącym z wtórnego uzwojenia transformatora, można go umieścić w połączeniu szyn zbiorczych. Mimo, iż lokalizacja ta wymaga użycia większej liczby ograniczników, zmniejsza ona jednak wymagania co do warunków pracy znamionowej jak i zwarciowej.

8. Połączenie z innymi urządzeniami nadprzewodnikowymi

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu są konieczne do zabezpieczenia innych urządzeń nadprzewodnikowych przed utratą nadprzewodzenia, co może spowodować ich uszkodzenie lub długi czas przerwy w pracy.

9. Dołączenie lokalnych generatorów

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu mogą być użyteczne w miejscu dołączenia do układu elektroenergetycznego później zainstalowanych lokalnych generatorów elektrociepłowni blokowych lub elektrowni wiatrowych. Ich zadaniem w tym miejscu jest zmniejszenie udziału dołączonych generatorów w prądzie zwarcia systemu elektroenergetycznego.

10. Tory pętlowe (dwustronnie zasilane)

W sieciach średniego napięcia tory pętlowe są czasami otwarte ze względu na prądy zwarciove. Obwody te mogą być zamknięte poprzez nadprzewodnikowy ogranicznik prądu, dzięki czemu polepsza się pewność zasilania i równowaga napięciowa, ponadto zmniejszeniu ulegają straty mocy w obwodzie.

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu mogą być umieszczane szeregowo z klasycznymi wyłącznikami prądowymi w różnych miejscach podstacji energetycznej. Wyłączniki te są uruchamiane dopiero po ograniczeniu prądu zwarcia przez ograniczniki nadprzewodnikowe do wartości prądu, na którą są zaprojektowane te wyłączniki.

Spośród omówionych lokalizacji, najbardziej pożądane wydają się być połączenia szyn zbiorczych oraz połączenia pomiędzy sieciami. Współczesne projekty podstacji energetycznych uwzględniają dużą różnicę pomiędzy mocą znamionową a mocą zwarciową systemu. Jeśli zmniejszy się stosunek prądów zwarciowych i znamionowych dzięki użyciu nadprzewodnikowych ograniczników prądu, rzeczywistą moc podstacji można zwiększyć bez potrzeby przeprojektowywania transformatorów. W takim przypadku zainwestowanie w instalację nadprzewodnikowych ograniczników prądu w systemie elektroenergetycznym może okazać się bardzo korzystne.

6.4. *Techniczne i ekonomiczne korzyści zastosowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcia w systemach energetycznych*

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu umożliwiają tworzenie nowych, niekonwencjonalnych konfiguracji sieci elektroenergetycznych. Trudno jest jednak oszacować ekonomiczną wartość tych konfiguracji, gdyż jak dotąd, nie były one kompleksowo badane.

Próby oszacowania ekonomicznych korzyści zastosowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu w systemach elektroenergetycznych podjęto w pracach [17] i [23]. Metoda oszacowania ekonomicznego koncentruje się na określeniu oszczędności spodziewanych dzięki użyciu nadprzewodnikowych ograniczników prądu. Jest to użyteczne, ponieważ jak dotąd, nie znane są koszty eksploatacji nadprzewodnikowych ograniczników prądu w sieciach elektroenergetycznych. Analiza dokonana w pracy [17] dla założonych parametrów eksploatacyjnych sieci elektroenergetycznej pokazuje, że następujące lokalizacje są najbardziej korzystne z ekonomicznego punktu widzenia:

- 1) przyłącze generatora systemu,
- 2) urządzenia pomocnicze elektrowni,
- 3) sprzężenie pomiędzy sieciami średniego napięcia,
- 4) sprzężenie szyn zbiorczych,
- 5) przewód zasilający po stronie wtórnej transformatora,
- 6) przyłącze lokalnych generatorów

Należy jednak zauważyć, że powyższa analiza ograniczyła się tylko do sieci miejskiej i do lokalizacji w sieci nie przekraczających napięcie 110 kV. Techniczne

i ekonomiczne korzyści badanych lokalizacji nadprzewodnikowych ograniczników prądu w sieciach elektroenergetycznych zestawiono w Tab 6.1.

Tab. 6.1 Techniczne i ekonomiczne korzyści umieszczenia nadprzewodnikowych ograniczników prądu w sieciach elektroenergetycznych [17]

L.p.	Lokalizacja	Korzyści techniczne	Korzyści ekonomiczne
1.	przyłącze generatora systemu	+ ograniczenie mocy zwarciowej w warunkach zwarcia, + bardziej elastyczne lokalizacje elektrowni	\$ opóźnienie konieczności modernizacji systemu
2.	urządzenia pomocnicze elektrowni	+ wyższa moc zwarciowa podczas pracy znamionowej, + mniejsze zakłócenia i spadki napięć w systemie + większa stabilność pracy w stanach stacjonarnych jak i przejściowych	\$ zastąpienie konwencjonalnych urządzeń elektroenergetycznych, \$ zmniejszenie rozmiarów aparatury łączeniowej urządzeń pomocniczych elektrowni
3.	sprężenie pomiędzy sieciami średniego napięcia	+ wyższa moc zwarciowa podczas pracy znamionowej, + mniejsze zakłócenia i spadki napięć w systemie, + większa stabilność pracy w stanach stacjonarnych jak i przejściowych, + większa pewność zasilania energią	\$ mniejsze straty w sieci
4.	sprężenie szyn zbiorczych	+ wyższa moc zwarciowa podczas pracy znamionowej, + użycie transformatorów o małym napięciu zwarcia, + mniejsze zakłócenia i spadki napięć w systemie, + większa stabilność pracy w stanach stacjonarnych jak i przejściowych, + brak przestojów podczas awarii transformatora, + zabezpieczenie wrażliwych odbiorników energii elektrycznej	\$ zastąpienie konwencjonalnych urządzeń elektroenergetycznych, \$ mniejsze straty w sieci (nie dotyczy badanej sieci), \$ wyższe obciążenie odbiorcy energii elektrycznej (nie dotyczy badanej sieci),
5.	przewód zasilający po stronie wtórnej transformatora	+ wyższa moc zwarciowa podczas pracy znamionowej, + użycie transformatorów o małym napięciu zwarcia, + mniejsze zakłócenia i spadki napięć w systemie, + większa stabilność pracy w stanach stacjonarnych jak i przejściowych, + brak przestojów podczas awarii transformatora	\$ mniejsze straty w transformatorze, \$ opóźnienie konieczności modernizacji systemu, \$ mniejsze rozmiary instalacji i urządzeń (nie dotyczy badanej sieci), \$ wyższe obciążenie odbiorcy energii elektrycznej (nie dotyczy badanej sieci)
6.	przyłącze lokalnych generatorów	+ ograniczenie mocy zwarciowej w warunkach zwarcia, + elastyczność w umiejscowieniu lokalnych generatorów	\$ zastąpienie konwencjonalnych urządzeń elektroenergetycznych, \$ opóźnienie konieczności modernizacji systemu

6.5. Przykłady projektów i zastosowań nadprzewodnikowych ograniczników prądu w sieciach elektroenergetycznych

Koncepcje wykorzystania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcia w układach elektroenergetycznych potwierdza wiele zbudowanych i pomyślnie przetestowanych prototypów (Tab.6.2), opartych zarówno na rozwiązaniach typu rezystancyjnego jak i indukcyjnego.

W ostatnich latach zbudowano kilka przemysłowych rozwiązań układów nadprzewodnikowych ograniczników prądu w USA, m.in. przez firmę General Atomic [1,6] (ograniczniki typu rezystancyjnego o napięciach znamionowych 2,4 kV oraz 15 kV), a także w Japonii [4] (ograniczniki o napięciach 6,6 kV oraz 22 kV). W Europie zrealizowano lub realizuje się kilka dużych i szereg małych projektów nadprzewodnikowych ograniczników prądu [14].

Tab. 6.2 Prototypy nadprzewodnikowych ograniczników prądu [24].

Ograniczniki typu indukcyjnego				
Kraj	Firma	Napięcie znamionowe, V	Prąd znamionowy, A	Rok realizacji
Szwajcaria	ABB	10 500, 3-fazowy	70	1997
Izrael	Ben-Gurion University	1 000	25	1994
Szwajcaria	ABB	480	10	1993
Niemcy	Daimler-Benz	200	5	1995
Kanada	Hydro Quebec	120	73	1995
Ograniczniki typu rezystancyjnego				
Niemcy	Siemens AG Erlangen Univ.	750	135	1998
Japonia	Toshiba Super G-M	220	100	1998
Japonia	Tokyo Univ. Nippon Steel	10 6 000	400 2 000	1998
Niemcy	Techn. Univ. Braunschweig	235	14,4	1998

Firma szwajcarsko-szwedzka ABB zainstalowała w elektrowni wodnej w Szwajcarii indukcyjny trójfazowy układ nadprzewodnikowego ogranicznika prądu o mocy 1,2 MVA [20]. Następnie testowała ona bardziej zwarty prototyp o mocy 1,6 MVA typu rezystancyjnego przy użyciu nadprzewodnika wysokotemperaturowego z materiału Bi-2212 (Tab. 2.2) 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 $20 \times 20 \text{ cm}^2$, pokrytych cienkimi (ok. $1,2 \text{ }\mu\text{m}$) warstwami nadprzewodnika YBCO (Tab. 2.2). Elementy przełączające wykazywały wartości krytyczne gęstości prądu ponad 10^9 A/m^2 z gęstościami mocy przekraczającymi 3 MW/m^2 . 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 [14] miał na celu zbudowanie i testowanie w 2002 r. jednostki demonstracyjnej o mocy 10 MVA ogranicznika typu rezystancyjnego opartego na materiałach Bi-2212 i YBCO (Tab. 2.2).

W ramach projektu BYFAULT (Barcelona, Hiszpania) [5] 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) [14,27] 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).

6.6. Perspektywy zastosowania ograniczników nadprzewodnikowych w systemach energetycznych

Dzięki zastosowaniu układów nadprzewodnikowych ograniczników prądu 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 nadprzewodnikowych ograniczników prądu, 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, jakie powinny spełniać układy nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcia, podobnie jak transformatory i klasyczne wyłączniki prądowe, 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 nadprzewodnikowych ograniczników prądu 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 nadprzewodnikowych ograniczników prądu na skalę przemysłową będą się również wiązały z koniecznością rozwiązania złożonych problemów, specyficznych dla technologii urządzeń nadprzewodnikowych. Zagadnienia te są w ostatnich latach intensywnie badane, efektem czego są nowe projekty technologiczne i wdrażane konstrukcje, których parametry użytkowe są coraz bliższe wymaganiom stawianym przez współczesne systemy elektroenergetyczne.

7. LITERATURA

Literatura do rozdziału 2

- [1] Strona internetowa: www.superconductors.org
- [2] Brechna H., "Superconducting Magnet Systems", Springer-verlag Berlin, Heidelberg, New York, J.F.Bermann Verlag, Munchen 1973.
- [3] Cyrot m., Pavuna D.: "Nadprzewodniki wysokotemperaturowe"
- [4] Strona internetowa firmy KM Europa Metal: www.thecopperlink.com
- [5] Materiały reklamowe firmy Alstom: www.alstom.com
- [6] Cambridge Material Eyses issue 11: www.msm.cam.ac.uk
- [7] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, W. Lanz, „Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications,” *Physica C* 354 (2001) 27-33.
- [8] B. Gromoll, et al., „Resistive current limiter with YBCO films,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, 1997, pp. 828-831.
- [9] Strona internetowa www.sun.vdi-online.de
- [10] Strona internetowa :www.can.cz
- [11] Strona internetowa :www.itri.loyola.edu
- [12] Strona internetowa firmy American Superconductor <http://www.amsuper.com>

Literatura do rozdziału 3

- [1] L. Salasoo, H. J. Boening, „Superconducting fault current limiter,” Webster J. G. (ed.), *Wiley Encyclop. of Electr. and Electronics Eng.*, vol 20, John Wiley & Sons, Inc., New York 1999.
- [2] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, W. Lanz, „Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications,” *Physica C* 354 (2001) 27-33.
- [3] M. P. Saravolac, P. Vertigen, „Development and testing of a novel design concept for high temperature superconducting fault current limiter,” *CIGRE'2000*, 13-204.
- [4] W. T. Norris, A. Powers, „Fault current limiters using superconductors,” *Cryogenics* 1997, vol. 37, no. 10, pp. 657-665.
- [5] M. Chen, W. Paul, M. Lakner, L. Donzel, M. Hoidis, P. Unternaehrer, R. Weder, M. Mendik, „6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor,” *Physica C* 372-376 (2002), 1657-1663.
- [6] B. Gromoll, et al., „Resistive current limiter with YBCO films,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, 1997, pp. 828-831.
- [7] <http://sun.vdi-online.de/tz-pt/phystech/publikationen/infophystech/ipt08.htm>
- [8] www.can.cz/limiters.htm.
- [9] www.itri.loyola.edu/scpa/10_03.htm.
- [10] T.Janowski, G.Wojtasiewicz, H.Malinowski, S.Kozak, B.Kondratowicz-Kucewicz, „Stanowisko do eksperymentalnych badań nadprzewodników,” *XXIII-SPETO 2000*, Gliwice – Ustroń 2000r, str.171-174.
- [11] T. Janowski, „Recent development and perspectives of superconductivity applications,” *3rd ELMECO*, Nałęczów, 4-6 June 2000, pp. 166-173.
- [12] http://www.defu.dk/indhold/elt/superled/1_56.pdf

- [13] T. Onishi, A. Nii, „Investigations on current limiting performances in magnetic shield type high T_C superconducting fault current limiter,” *Cryogenics* 1997, vol. 37, no. 4, pp. 181-185.
- [14] C. Meggs, G. Dolman, T. C. Shields, J. S. Abell, T. W. Button, „HTS thick film components for fault current limiter applications,”
dostępny: <http://www.fmg.bham.ac.uk/papers/superconductors>
- [15] L. Jansac, M. Majoros, F. Frangi, S. Zannella, „Anomalous behavior of inductive fault current limiter models based on high- T_C superconductors,” *Physica C* 247 (1995) 231-238.
- [16] C. Lee, H. M. Kim, H. Kang, T. J. Kim, T. K. Ko, E. R. Lee, S. Lee, K. Y. Yoon, „A variation of impedance of a high- T_C superconducting fault current limiter with an open core,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 12, no. 1, March 2002, pp. 846-850.
- [17] K. Fujikawa, Y. Shirai, T. Nitta, K. Hagiwara, T. Shibata, „Experimental study on adjustability of superconducting fault current limiter with adjustable trigger current level,” dostępny: <http://www.sensor.northgrum.com/stc/asc>
- [18] S. Bolkowski, „Teoria obwodów elektrycznych,” WNT Warszawa 2001.
- [19] J. X. Jin, S. X. Dou, C. Cook, C. Grantham, M. Apperley, T. Beales, „Magnetic saturable reactor type HTS fault current limiter for electrical application,” *Physica C* 341-348 (2000) 2629-2630.
- [20] N. A. Chernoplekov, „State of the art in applied high-current superconductivity,” *Conferences and symposia, Physics – Uspekhi* 45 (6), June 2002, pp. 659-665.
- [21] J. Zhang, et al., „Dynamic simulation and test of a three-phase high T_C superconducting fault current limiter,” 17th International Conference on Magnet Technology, Genewa 24-28 September (9) 2001.
- [22] S. Lee, et al., „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 September (9) 2001.
- [23] E. R. Lee, et al., „Test of DC reactor type fault current limiter using SMES magnet for optimal design,” 17th International Conference on Magnet Technology, Genewa 24-28 September (9) 2001.

Literatura do rozdziału 4

- [1] M.M.Ali and H.R.Bolton Electrical Engineering Division, School of Engineering, Cardiff University, UK
- [2] M.Noë, K.P.Juengst, F.Werfol, M.Baecker, J.Bock, S.Elschner, “Quench Behaviour of high Temperature Superconducting Bulk Material in Resistive Fault Current Limiters”: 4th European Conference on Applied Superconductivity, 14-17.9.1999 Sitges Spain
- [3] H.Shimizsu, Y.Yokomizu, T.Matsumura and N.Murayama, Proposal of Flux Flow Resistance Type Fault Current Limiter using Bi2223 High T_C Superconducting Bulk: 17th International Conference on Magnet Technology, 24-28 sept.2001, Genewa
- [4] J.W.Nielsen, J.J.Ostergaard, Applications of HTS Fault Current Limiter in the Danish Utility Network 2000.

- [5] M.Noë, K.P.Juengst, F.Werfol, L.Covey, A.Wolf, S.Elschner, Investigation of high-Tc bulk material for use in resistive Superconducting Fault Current Limiters; Preprint at 2000, 18-22 sept. 2000, Virginia Beach, USA
- [6] M.Noë, K.P.Juengst, F.Werfol, F.Brener, A.Wolf, S.Elschner, R.Kreutz; "Testing bulk HTS modules for resistive superconducting fault current limiters"; 2LA02, Preprint presented at ASC 2002, 4-9. August 2002, Huston
- [7] L.Bromberg, R.Torti, M.Tekula; High Temperature Superconducting Magnet Control Actuators for the NGST; PSFC/RR-99-4; Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139
- [8] M.Noë, K.P.Juengst, F.Werfol, , S.Elschner, J.Bock, A.Wolf, F.Brener, Measurement and Test of HTS Bulk Material in Resistive Fault Current Limiters; Eucas01, 20.08.2001
- [9] D.Larbaleister, R.Blaugher, R.Schwall, R.Sokolowski, M.Suenega, J.O.Willis, Power application of Superconductivity in Japan and Germany, september 1997
- [10] Ruth Wroe. E.A Technology Limited, Superconductivity and its potential within the electricity supply industry, Internationale Ceramics Issue 2-2000, str 52-55
- [11] Superconducting Hybrid Fault Current Limiter: Manufacturing, Modeling and Simulations, E.O.Usabiaga, F.G.Garcia, L.Garcia-Tabares, J.L.Paval, R.Iturba., J.M.Rodriguez,E.Urretavizaya, P.M.Cid, X.Grandos, IPST01 Paper 046

Literatura do rozdziału 5

- [1] Kozak S., "Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego", III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników, Lublin - Nałęczów 2001, str. 121-126.
- [2] Wojtasiewicz G, Kozak S, Pomiary charakterystyk statycznych modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego, III Seminarium Zastosowania nadprzewodników, Lublin - Nałęczów 2001, str. 111-120.
- [3] Kozak S., „Wpływ wybranych parametrów na charakterystyki napięciowo-prądowe nadprzewodnikowego ogranicznika prądu”, XXV IC-SPETO 2002, Gliwice - Ustroń 2002, str. 153-156.
- [4] Kozak S., "Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu – magnetodynamiczny model polowo-obwodowy", PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 211, 2002, str. 71-82.
- [5] Janowski T., Wojtasiewicz G., Kozak S., Malinowski H., Kondratowicz-Kucewicz B., „Badanie modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu,” PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 211, 2002, str. 83-98.
- [6] Janowski T., Wojtasiewicz G., Kozak S., Malinowski H., Kondratowicz-Kucewicz B., „Model fizyczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego,” XXV IC-SPETO 2002, Gliwice - Ustroń 2002, str.149-152.
- [7] Kozak S., Janowski T., "Physical and Numerical Models of Superconducting Fault Current Limiters," ABSTRACTS of Applied Superconductivity Conference ASC-2002, p. 121, 4LE14, Aug. 5-9. 2002 Houston Texas USA (pełny tekst przyjęty do druku w IEEE Transaction of Applied Superconductivity, June 2003)

- [8] Janowski T., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., "Properties Comparison of Superconducting Fault Current Limiters with Closed and Open Core," ABSTRACTS of Applied Superconductivity Conference ASC-2002, p. 121, 4LE15, Aug. 5-9. 2002 Houston Texas USA (pełny tekst przyjęty do druku w IEEE Transaction of Applied Superconductivity, June 2003)

Literatura do rozdziału 6

- [1] Bobrowski W., Nadprzewodniki w elektrotechnice, Wiadomości Elektrotechniczne, Rok LXIX, 2001 nr 7-8, str. 280-288.
- [2] Chang C.S., Loh P.C., Integration of fault current limiters on power systems for voltage quality improvement, Electric Power Systems Research, 57 (2001) pp. 83-92.
- [3] Damstra G.C. et al., Superconducting technology for current limiters and switchgear, CIGRE, 1990.
- [4] 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.
- [5] Garlick W.G., Power system applications of high temperature superconductors, Cryogenics 37 (1997) pp. 649-652.
- [6] Hassenzahl W.V., Superconductivity, an Enabling Technology for 21st Century Power Systems, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, 2001, pp. 1447-1453.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Janowski T., Surdacki P., Stan badań i perspektywy zastosowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu w systemach energetycznych, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 211, 2002, str. 55-70.
- [10] Janowski T., Surdacki P., Stan zastosowań silnoprądowych urządzeń nadprzewodnikowych, Przegląd Elektrotechniczny, Rok LXXVIII, Nr 5s, 2002, str. 168-176.
- [11] Janowski T., Surdacki P., Współczesne technologie i kierunki badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu, III Semin. "Zastosowania Nadprzewodników", Lublin-Nałęczów, 22-23.11.2001, OL PTETiS, IPEiE PL, str. 101-110.
- [12] Lee S.J., Lee C., Ko T.K., Hyun O., Stability analysis of a power system with superconducting fault current limiter installed, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, No. 1, March 2001, pp. 2098-2101.
- [13] Leung E., Surge protection for power grids, IEEE Spectrum, 34 (7): 26-30, 1997.

- [14] 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; IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 12, No. 1, March 2002, pp. 782-787.
- [15] Nagata M., Tanaka K., Taniguchi H., FCL location selection in large scale power system, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, No. 1, March 2001, pp. 2489-2494.
- [16] Nielsen J.N., Ostergaard J.J., Applications of HTS fault current limiters in the Danish utility network, preprint.
- [17] Noe M., Oswald B.R., Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems, Applied Superconductivity Conference, Palm Desert (USA) 1998, preprint.
- [18] Norris W.T., Power A., Fault current limiters using superconductors, Cryogenics, vol. 37, No. 10, 1997, pp. 657-665.
- [19] Paasi J., Lehtonen J., Verhaege T., Herrman P., Design performance of a superconducting power link, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, No. 1, March 2001, pp. 1928-1931.
- [20] 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.
- [21] Salasoo L. et al., Comparison of superconducting fault current limiter concepts in electric utility applications. IEEE Trans. Appl. Supercond., 5: 1079-1082, 1995.
- [22] Salasoo L., Boenig H. J., Superconducting Fault Current Limiters, Webster J.G. (ed.), Wiley Encyclopaedia of Electrical and Electronics Engineering, vol. 20, John Wiley & Sons, Inc., New York 1999.
- [23] Sjoström M., Politano D., Technical and economical impacts on power system by introducing an HTS FCL, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, No. 1, March 2001, pp. 2042-2045.
- [24] Sokolovsky V., Meerovich V., Vajda I., Superconducting fault current limiter: state of development and possible applications, in: Advanced Studies on Superconducting Engineering, Eds.: I. Vajda & L. Farkas, The Supertech Consortium, Budapest, Hungary, 2001, pp. 253-271.
- [25] 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.
- [26] Surdacki P., Janowski T., Wojtasiewicz G., Investigation of an inductive high-Tc 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.
- [27] Vajda I., Semperger S., Porjesz T., Szalay A., Meerovich V., Sokolovsky V., Gawalek W., Three phase inductive HTS fault current limiter for the protection of a 12 kVA synchronous generator, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, No. 1 March 2001, pp. 2515-2518.
- [28] Ye Lin, Lin L.Z., Juengst K.P., Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 12, No. 1, March 2002, pp. 900-903.

SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS

1. INTRODUCTION	5
2. SUPERCONDUCTING MATERIALS	8
2.1. Superconductivity and superconducting materials	8
2.2. Superconductors applied in practice	16
2.2.1. Low temperature superconductors	16
2.2.2. High temperature superconductors	20
2.3. Superconducting materials applied to fault current limiters structure	24
3. SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER CONSTRUCTION AND OPERATION	26
3.1. The operation principles of superconducting fault current limiter	26
3.2. The cooling systems of superconducting fault current limiters	33
3.3. Classification of superconducting fault current limiters	34
3.3.1. The resistive type of superconducting fault current limiters	35
3.3.2. The inductive type of superconducting fault current limiters	37
a) The inductive FCLs with closed magnetic core	39
b) The inductive FCLs with open magnetic core	42
3.3.3. The inductive FCL with adjustable trigger current level	44
3.3.4. The inductive FCL with two magnetic circuit and common superconducting windings	48
3.3.5. The hybrid type of superconducting fault current limiters	50
3.3.6. The three-phase superconducting fault current limiters	51
a) The three-phase FCL with single phase superconducting circuit	51
b) The three-phase FCL with two phase superconducting circuit	53
c) The three-phase DC reactor type FCL	54
3.4. The superconducting fault current limiter with semiconductor bridge	55
4. THE RESISTIVE TYPE OF SFCL	57
4.1. Introduction	57
4.2. Superconducting materials for resistive type of fault current limiter building	58
4.2.1. Polycrystalline superconducting materials	62
4.2.2. Alloys	64
4.2.3. Thin films	64
4.3. Construction materials for SFCLs	64
4.3.1. Electrical insulation systems for SFCLs	64
4.4. AC power losses in SFCL system	65
4.5. The application of the resistive type of SFCL	70
4.6. The shunts operation in superconducting resistive type fault current limiter system	70
4.7. The sample design of resistive type SFCL	76
4.8. Prospects of SFCL building technology development	80

5. THE INDUCTIVE TYPE OF SFCL	83
5.1. Introduction	83
5.2. The inductive fault current limiters with closed magnetic cores	83
5.2.1. The 625 A (77K) tube superconducting fault current limiter	83
5.2.2. The 112 A (77K) tube superconducting fault current limiter	88
5.2.3. The summary of the investigation of inductive SFCLs with closed magnetic core.	94
5.3. The inductive fault current limiters with open magnetic cores	94
5.3.1. The 112 A (77K) tube superconducting fault current limiters	94
5.3.2. The 1210 A (77K) tube superconducting fault current limiter	99
5.3.3. The conclusion of the open core SFCLs eksperimental results	102
5.4. The FEM-circuit numerical model of inductive SFCL with Bi-2223 tube and closed magnetic core.	102
5.4.1. The influence of construction parameters on SFCL voltage	105
5.5. The summary of the experimental and numerical investigations of inductive type SFCL	109
6. THE APPLICATIONS OF SFCL	111
6.1. Introduction	111
6.2. The cooperation terms of SFCL and electric power systems	111
6.3. The SFCL localization in electric power systems	111
6.4. Technical and economical benefits of SFCL in power system	114
6.5. Sample concepts and application of SFCL in power systems	116
6.6. The SFCL application prospects in power systems	117
7. LITERATURE	119
CONTENTS	124