

NADPRZEWODNIKOWE ZASOBNIKI ENERGII

Monografia powstała w wyniku realizacji Projektu Badawczego PB 4T10A 004 25 w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej w latach 2003 – 2006 i została sfinansowana ze środków Projektu

Rozdziały 1, 2, 3 i 4 zostały napisane na podstawie raportu końcowego Projektu „Nadprzewodnikowy zasobnik energii z elektromagnesem wysokotemperaturowym i autonomicznym układem chłodzenia”, zrealizowanego w latach 2003 -2006, a rozdziały 5 i 6 na podstawie publikacji.

Współpraca SMES-ów z siecią elektroenergetyczną, rozproszonymi odnawialnymi źródłami energii i wrażliwymi odbiornikami jest przedmiotem badań prowadzonych w Projekcie Badawczym „Nadprzewodnikowe zasobniki energii do współpracy z siecią elektroenergetyczną i odnawialnymi źródłami energii”, których wyniki zostaną opublikowane w oddzielnej monografii.

Autorzy:

*Tadeusz Janowski
Beata Kondratowicz-Kucewicz
Janusz Kozak
Sławomir Kozak
Michał Majka
Henryk Malinowski
Paweł Surdacki
Grzegorz Wojtasiewicz*

Lublin 2007

ISBN: 978-83-61301-04-2

**Wydawnictwo – Drukarnia
„LIBER DUO s.c.”
ul. Długa 5, 20-346 Lublin
*liberduo@o2.pl***

SPIS TREŚCI

SPIS SKRÓTÓW I OZNACZEŃ	5
WSTĘP	7
1. WPROWADZENIE DO URZĄDZEŃ NADPRZEWODNIKOWYCH	8
1.1. PODSTAWOWE POJĘCIA NADPRZEWODNICTWA.....	8
1.2. ELEKTRYCZNE URZĄDZENIA NADPRZEWODNIKOWE.....	12
1.3. PRZEWODY NAWOJOWE.....	13
1.3.1. Przewody LTS – Nb-Ti, Nb ₃ Sn.....	19
1.3.2. Przewody HTS – Bi-2212, Bi-2223, Y-123.....	24
1.4. CHŁODZENIE URZĄDZEŃ NADPRZEWODNIKOWYCH.....	30
1.4.1. Chłodzenie w kąpeli.....	30
1.4.2. Chłodzenie wymuszone.....	32
1.4.3. Chłodzenie kontaktowe.....	34
1.4.4. Chłodzenie w kąpeli ze wspomaganie.....	35
1.5. KRIOPRZEPUSTY PRĄDOWE.....	37
1.6. ELEKTROMAGNESY NADPRZEWODNIKOWE.....	45
1.6.1. Konstrukcja uzwojenia nadprzewodnikowego.....	45
1.7. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 1.....	47
2. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKACH ENERGII	49
2.1. WPROWADZENIE.....	49
2.2. PODSTAWOWE SKŁADNIKI UKŁADU NADPRZEWODNIKOWEGO ZASOBNIKA ENERGII.....	55
2.2.1. Elektromagnes nadprzewodnikowy.....	56
2.2.2. Układ kriogeniczny SMES-a.....	56
2.2.3. Przepusty prądowe SMES-a.....	57
2.2.4. Układ przekształtnikowy SMES-a.....	57
Układ równoległy.....	57
Układ szeregowy.....	9
Układ hybrydowy z akumulatorem awaryjnym.....	61
2.3. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 2.....	63
3. PROJEKT I BUDOWA ELEKTROMAGNESU NADPRZEWODNIKOWEGO ZASOBNIKA ENERGII	65
3.1. SFORMUŁOWANIE ZAŁOŻEŃ DO PROJEKTU NADPRZEWODNIKOWEGO ELEKTROMAGNESU ZASOBNIKA ENERGII.....	65
3.1.1. Model numeryczny elektromagnesu HTS.....	65
3.1.2. Wybór konfiguracji uzwojeń elektromagnesu HTS dla SMES-a.....	66
3.2. PROJEKT NADPRZEWODNIKOWEGO ELEKTROMAGNESU DLA ZASOBNIKA ENERGII.....	74
3.3. BUDOWA ELEKTROMAGNESU HTS DLA SMES-a.....	76
3.3.1. Elementy uzwojenia nadprzewodnikowego.....	76
3.3.2. Izolacja uzwojeń.....	77
3.3.3. Nawijanie uzwojeń nadprzewodnikowych.....	82
3.3.4. Podstawowe podzespoły elektromagnesu SMES-a.....	83
3.4. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 3.....	85

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE ZBUDOWANEGO ELEKTROMAGNESU SMES-a	86
4.1. STANOWISKO BADAWCZE.....	86
System próżniowy.....	87
System chłodzenia.....	88
Elektromagnes SMES-a.....	89
Układy pomiarowe.....	90
4.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE POJEDYNCZYCH CEWEK ELEKTROMAGNESU SMES-a.....	92
4.2.1. Pomiar rezystancji cewek w temperaturze pokojowej (290 K).....	92
4.2.2. Pomiar charakterystyk U - I pojedynczych cewek elektromagnesu SMES-a w temperaturze 77 K.....	94
4.3. BADANIA EKSPERYMENTALNE ELEKTROMAGNESU SMES-a.....	99
4.4. ENERGIA SMES-a.....	101
5. UKŁADY PRZEKSZTAŁTNIKOWE NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKÓW ENERGII	103
5.1. WPROWADZENIE.....	103
5.2. UKŁADY FALOWNIKOWE PRĄDU.....	103
5.3. ZASOBNIK OPARTY NA POŁĄCZENIU PRZERYWACZA DC/DC Z FALOWNIKIEM NAPIĘCIA.....	106
5.3.1. Przerwywacz DC/DC.....	108
5.3.2. Falownik napięcia.....	109
5.4. INNE UKŁADY.....	111
5.5. PODSUMOWANIE.....	114
5.6. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 5.....	115
6. WSPÓŁPRACA NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKÓW ENERGII Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ	121
6.1. WPROWADZENIE.....	121
6.2. UKŁADY POPRAWY STABILNOŚCI SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEG.....	122
6.2.1. Redukcja drgań w układzie.....	122
6.2.2. Poprawa stabilności napięcia.....	122
6.3. UKŁADY POLEPSZANIA JAKOŚCI ENERGII.....	123
6.3.1. Rezerwa wirująca.....	123
6.3.2. Elastyczne układy przesyłowe FACTS.....	123
6.3.3. Równoważenie obciążeń impulsowych.....	124
6.3.4. Ochrona wrażliwych odbiorników energii.....	125
6.3.5. Rezerwa zasilania.....	127
6.3.6. Równoważenie asymetrii układu elektroenergetycznego.....	127
6.4. WYNIKI BADAŃ ZASTOSOWANYCH NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKÓW ENERGII.....	128
6.5. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 6.....	135
CONTENTS	136
ABSTRACT	138

SPIS SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

1G	Nadprzewodnik wysokotemperaturowy 1 generacji
2G	Nadprzewodnik wysokotemperaturowy 2 generacji
ASC	American Superconductor
BCS	Mikroskopowa teoria nadprzewodnictwa (Bardeen-Cooper-Schrieffer)
Bi-2212	Nadprzewodnik wysokotemperaturowy $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_9$
Bi-2223	Nadprzewodnik wysokotemperaturowy $\text{Bi}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_3\text{O}_{10}$
BPA	Bonneville Power Authority
CERN	European Organization for Nuclear Research
CIC	Cable In Conduit
CVD	Chemical Vapor Deposition
EPRI	Electric Power Research Institute
FACTS	Flexible AC Transmission System
HTS	High Temperature Superconductor
IGC	Intermagetics General Corporation
LANL	Los Alamos National Laboratory
LHC	Large Hadron Collider
LHe	Liquid Helium
LN_2	Liquid Nitrogen
LTS	Low Temperature Superconductor
MgB_2	Magnesium Diboride
MOD	Metalorganic Deposition
MRI	Magnetic Resonance Imaging
Nb_3Sn	Niobium Three Thin
NbTi	Niobium Titanium
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
PCS	Power Conditioning System
PEEK	PolyEtherEther Ketone.
PulseTube	Chłodziarka pulsacyjna
PVD	Physical Vapor Deposition
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
TFA	Physical Vapor Deposition

UPS	Uninterruptible Power Supply
VSI	Voltage Source Inverter
Y-123	YBCO YBa ₂ Cu ₃ O ₇
μSMES	Mikro Superconducting Magnetic Energy Storage
PCS	Power Conditioning System
CSI	Current Source Inverter
VCI	Voltage Source Inverter
SCR	Silicon Control Rectifier
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
λ_{sc}	Współczynnik zapelnienia uzwojenia,
A	Potencjał wektorowy pola magnetycznego
B	Indukcja magnetyczna,
C_{sc}	Stosunek objętości matrycy do nadprzewodnika (współczynnik stabilizacji)
E	Energia elektromagnesu
H_c	Natężenie krytycznego pola magnetycznego,
H_{c1}	Natężenie dolnego krytycznego pola magnetycznego
H_{c2}	Natężenie górnego krytycznego pola magnetycznego
I	Prąd,
I_c	Prąd krytyczny
J	Gęstość prądu
J_c	Gęstość prądu krytycznego,
L	Indukcyjność elektromagnesu
S_p	Pole całkowitego przekroju poprzecznego przewodu
S_{sc}	Pole przekroju nadprzewodnika w przewodzie
T	Temperatura
T_c	Temperatura krytyczna
U	Napięcie elektryczne
V	Objętość uzwojenia
μ	Przenikalność magnetyczna

WSTĘP

Wśród najbardziej zaawansowanych technologicznie i aplikacyjnie silnoprądowych urządzeń nadprzewodnikowych znajdują się nadprzewodnikowe ograniczniki prądu oraz nadprzewodnikowe zasobniki energii [1]. Mimo, iż prowadzone prace badawcze i projektowe wskazują na obiecujące perspektywy zastosowań obu typów urządzeń nadprzewodnikowych, to w chwili obecnej jedynie nadprzewodnikowe zasobniki energii (*SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage*) osiągnęły etap jeszcze ograniczonego, ale komercyjnego zastosowania w sieciach elektroenergetycznych. Przemysłowa produkcja zasobników nadprzewodnikowych odbywa się na razie jedynie w Stanach Zjednoczonych, natomiast w laboratoriach zachodniej Europy, Japonii, Rosji, Korei i Chin prowadzone są intensywne prace badawcze i projektowe, w ramach których budowane są coraz liczniejsze urządzenia eksperymentalne. Niezbyt zaawansowany poziom technologii nadprzewodnikowych w pozostałych krajach, w tym także w Polsce, wynika zapewne z niedoceniań możliwości ich praktycznych zastosowań, braku wystarczającego finansowania badań, jak też z niewielkiego upowszechnienia wiedzy o tych unikalnych, ale obiecujących urządzeniach.

W niniejszej pracy przybliżono problematykę nadprzewodnikowych zasobników energii, obejmującą koncepcję, budowę i działanie nadprzewodnikowego elektromagnesu HTS dla zasobnika, zagadnienia projektowe i eksploatacyjne, a także wybrane zastosowania zasobników.

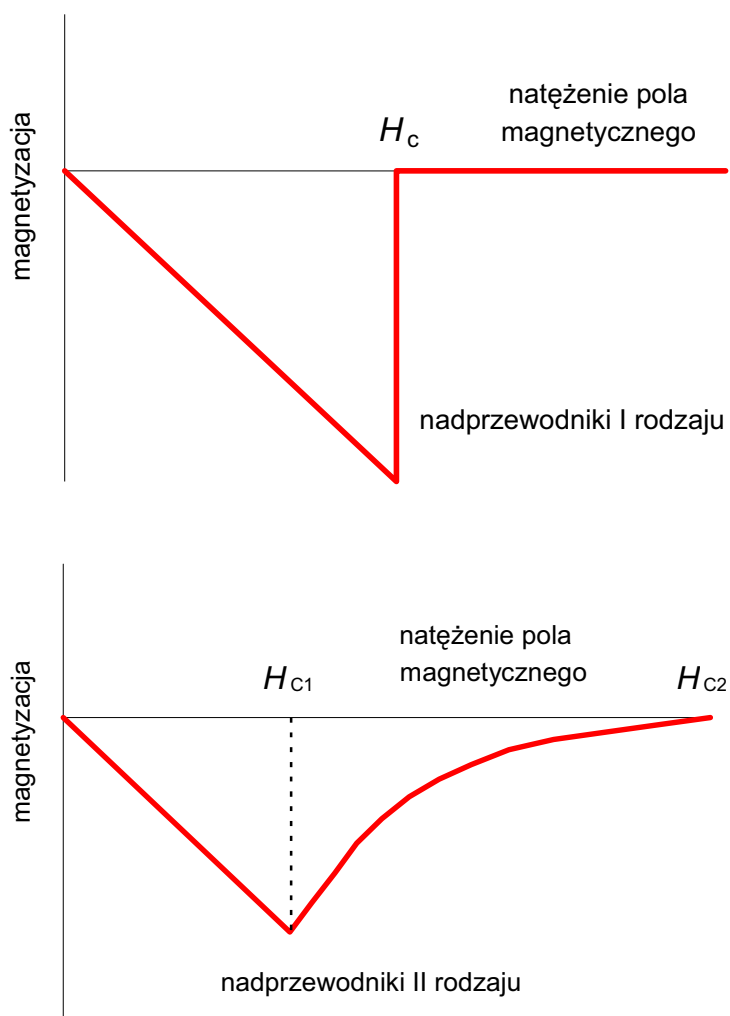
1. WPROWADZENIE DO URZĄDZEŃ NADPRZEWODNIKOWYCH

1.1. PODSTAWOWE POJĘCIA NADPRZEWODNICTWA

Urządzenie elektryczne nazywamy nadprzewodnikowym, jeżeli w swej budowie zawiera elementy wykonane z nadprzewodnika i pracujące w stanie nadprzewodzącym. Elementem nadprzewodnikowym może być uzwojenie, przepust, tor prądowy, złącze Josephsona, rura, cylinder, bifilarny stos czy inna kształtka [1], [2]. Materiał nadprzewodnikowy stanowi często tylko część objętości i masy urządzenia. Zazwyczaj tylko elementy nadprzewodnikowe urządzenia są umieszczone w kriostacie i chłodzone do temperatur kriogenicznych w przedziale od kilku do kilkudziesięciu kelwinów a pozostałe podzespoły urządzenia pracują w temperaturze otoczenia powyżej 290 K. Właściwości nadprzewodnictwa wykazują niektóre metale i substancje. Cechą charakterystyczną nadprzewodnictwa jest zerowa rezystywność oraz doskonały diamagnetyzm materiału w określonych warunkach wyznaczonych przez temperaturę, pole magnetyczne i prąd elektryczny. Elementy nadprzewodnikowe w urządzeniach mogą znajdować się w stanie nadprzewodzącym trwale, okresowo albo dorywczo. Materiały nadprzewodnikowe znajdują się w stanie nadprzewodzącym, gdy punkt ich pracy wyznaczony przez temperaturę, gęstość prądu oraz natężenie pola magnetycznego leży poniżej charakterystycznej dla tego materiału powierzchni krytycznej lub charakterystyki krytycznej. Powierzchnia krytyczna nadprzewodnika jest funkcją trzech zmiennych: temperatury, gęstości prądu i natężenia pola magnetycznego. Charakterystyka krytyczna nadprzewodnika jest to zależność natężenia krytycznego pola magnetycznego od gęstości prądu (albo gęstości prądu krytycznego od natężenia pola magnetycznego) w określonej temperaturze poniżej temperatury krytycznej. Przy definiowaniu parametrów krytycznych nadprzewodników natężenie pola magnetycznego bardzo często zastępowane jest indukcją magnetyczną. Podczas przechodzenia ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego¹, znajdującego się powyżej powierzchni lub charakterystyki krytycznej, materiały nadprzewodnikowe zmieniają swoje właściwości elektryczne i magnetyczne niemal skokowo.

Ze względu na charakter zmian właściwości w polu magnetycznym wprowadzony został podział na nadprzewodniki I i II rodzaju.

¹ przejście nadprzewodzące [3]



Rys. 1.1. Zależność magnetyzacji od natężenia pola magnetycznego dla nadprzewodników I i II rodzaju

Zależność magnetyzacji od natężenia pola magnetycznego dla nadprzewodników I i II rodzaju przedstawia rys. 1.1. Nadprzewodniki I rodzaju, w stanie nadprzewodzącym, całkowicie wypychają ze swego wnętrza strumień magnetyczny aż do przejścia w stan rezystywny. Nadprzewodniki II rodzaju poniżej natężenia dolnego krytycznego pola magnetycznego H_{c1} , podobnie jak nadprzewodniki I rodzaju, całkowicie wypychają ze swego wnętrza strumień magnetyczny. Powyżej H_{c1} zaczyna się stan mieszany [3], w którym strumień magnetyczny w postaci

fluksonów [3] zaczyna częściowo wnikać do nadprzewodnika II rodzaju aż do osiągnięcia natężenia górnego krytycznego pola magnetycznego H_{c2} . Powyżej H_{c2} nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego. Pomiędzy H_{c1} a H_{c2} nadprzewodnik znajduje się w stanie mieszanym charakteryzującym się zerową rezystywnością ale nie jest już doskonałym diamagnetykiem.

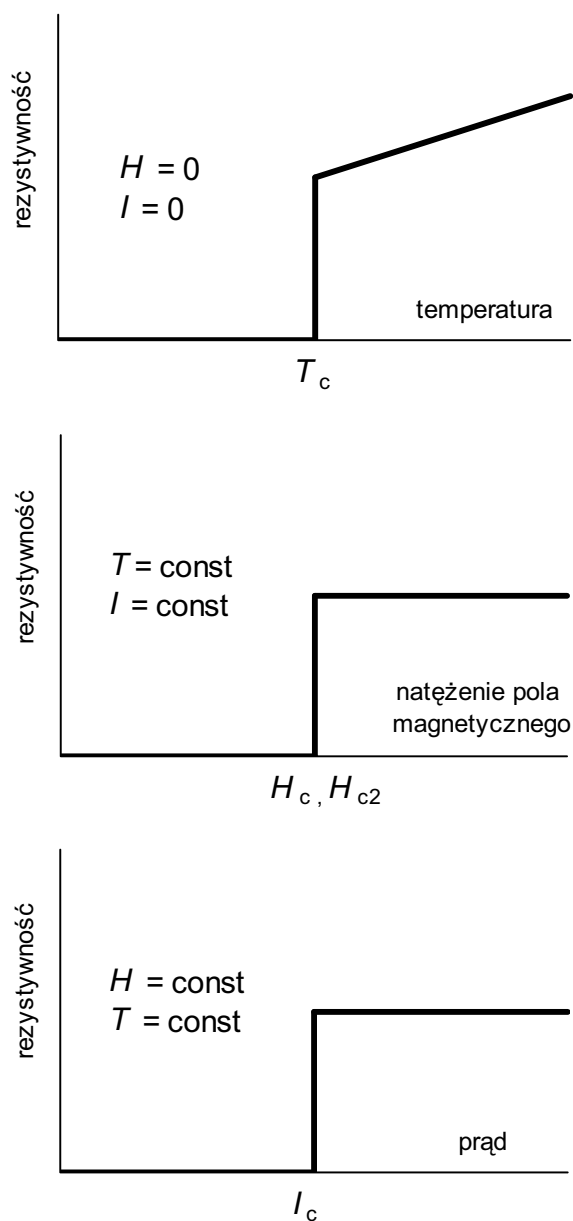
Tab. 1.1. Definicje parametrów krytycznych nadprzewodników według PN-IEC 60050-815:2002 – Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki – Część 815: Nadprzewodnictwo [3]

nazwa i symbol		definicja
temperatura krytyczna	T_c	temperatura, poniżej której nadprzewodnik wykazuje nadprzewodnictwo przy zerowym natężeniu pola magnetycznego i przy zerowym prądzie elektrycznym
natężenie dolnego krytycznego pola (magnetycznego)[3]	H_{c1}	natężenie pola magnetycznego, przy którym flukson wnika po raz pierwszy do objętości nadprzewodników II rodzaju powodując odstępstwo od idealnego diamagnetyzmu
natężenie górnego krytycznego pola (magnetycznego)[3]	H_{c2}	maksymalne natężenie pola magnetycznego, poniżej którego nadprzewodnik II rodzaju jest w stanie mieszanym
prąd krytyczny ²	I_c	maksymalny prąd stały, który może być rozpatrywany jako płynący bez rezystancji
gęstość prądu krytycznego ²	J_c	gęstość prądu elektrycznego przy prądzie krytycznym określona albo dla całego przekroju przewodu (całkowita), albo gdy występuje stabilizator, niestabilizowanej części przewodu

Ze względu na wartość temperatury krytycznej wprowadzono podział na nadprzewodniki niskotemperaturowe (LTS – low temperature superconductor) oraz nadprzewodniki wysokotemperaturowe (HTS – high temperature superconductor). Umowną granicą rozdzielającą nadprzewodniki niskotemperaturowe od wysokotemperaturowych jest $T_c = 25$ K, wynikająca z teorii mikroskopowej BCS. Interpretację graficzną

² jest funkcją temperatury

parametrów krytycznych nadprzewodnika, gdzie zmiana rezystywności odbywa się skokowo, przedstawia rys. 1.2.



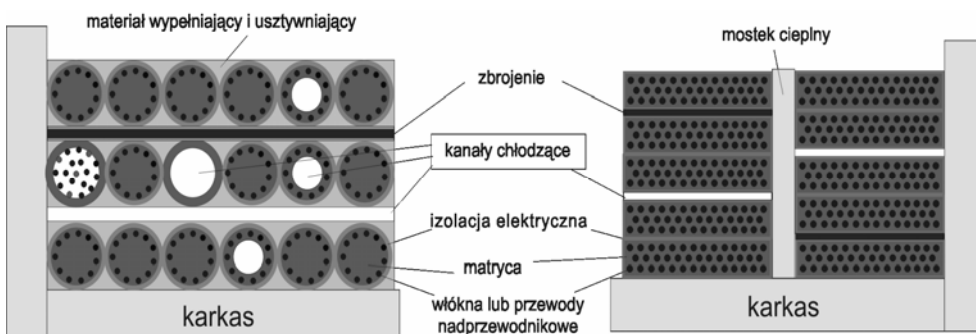
Rys. 1.2. Przybliżona interpretacja parametrów krytycznych nadprzewodnika

W rzeczywistym nadprzewodniku przejście z jednego stanu do drugiego jest bardzo ostre ale nie skokowe. Przyjmuje się, że parametr osiąga wartość krytyczną gdy rezystywność nadprzewodnika lub pole elektryczne w nadprzewodniku osiąga wartość przyjętego kryterium. Dla nadprzewodników niskotemperaturowych stosowane są kryteria rezystancyjne $10^{-14} \Omega\text{m}$ i $10^{-13} \Omega\text{m}$ lub kryteria polowe $10 \mu\text{V/m}$ i $100 \mu\text{V/m}$ [4], [5]. Dla nadprzewodników wysokotemperaturowych stosowane są kryteria rezystancyjne $2 \cdot 10^{-13} \Omega\text{m}$ i $10^{-12} \Omega\text{m}$ lub kryteria polowe $100 \mu\text{V/m}$ i $500 \mu\text{V/m}$ [6].

1.2. ELEKTRYCZNE URZĄDZENIA NADPRZEWODNIKOWE

Zastosowanie nadprzewodników zamiast przewodników konwencjonalnych pozwala na zwiększenie średnich gęstości prądu w urządzeniach nawet o 2 rzędy wielkości. Tak duże gęstości prądu pozwalają na generowanie pól magnetycznych o indukcjach rzędu 30 T za pomocą uzwojeń z nadprzewodników niskotemperaturowych i rzędu 60 T za pomocą uzwojeń z nadprzewodników wysokotemperaturowych. Duża wartość indukcji magnetycznej oraz duże gęstości prądu generują olbrzymie naprężenia mechaniczne, wywołane siłą Lorentza, przekraczające wytrzymałość mechaniczną materiałów nadprzewodnikowych i konieczne jest stosowanie dodatkowych elementów konstrukcyjnych.

W urządzeniach nadprzewodnikowych, w celu utrzymania niskich temperatur roboczych, stosowane są zaawansowane techniki chłodzenia oraz przewody o złożonej budowie zapewniające stabilizację cieplną elementów nadprzewodnikowych.



Rys. 1.3. Fragmety uzwojenia nawiniętego przewodami nadprzewodnikowymi o przekroju kołowym i prostokątnym

W elektrycznych urządzeniach nadprzewodnikowych materiał nadprzewodnikowy występuje najczęściej w postaci uzwojenia. Budowę uzwojenia nadprzewodnikowego wykonanego przewodem o przekroju kołowym i prostokątnym przedstawia rys. 1.3. W przekroju uzwojenia widoczne są takie różnorodne pod względem funkcji i właściwości elementy jak: włókna i przewody nadprzewodnikowe, kanały chłodzące, zbrojenia, wypełnienia i usztywnienia, mostki cieplne, matryca, karkas. Podczas modelowania urządzeń nadprzewodnikowych w przeważającej większości przypadków można przyjmować, że uzwojenia mają jednolite, uśrednione, właściwości elektromagnetyczne i cieplne. Parametrem, który uwzględnia problemy mechaniczne, stabilizacji, chłodzenia i wiąże je z charakterystyką krytyczną materiału nadprzewodnikowego oraz innymi parametrami fizycznymi uzwojenia jest współczynnik wypełnienia uzwojenia λ_{sc} . Współczynnik λ_{sc} charakteryzujący, jaką część przekroju uzwojenia stanowi nadprzewodnik (jaką część uzwojenia płynie prąd w stanie nadprzewodzącym), jest stosunkiem sumarycznego pola powierzchni nadprzewodnika w przekroju uzwojenia do pola przekroju tego uzwojenia.

$$(1-1) \quad \lambda_{sc} = \frac{\sum S_{sc}}{S}$$

gdzie λ_{sc} oznacza współczynnik wypełnienia uzwojenia,
 S – pole przekroju uzwojenia, a S_{sc} – pole przekroju nadprzewodnika w przewodzie.

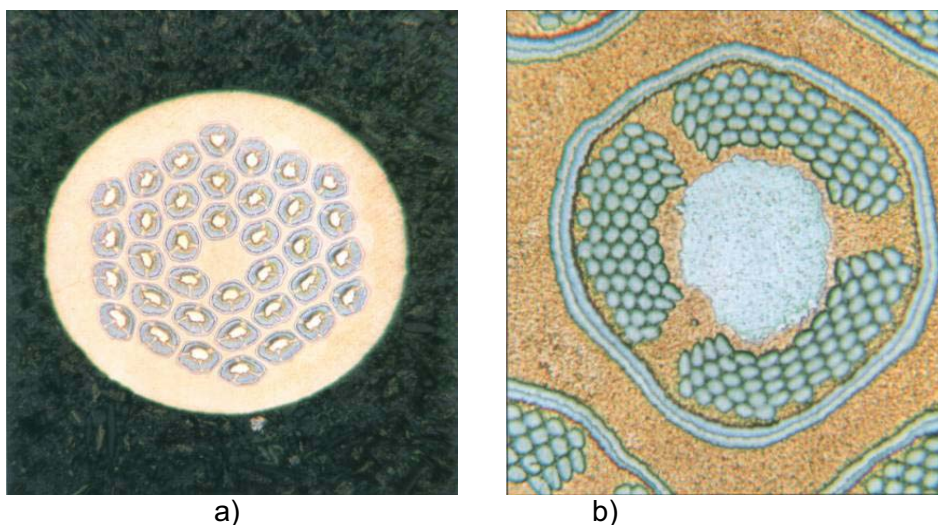
Na współczynnik wypełnienia uzwojenia λ_{sc} decydujący wpływ mają:

- budowa przewodu:
 - kształt przewodu
 - rodzaj stabilizacji
- budowa uzwojenia:
 - technika chłodzenia
 - elementy wzmacniające
 - izolacja elektryczna

1.3. PRZEWODY NAWOJOWE

Do budowy przewodów nadprzewodnikowych znalazły zastosowanie nadprzewodniki II rodzaju. Ze względu na konieczność zapewnienia stabilnej pracy i zminimalizowania strat cieplnych przewody nadprzewodnikowe mają złożoną budowę (rys. 1.4). Nadprzewodnik jest podzielony na włókna o średnicach od ułamka do kilkudziesięciu

mikrometrów, które są umieszczone w matrycy (stabilizatorze) z materiału o dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej.



Rys. 1.4. a) Przewód o średnicy 0,78 mm z 6048 włóknami Nb₃Sn w 36 wiązkach b) Powiększenie jednej wiązki [7]

Włókna są skręcane i transponowane w celu zmniejszenia strat od pola magnetycznego zewnętrznego i własnego. Materiałem matrycy może być miedź lub aluminium albo srebro (w przypadku HTS). Stosowane są również bariery wysokorezystancyjne (np. z Cu-Ni) na włóknach i wiązках w celu zmniejszenia strat cieplnych od prądów wirowych. Nadprzewodnik zajmuje więc tylko część całkowitego przekroju przewodu. Skomplikowana budowa wewnętrzna przewodu nadprzewodnikowego ma zminimalizować straty w stanach przejściowych oraz straty przemiennoprądowe.

Przewód nadprzewodnikowy charakteryzują następujące parametry:

- charakterystyka krytyczna przewodu,
- średnica przewodu,
- liczba włókien nadprzewodnikowych,
- stosunek objętości matrycy do nadprzewodnika C_{sc} (współczynnik stabilizacji),

$$(1 - 2) \quad C_{sc} = \frac{S_p - S_{sc}}{S_{sc}}$$

gdzie S_p oznacza pole całkowitego przekroju poprzecznego przewodu, a S_{sc} – pole przekroju poprzecznego nadprzewodnika w przewodzie.

Współczynnik C_{sc} ma istotny wpływ na wartość współczynnika zapelnienia uzwojenia λ_{sc} , który nie przekracza wartości:

$$(1 - 3) \quad \lambda_{sc \max} = \frac{1}{1 + C_{sc}}$$

Wartość ta może być osiągnięta w przypadku przewodów o przekroju prostokątnym. Dla przewodów o przekroju kołowym współczynnik λ_{sc} nie przekracza wartości:

$$(1 - 4) \quad \lambda_{sc \max} = \frac{\pi}{4(1 + C_{sc})}$$

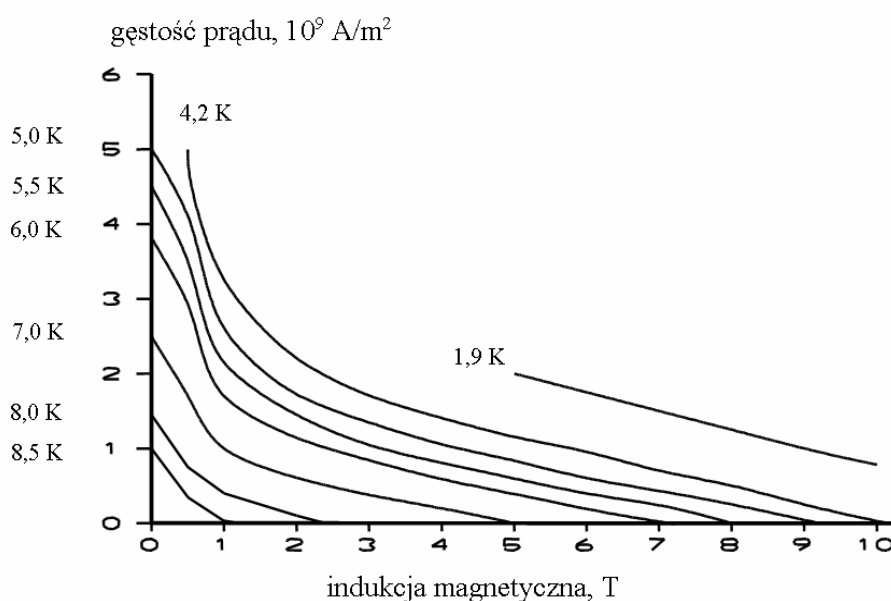
Zależności (1 – 3) i (1 - 4) nie uwzględniają izolacji przewodów i warstw oraz kanałów chłodzących. Przy ich uwzględnieniu wartość współczynnika zapelnienia uzwojenia λ_{sc} będzie mniejsza.

Charakterystyka krytyczna przewodu nadprzewodnikowego, określa wartości prądu w przewodzie w funkcji pola magnetycznego (indukcji magnetycznej albo natężenia pola magnetycznego), którego przekroczenie w danej temperaturze prowadzi do utraty stanu nadprzewodzącego. Producenci przewodów LTS podają charakterystyki krytyczne przewodów w postaci tabel lub wykresów, zazwyczaj dla jednej lub dwóch wartości temperatury 4,2 K lub 1,8 K. Z uwagi na to że przewody HTS mogą pracować w dużo szerszym zakresie temperatur producenci podają charakterystyki krytyczne tych przewodów dla szeregu temperatur od 77 K do 4 K (np. 77 K, 70 K, 64 K, 50 K, 45 K, 35 K, 20 K, 4 K).

W przewodach nadprzewodnikowych stosowana może być stabilizacja od przeskoków strumienia lub stabilizacja kriogeniczna [8] [9]. Przewody stabilizowane tylko od przeskoków strumienia stosowane są w mniejszych urządzeniach, gdzie uzwojenie zajmuje duży procent objętości systemu, więc pożądana jest wysoka całkowita gęstość prądu. Stabilizacja od przeskoków strumienia chroni przewód tylko od zakłóceń magnetycznych i nie jest w stanie zabezpieczyć uzwojenie od skutków zakłóceń mechanicznych, które są bardzo groźne ze względu na dużą energię wyzwalaną podczas tych zakłóceń. Uzwojenia mogą być zabezpieczane mechanicznie np. poprzez usztywnienie żywicą epoksydową.

Najbardziej rozpowszechnionymi materiałami nadprzewodnikowymi wykorzystywanymi do produkcji przewodów są: stop Nb-Ti, związki międzymetaliczne Nb₃Sn, Nb₃Al i V₃Ga oraz ceramiki Bi-2212, Bi-2223 i Y-123. Ostatnio (2004) pojawiły się na rynku również przewody z MgB₂. Przewody z Nb-Ti stosowane są w elektromagnesach wytwarzających pola magnetyczne o indukcji do 8 T. Dla większych indukcji magnetycznych, do

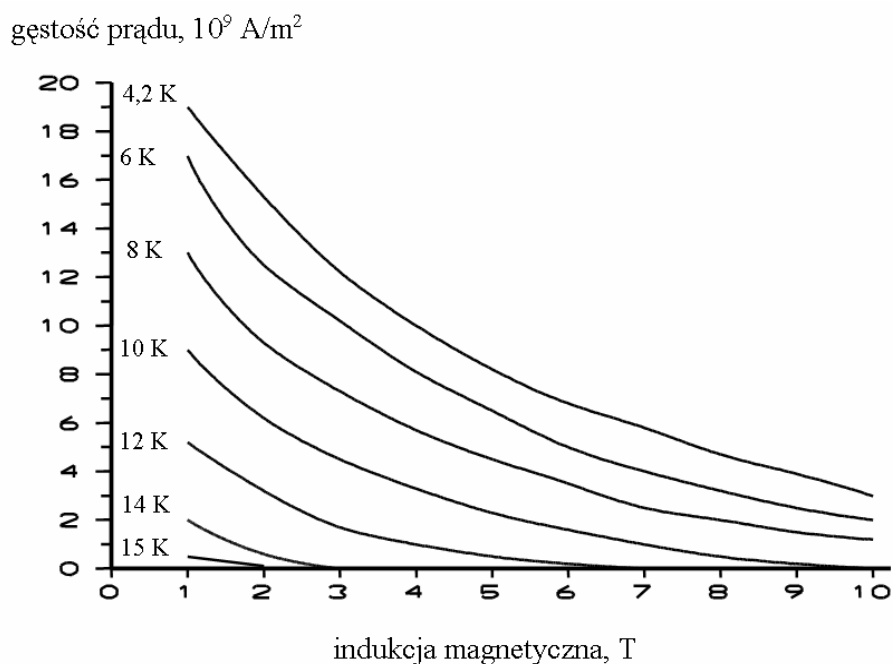
14 T, stosowane są przewody z Nb_3Sn . Dla pól od 13 T do 18 T stosowane są przewody wykonane z V_3Ga . Dla pól powyżej 18 T dochodzących nawet do 30 T stosowane są przewody wykonane z Nb_3Al i $Nb_3(Al,Ge)$ [10]. Wymienione przewody chłodzone są ciekłym helem. Przewody z Bi-2212, Bi-2223 i Y-123 stosowane są do budowy uzwojeń nadprzewodnikowych pracujących w temperaturze 77 K i niższej. Charakterystyki krytyczne $J_c=f(B)_T$ nadprzewodników Nb-Ti, Nb_3Sn , Bi-2212 i Bi-2223 przedstawiają rys. 1.5 - 1.8. Charakterystyki takie bardzo często podawane są przez producenta zamiast właściwych, przypisanych do konkretnego przewodu, charakterystyk krytycznych $I_c=f(B)_T$. Producent podaje wtedy tylko jedna wartość prądu krytycznego przewodu dla określonej temperatury i pola magnetycznego, a pozostałe punkty charakterystyki $I_c=f(B)_T$ użytkownik może wyliczyć na podstawie tej wartości i charakterystyk $J_c=f(B)_T$.



Rys. 1.5. Charakterystyki krytyczne Nb-Ti [10], [9]

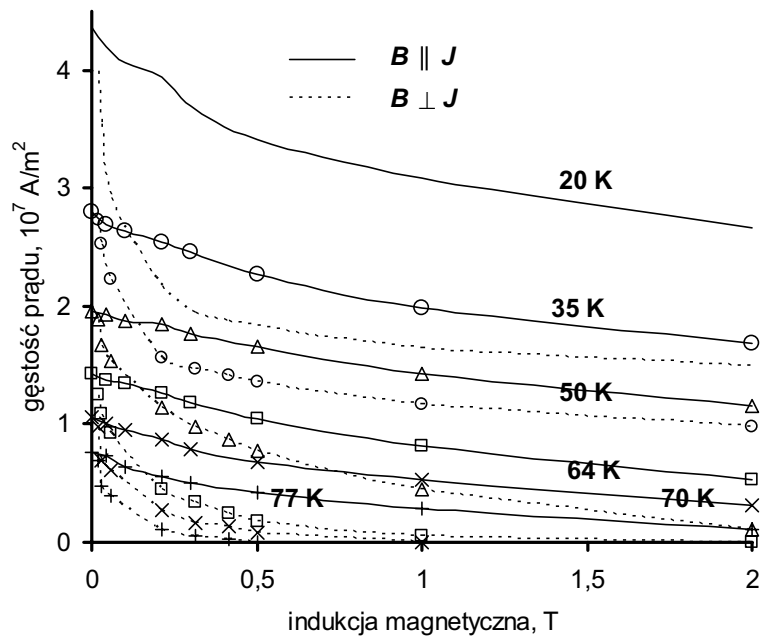
Ze względu na wartości parametrów krytycznych, korzystne jest obniżenie temperatury pracy urządzeń zarówno LTS jak i HTS. Obniżenie temperatury pracy przewodów HTS powiększa znacznie wartości ich prądów krytycznych. Przykładowo, gęstość prądu krytycznego nadprzewodnika Bi-2223 wynosi $7,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ w polu własnym i temperaturze 77 K. Obniżenie temperatury do 64 K podwyższa gęstość prądu krytycznego prawie dwukrotnie. Gęstość prądu krytycznego nadprzewodnika Bi-2212 w temperaturze 77 K i w polu własnym wynosi

10^7 A/m^2 . Obniżenie temperatury do 4,2 K podwyższa gęstość prądu krytycznego tego nadprzewodnika ponad 7,5-krotnie. Tak więc parametry krytyczne nadprzewodników wysokotemperaturowych poprawiają się znacznie wraz z obniżeniem temperatury ich pracy. Z tego powodu temperatura pracy urządzeń HTS obniżana jest często z 77 K do poziomu 30-40 K a nawet niższej. Uzwojenia z przewodów HTS stosowane są z powodzeniem w elektromagnesach hybrydowych do budowy sekcji silnopolowych chłodzonych ciekłym helem dla indukcji magnetycznych dochodzących do 60 T.

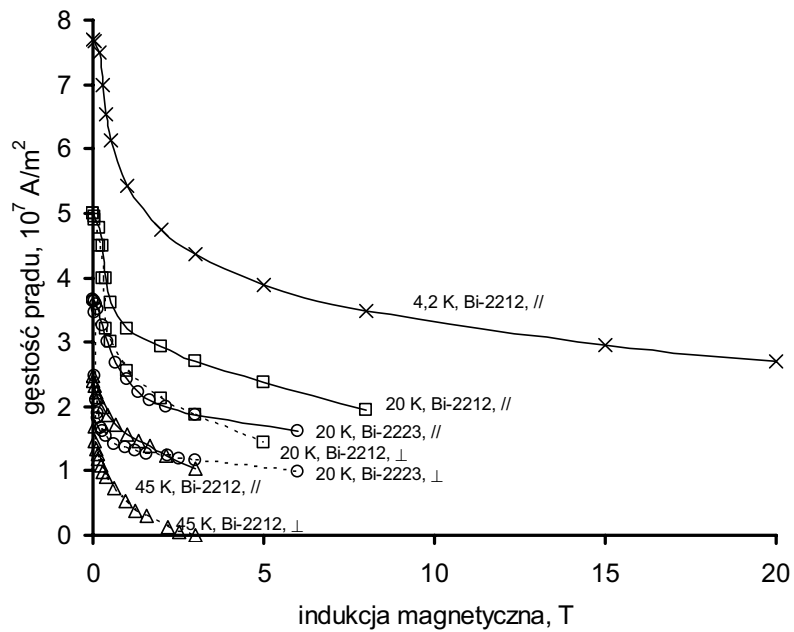


Rys. 1.6. Charakterystyki krytyczne Nb_3Sn [10], [9]

W uzwojeniach małych urządzeń LTS o energii mniejszej od 100 kJ stosowane są przewody o przekroju kołowym o współczynniku C_{sc} od 1 do 2 [10], [9]. W urządzeniach LTS o energii od 100 kJ do 1 MJ stosowane są zarówno przewody o przekroju kołowym jak i prostokątnym o współczynniku C_{sc} powyżej 2. W uzwojeniach dużych urządzeń LTS o energiach powyżej 1 MJ stosowane są głównie przewody nadprzewodnikowe w postaci taśm o współczynniku C_{sc} powyżej 7. W uzwojeniach urządzeń HTS stosowane są głównie przewody w postaci taśm. Z uwagi na gęstości prądu mniejsze o ponad 2 rzędy wielkości w porównaniu z przewodami LTS, warunki stabilizacji kriogenicznej można osiągnąć w urządzeniach HTS przy małej wartości współczynnika C_{sc} .



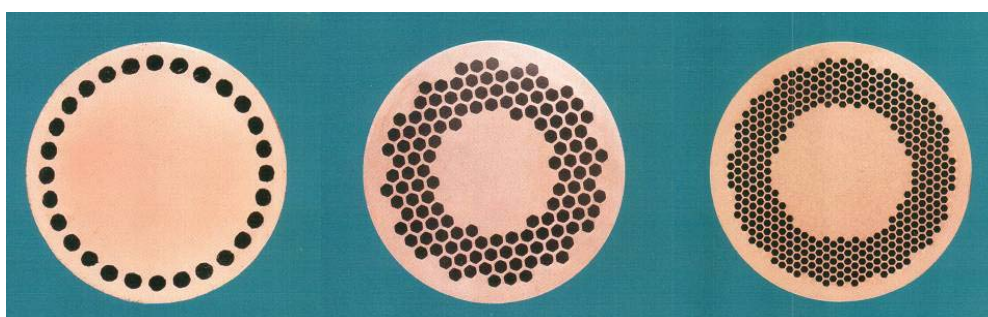
Rys. 1.7. Charakterystyki krytyczne Bi-2223 w różnych temperaturach i dla różnych kierunków indukcji magnetycznej [10]



Rys. 1.8. Charakterystyki krytyczne Bi-2212 i Bi-2223 w różnych temperaturach i dla różnych kierunków indukcji magnetycznej [11]

1.3.1. Przewody LTS – Nb-Ti, Nb₃Sn

Przewody wielowłóknowe Nb-Ti wytwarzane są w procesie rurowym. Pręty z Nb-Ti umieszczane są w rurach Cu. Wiązki Cu/Nb-Ti umieszczane są w większych rurach Cu i przeciągane w celu zmniejszenia średnicy. Następnie wiązki wstępnie obrobionych przewodów umieszczane są w rurach Cu i ponownie przeciągane aż do otrzymania przewodów o odpowiedniej średnicy włókien i odpowiedniej wartości współczynnika C_{sc} . Podczas obróbki mechanicznej wstępne przewody i wiązki przewodów mogą być umieszczane w rurach z materiałów innych niż miedź np. w rurach ze stopów wysokorezystancyjnych. Pręty mogą być również umieszczane nie w rurach lecz w walcach o odpowiednio dużej średnicy i długości z wywierconymi otworami co pozwala na bardzo równomierne i precyzyjne rozmieszczenie włókien nadprzewodnikowych w przekroju przewodu.

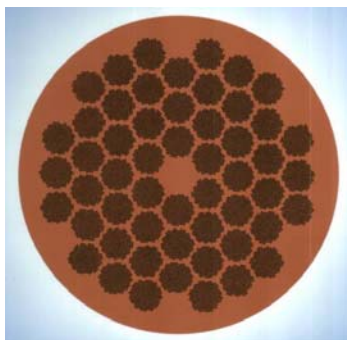


Rys. 1.9. Przekroje prostych przewodów wielowłóknowych z Nb-Ti z różnie rozmieszczonymi włóknami nadprzewodnikowymi [7]

Rysunek 1.9 przedstawia przekroje prostych przewodów wielowłóknowych z Nb-Ti z różnie rozmieszczonymi włóknami nadprzewodnikowymi. Widać, że już na poziomie prostego przewodu wielowłóknowego rozkład nadprzewodnika i w konsekwencji prądu w przekroju przewodu nie jest równomierny. Proste przewody wielowłóknowe mogą być wykorzystywane samodzielnie albo być elementami wiązek przewodów złożonych.

Rysunek 1.10 przedstawia przekrój złożonego przewodu nadprzewodnikowego z Nb-Ti, który ma 54 grupy wiązek po 187 prostych przewodów wielowłóknowych, takich jak np. na rys. 1.9. Metrykę przewodu LTS, produkcji Vacuumschmelzte przedstawia rys. 1.11. Metryka zawiera takie dane jak: producent, średnica przewodu, numer szpuli, typ przewodu, rodzaj izolacji elektrycznej, długość i charakterystyka krytyczna w temperaturze 4,2 K zmierzona przy kryterium 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$. Pozostałe dane

dotyczące tego przewodu producent dostarczył w ulotce reklamującej wszystkie wyroby firmy.



Rys. 1.10. Przekrój przewodu nadprzewodnikowego z Nb-Ti, który ma 54 grupy wiązek po 187 prostych przewodów wielowłókowych [7]

W tab. 1.2 przedstawione są parametry wybranych przewodów Nb-Ti produkowanych przez Vacuumschmeltze. Wartości współczynników C_{sc} tych przewodów zawarte są w przedziale od 1,4 do 15. Charakterystyki krytyczne przewodów z tab. 1.2 zamieszczone są w tab. 1.3.

Tab. 1.2. Wybrane przewody kołowe i prostokątne z Nb-Ti (Vacuumschmeltze)

typ	C_{sc}	\varnothing przew, lub (szer. x grub.) mm, lub (mm x mm)	liczba włókien	\varnothing_{wt} μm	masa (1 km) kg
F 60 (0,4)	1,9	0,4	60	30	0,99
F 60 (0,6)	1,4	0,6	60	50	2,16
T 54 (0,4) ³	1,35	0,4	54	36	0,99
F 24 (0,85)	6,5	0,85	24	63	4,98
F 130	2,0	(1,5x0,9)	130	67	10,7
F 160	1,4	(0,8x0,5)	160	36	3,1
F 210	15	(7,6x3,5)	210	100	232
F 300	5	(2,45x1,4)	300	50	28,8
F 600	2,5	(3,4x1,4)	600	55	38,2
F 1700	2	(1,8x1,3)	1700	24	17,9
F 1950	1,6	(3,2x2,0)	1950	40	48,5

Tab. 1.3. Charakterystyki krytyczne przewodów z tab. 1.2 w temp. 4,2 K

typ	I_c, A 3 T	I_c, A 4 T	I_c, A 5 T	I_c, A 6 T	I_c, A 7 T	I_c, A 8 T
F 60(0,4)	166	138	112	88	63	39
F 60(0,6)	453	375	306	239	173	107
T 54(0,4)	173	149	127	103	77	50
F 24(0,85)	249	205	166	132		
F 130	1000	835	682	531	385	238
F 160	468	387	316	246	178	110
F 210			1330			
F 300			800			
F 600			1768			
F 1700			1170			
F 19500			2954			

Przewody wielowłóknowe Nb_3Sn wytwarzane są podobnie jak przewody Nb-Ti w procesie rurowym. W przeciwieństwie do przewodów Nb-Ti podczas produkcji przewodów Nb_3Sn nie poddaje się obróbce mechanicznej gotowego nadprzewodnika, który jest kruchy, lecz jego składniki. Może być stosowana tutaj metoda „brązu”, w której pręty z Nb umieszczane są w rurach z brązu (Cu-Sn). Wiązki Cu-Sn/Nb umieszczane są w większych rurach Cu-Sn i przeciągane w celu zmniejszenia średnicy. Wiązki wstępnie obrobionych przewodów umieszczane są w rurach Cu-Sn i ponownie przeciągane aż do otrzymania odpowiedniej średnicy włókien Nb i odpowiedniego parametru C_{sc} . Podczas obróbki mechanicznej przewody wstępne i wiązki przewodów mogą być umieszczane w rurach z materiałów innych niż Cu-Sn np. w rurach ze stopów wysokorezystancyjnych. Pręty Nb mogą być również umieszczane nie w rurach lecz w walcach Cu-Sn o odpowiednio dużej średnicy i długości z wywierconymi otworami, co pozwala na bardzo równomierne i precyzyjne rozmieszczenie włókien nadprzewodnikowych w przekroju przewodu. Po zakończeniu obróbki mechanicznej powstaje półprodukt, który jest wprawdzie przewodem nadprzewodnikowym (dzięki włóknom Nb) ale jeszcze nie docelowym Nb_3Sn . Zamiast prętów Nb stosowane mogą być pręty Nb-Ta. Podczas wykonywania urządzeń z nadprzewodników Nb_3Sn można stosować technikę nawinięcia-przereagowania lub przereagowania-nawinięcia. W pierwszej technice, urządzenie nawijane jest półproduktem

przewodu Nb_3Sn , który ma bardzo dobre właściwości mechaniczne i dużą odporność na uszkodzenie w czasie nawijania. Po wykonaniu uzwojenia trzeba je jednak w całości poddać obróbce termicznej. W drugiej technice (przereagowania-nawinięcia) półprodukt przewodu Nb_3Sn przed nawinięciem poddany jest finalnej obróbce termicznej a uzwojenie wykonywane jest z gotowego przewodu Nb_3Sn , który jednak jest podatny na uszkodzenia podczas nawijania. Obróbka termiczna w obu technikach polega na wygrzewaniu w atmosferze beztlenowej w temperaturze 700 °C przez 40-140 godzin. Podczas obróbki termicznej cyna z brązu dyfunduje do włókien z niobu i tworzy związek międzymetaliczny Nb_3Sn . W tab. 1.4 zamieszczone są wybrane parametry i charakterystyki krytyczne przewodów Nb_3Sn VACRYFLUX.

Tab. 1.4. Charakterystyki krytyczne przewodów kołowych Nb_3Sn VACRYFLUX⁴ w temperaturze 4,2 K

typ	liczba włókien	$\varnothing_{\text{przew}}$ [mm]	I_c, A	I_c, A	I_c, A	I_c, A
			8 T	10 T	12 T	14 T
NS	4500	0,5	202	136	78	–
	6000	0,7	374	252	144	–
	10000	1,0	753	504	289	–
HNST	4500	0,5	171	123	86	58
	6000	0,7	316	228	159	107
	10000	1,0	636	456	321	215
NS Tal	6000	0,7	305	204	117	-
	10000	1,1	721	483	277	-
	13000	1,25	973	652	373	-
HNST Tal	6000	0,7	258	185	130	87
	10000	1,1	605	435	306	205
	13000	1,25	822	591	416	279

⁴ materiał wyjściowy – włókna Nb lub Nb-Ta w matrycy Cu-Sn

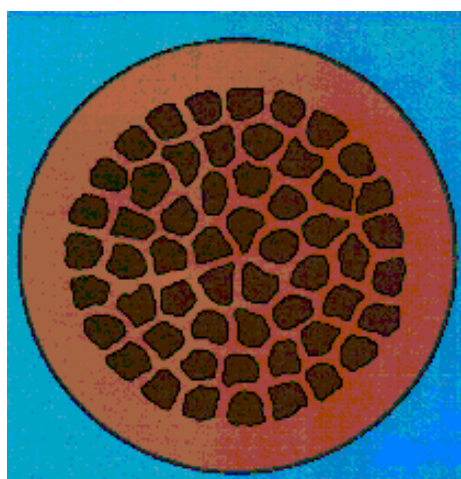
1.3.2. Przewody HTS – Bi-2212, Bi-2223, Y-123

Opracowanie technologii wytwarzania przewodów ze stopów LTS zajęło, od odkrycia zjawiska nadprzewodnictwa, kilkadziesiąt lat. Opracowanie technologii wytwarzania przewodów z ceramik HTS zajęło tylko kilka lat od odkrycia materiałów HTS. Przewody z nadprzewodników HTS produkowane są głównie dwoma metodami.

Pierwsza z nich służąca do wytwarzania przewodów nadprzewodnikowych pierwszej generacji (1G) to proces rurowo-proszkowy będący połączeniem procesu metalurgii proszkowej i procesu rurowego.



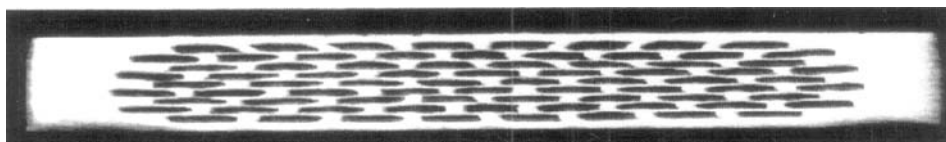
Rys. 1.12. Przekrój wiązki rur Ag ze sproszkowanym prekursorem materiału HTS umieszczonych w większej rurze Ag po wstępnym przeciągnięciu



Rys. 1.13. Przekrój przewodu 57-włóknowego z nadprzewodnika Bi-2223 w matrycy (proces rurowo-proszkowy) [7]

Prekursor materiału nadprzewodnikowego w postaci proszku umieszczany jest w rurze matrycy srebrnej o odpowiednio dużej średnicy. Rura z proszkiem poddawana jest obróbce mechanicznej – przeciągnięciu w celu zmniejszenia średnicy. Wiązki wstępnie obrabionych rur z proszkiem umieszczone są w rurze ze srebra i poddawane dalszemu przeciągnięciu (rys. 1.12) aż do otrzymania przewodu o odpowiedniej średnicy i liczbie włókien prekursora. Po zakończeniu obróbki mechanicznej przewód poddawany jest obróbce termicznej w celu otrzymania nadprzewodnika z proszku. W przeciwieństwie do wygrzewania przewodów Nb_3Sn w atmosferze beztlenowej, tutaj, podczas wygrzewania, kluczowa jest

właśnie atmosfera tlenowa. Przekrój 57-włóknowego przewodu (proces rurowo-proszkowy) z nadprzewodnika Bi-2223 w matrycy Ag-Au przedstawia rys. 1.13. Przewód przeznaczony jest do zastosowania w krioprzepustach prądowych.



Rys. 1.14. Przekrój 76-włóknowej taśmy z nadprzewodnika Bi-2212/Ag [11]

Przekrój 76-włóknowej taśmy z nadprzewodnika Bi-2212 w matrycy ze srebra wykonanej w procesie rurowo-proszkowym i po spłaszczeniu pod-danej obróbce termicznej przedstawia rys. 1.14. W tab. 1.5, tab. 1.6 oraz tab. 1.7 przedstawione są parametry taśm HTS które mają budowę zbliżoną do przedstawionej na rys. 1.14.

Tab. 1.5. Parametry przewodów z Bi-2223/Ag (Am. Superconductor) [10]

typ	grub.	szer.	napręż. maks. ⁵	odksz. maks. ⁵	śred. gięcia min. ⁵	I_c (77 K, pole własne) (kryterium 1 μ V/cm)
	mm	mm	MPa	%	mm	A
bez wzmocnień 100, 200 m	0,21	4,1	75	0,15	100	115
						125
						135
zbrojone 100, 200, 300 m	0,31	4,1	265	0,4	70	115
						125
						135
hermetyczne (30 atm. I _{H2} /16 h) 100, 200, 300 m	0,32	4,8	265	0,4	70	115
						125
						135

⁵ 95 % I_c

Tab. 1.6. Parametry przewodów z Bi-2212 w matrycy Ag (NEXANS) [11]

grub.	szer.	I_c (4,2 K, pole własne) (kryterium $1 \mu V/cm$)	naprężenie maks. (300 K) ⁵	odkształcenie maks. ⁵	naprężenie maks. (77 K) ⁵
mm	mm	A	N	%	N
0,25	3,1	300	30	0,06	47
0,35	2,6	320	36	0,06	55
0,35	4,4	530	60	0,06	94

W tab. 1.6 zamieszczone są parametry przewodów oferowanych przez firmę American Superconductor. Przewody mogą być dostarczane na szpulach pokazanych na rys. 1.15, które można wykorzystać podczas nawijania cewek. Przewód nie musi więc być dodatkowo przewijany na szpule nawijarki przed wykonaniem uzwojenia. Zmniejsza to ryzyko mechanicznego uszkodzenia przewodu HTS. W tab. 1.6 zamieszczone są wymiary, prądy krytyczne, maksymalne wartości naprężeń i odkształceń mechanicznych oraz wynikająca z nich minimalna średnica gięcia. Prąd krytyczny i parametry mechaniczne podawane są tutaj dla temperatury 77 K. W tab. 1.7 zamieszczone są parametry przewodów z Bi-2212 w matrycy srebrnej gdzie producent (Nexans) podaje I_c w temperaturze 4,2 K a naprężenia maksymalne w temperaturach 300 K i 77 K.

Firma TRITHOR wytwarza trzy typy przewodów HTS dla różnych zastosowań:

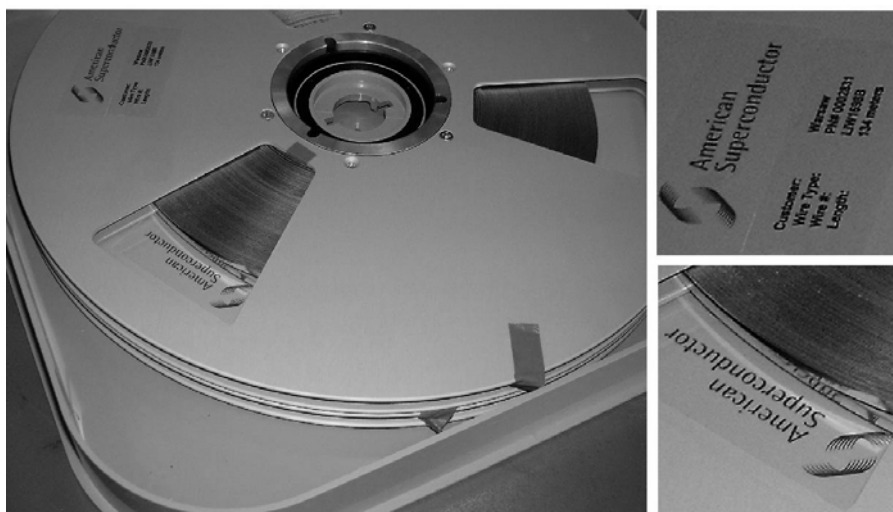
- TT – duża gęstość prądu krytycznego i dobre parametry mechaniczne – kable, generatory, silniki, MRI, NMR,
- TT-ac – małe straty przemiennoprądowe, duża gęstość prądu krytycznego i dobre parametry mechaniczne – SMES-y,
- TT-gold – mała przewodność cieplna, duża gęstość prądu krytycznego i dobre parametry mechaniczne – przepusty prądowe.

W przewodach tych zastosowane są różne materiały matrycy. Matryce ze srebra bez domieszek stosuje się w przewodach ogólnych zastosowań. W celu poprawy właściwości mechanicznych stosuje się matryce z Ag(Mg-Ni). W celu zmniejszenia przewodności cieplnej

stosowane są matryce z Ag-Au. W tab. 1.7 przedstawione są parametry tych przewodów.

Tab. 1.7. Parametry przewodów 85-włóknowych z Bi-2223, TRITHOR [12], [24]

przewody TT i TT-ac	materiał matrycy wewnętrznej	Ag
	materiał pokrycia zewnętrznego	AgMg lub AgMgNi
przewody TT-gold	materiał matrycy wewnętrznej	AgAu
	materiał pokrycia zewnętrznego	AgAuMg lub AgAuMgNi
właściwości nadprzewodnikowe	gęstość prądu krytycznego	70 A/mm ² (1 μV/cm, 4 pomiary w temp. 77 K i polu własnym)
wymiary	szerokość przewodu	2,0-4,0 mm
	grubość przewodu	ok. 0,23 mm
właściwości mechaniczne	osiowa wytrzymałość na rozciąganie (300 K)	100 MPa (<5 % degradacji I_c)
	minimalny promień gięcia (300 K)	25 mm (<5 % degradacji I_c)
dostarczane długości	maksymalna długość jednego kawałka	500 m
dołączona dokumentacja	protokół rozkładu gęstości prądu krytycznego wzdłuż długości przewodu (pomiar rezystancji na całej długości co ok. 1 m) i wartości parametru n dla nadprzewodnika	protokół grubości i szerokości na całej długości przewodu
izolacja elektryczna	materiał	PEEK lub folia
	grubość izolacji	PEEK: ok. 20 μm-30 μm, na brzegach ok. 40μm, folia: ok. 15 μm
	poziom izolacji	> 600 V



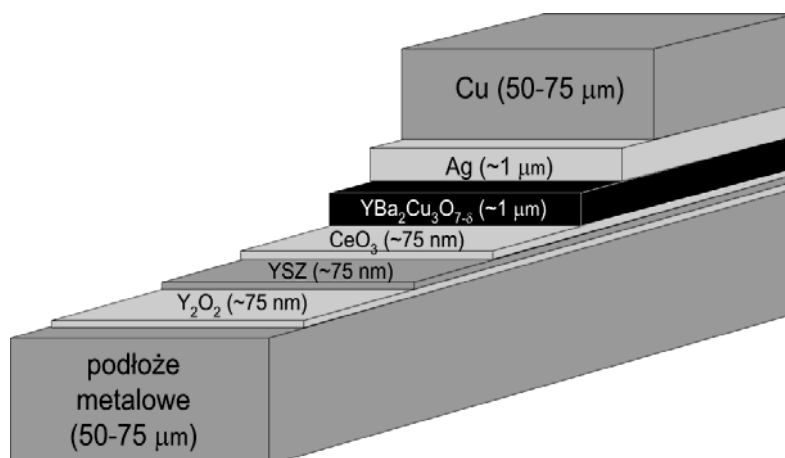
Rys. 1.15. Szpula z taśmą z nadprzewodnika Bi-2223 w matrycy ze srebra⁶ (American Superconductor, tab. 1.5)

W drugiej metodzie, za pomocą której otrzymuje się nadprzewodnikowe przewody powlekane drugiej generacji (2G), na podłoże metalowe posiadające odpowiednie właściwości mechaniczne, ciepłone i elektryczne nanoszona jest warstwa odpowiedniego materiału prekursora nadprzewodnika, z którego po obróbce cieplnej w atmosferze tlenowej tworzy się nadprzewodnik. Materiały mogą być nanoszone na podłoże w procesie chemicznego (CVD – chemical vapor deposition) lub fizycznego (PVD – physical vapor deposition) osadzania próżniowego, czy też w procesie osadzania metaloorganicznego (MOD – metalorganic deposition).

Proces MOD stosowany do pokrywania szerokich, ciągłych i giętkich podłoży, np. przy produkcji papierów i filmów fotograficznych, jest bardzo dobrze dostosowany do powlekania przewodów nadprzewodnikowych 2G. Proces MOD jest dużo tańszy od procesów PVD i CVD, a przewody nadprzewodnikowe 2G wytwarzane w procesie MOD są tańsze od nadprzewodnikowych przewodów 1G wytwarzanych w procesie rurowo-proszkowym. Rysunek 1.16 pokazuje warstwy nadprzewodnikowego (Y-123) przewodu powlekanego 2G wytworzonego w procesie TFA-MOD [13], w którym prekursor nadprzewodnika jest mieszaniną octanów itru, baru i miedzi, kwasu trójfluorooctowego (TFA – trifluoroacetate), kwasu octowego i wody. Umieszczenie warstwy nadprzewodnika w strefie neutralnej pomiędzy warstwą podłoża

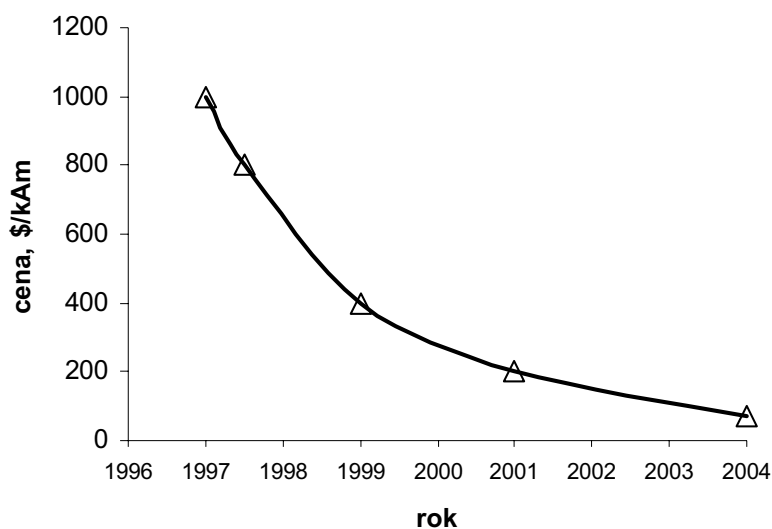
⁶ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

metalowego a warstwą stabilizatora miedzanego poprawia mechaniczne właściwości przewodu.



Rys. 1.16. Warstwy przewodu Y-123 drugiej generacji [13]

Zmianę cen przewodów 1G z nadprzewodnika Bi-2223 w ciągu kilku lat przedstawia rys. 1.17. Przyjmuje się, że przy cenie poniżej 50 \$/kAm pewne klasy silników, generatorów i kabli będą tańsze od rozwiązań konwencjonalnych.



Rys. 1.17. Cena przewodów z nadprzewodnika Bi-2223 [10]

1.4. CHŁODZENIE URZĄDZEŃ NADPRZEWODNIKOWYCH

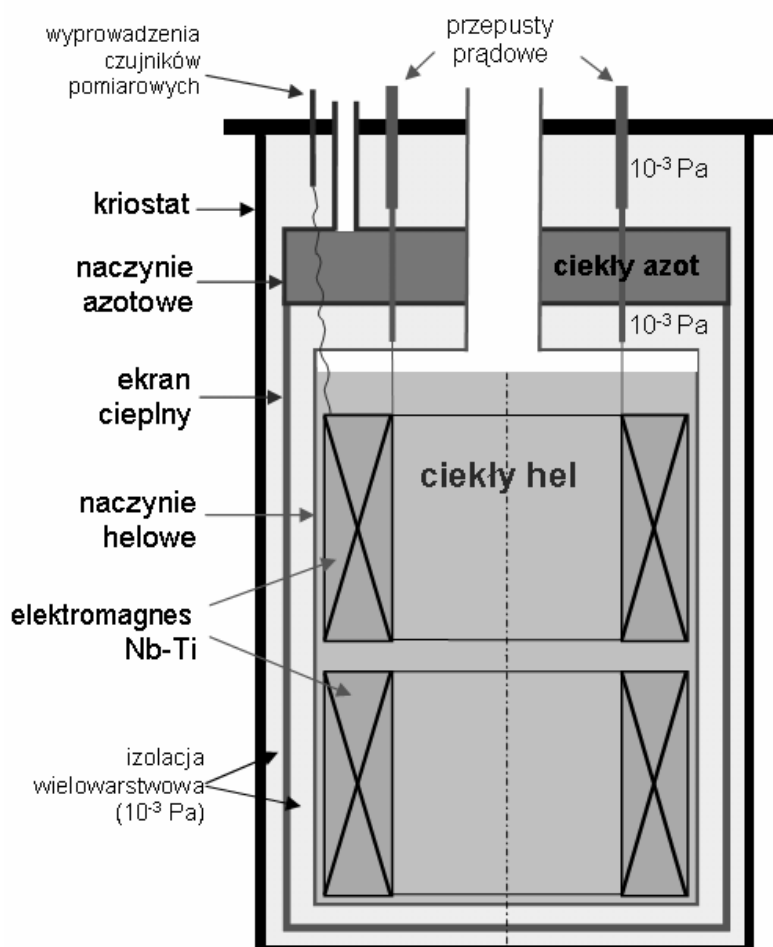
Podstawowym i najtrudniejszym do utrzymania parametrem, który decyduje o nadprzewodnictwie, jest temperatura. Maksymalna temperatura krytyczna nadprzewodników niskotemperaturowych nie przekracza 25 K. W praktyce urządzenia z takich nadprzewodników pracują w temperaturze 4,2 K i niższych przy technikach chłodzenia z użyciem ciekłego helu. Temperatura ta może być wyższa (np. 10 K) przy chłodzeniu kriochłodziarką. Urządzenia nadprzewodnikowe są izolowane termicznie od otoczenia, co realizowane jest przez umieszczenie ich w specjalnych kriostatach wyposażonych w złożoną izolację termiczną minimalizującą dopływ ciepła z zewnątrz drogą przewodnictwa, konwekcji i promieniowania (rys. 1.18). Jest to zazwyczaj wysokopróżniowa izolacja termiczna z wielowarstwowymi ekranami z folii aluminiowej minimalizującymi dopływ ciepła przez promieniowanie (izolacja wielowarstwowa) i z miedzianymi ekranami cieplnymi schładzanymi parami helu lub ciekłym azotem, bądź połączonymi z 1-szym stopniem kriochłodziarki. Zabiegi te mają zminimalizować dopływ ciepła z zewnątrz i utrzymać temperaturę urządzeń na poziomie umożliwiającym pracę w stanie nadprzewodzącym.

System chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych odbiera ciepło dopływające do wnętrza kriostatu z zewnątrz przez izolację termiczną, ścianki kriostatu, przepusty prądowe i pomiarowe oraz ciepło wydzielane podczas pracy w stanach przejściowych (załączanie i wyłączenie urządzenia oraz zmiany prądu roboczego), ciepło wydzielane w skutek zakłóceń oraz ciepło wynikające ze strat przemiennoprądowych w nadprzewodnikach. Do chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych wykorzystywane mogą być kriochłodziarki oraz ciecze kriogeniczne: ciekły hel (temperatura wrzenia 4,2 K), ciekły wodór (temperatura wrzenia 20,4 K) oraz ciekły azot (temperatura wrzenia 77,4 K). Można wyróżnić cztery podstawowe techniki chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych: chłodzenie w kąpeli, chłodzenie wymuszone, chłodzenie kontaktowe (przy wykorzystaniu kriochłodziarki) oraz chłodzenie w kąpeli ze wspomaganiami.

1.4.1. Chłodzenie w kąpeli

Właściwości ciekłego helu są w bardzo dużym stopniu zależne od temperatury. Z uwagi na to, że poniżej 2,18 K właściwości ciekłego helu zmieniają się skokowo [9], wprowadzone zostało określenie: hel I ($T > 2,18$ K) oraz hel II ($T < 2,18$ K). Hel II nazywany jest helem nadpłynnym lub nadciekłym [3]. Optymalną temperaturą pracy urządzeń nadprzewodnikowych chłodzonych w kąpeli helu II jest $T = 1,8$ K. Urządzenia nadprzewodnikowe mogą być chłodzone również w kąpeli

ciełego helu I ($T = 4,2$ K), w kąpieli ciekłego wodoru ($T = 20,4$ K), w kąpieli ciekłego azotu ($T = 77$ K). Do głównych zalet tej techniki chłodzenia należą dobre zdolności chłodzenia, prosta konstrukcja uzwojeń i stała temperatura w całym uzwojeniu. Jeżeli przy tym stosuje się przewody ze stabilizacją kriogeniczną (duży stosunek miedzi do nadprzewodnika w przekroju przewodu) to uzwojenia wytrzymują bez przerwy w pracy nawet duże zakłócenia mechaniczne, ponieważ duża masa czynnika chłodzącego łatwo pochłania energię takich zakłóceń. Rysunek 1.18 przedstawia elektromagnes nadprzewodnikowy chłodzony techniką w kąpieli ciekłego helu.



Rys. 1.18. Elektromagnes Nb-Ti chłodzony techniką w kąpieli ciekłego helu

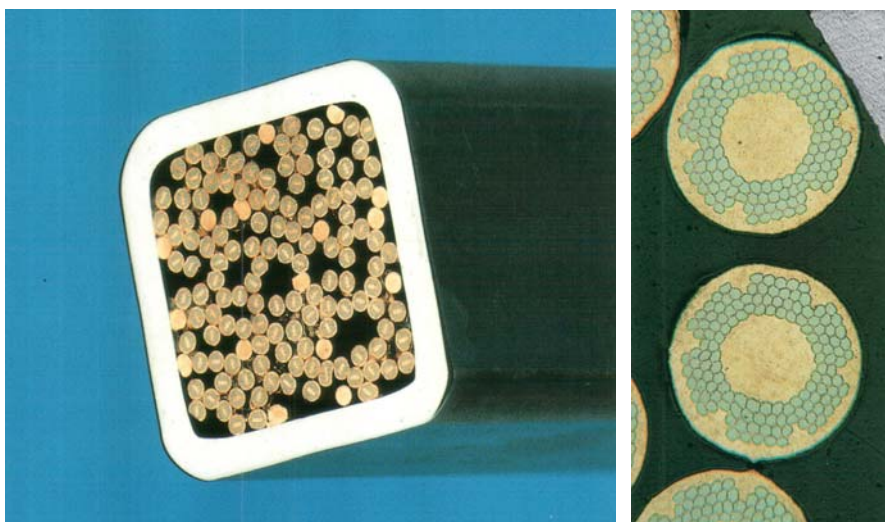
Elektromagnes umieszczony jest w naczyniu helowym i zanurzony w ciekłym helu pod ciśnieniem atmosferycznym. Pomędzy naczyniem helowym a zewnętrzną ścianką kriostatu znajduje się termiczna izolacja wielowarstwowa z próżnią rzędu 10^{-3} Pa wspomagana ekranem cieplnym połączonym z naczyniem azotowym. Uzwojenia nadprzewodnikowe do chłodzenia w kąpeli mogą być wykonane z kanałami chłodzącymi lub bez. Przepływ ciepła z uzwojenia do cieczy kriogenicznej odbywa się głównie na drodze konwekcji swobodnej. Jeżeli uzwojenie wykonane jest bez kanałów chłodzących to transport ciepła z wnętrza uzwojenia do brzegu chłodzonego cieczą kriogeniczną odbywa się na drodze przewodnictwa cieplnego. Kanały chłodzące w uzwojeniu znacznie zmniejszają wartość współczynnika zapełnienia uzwojenia λ_{sc} . Wymiana ciepła na brzegu urządzenie-czynnik chłodzący zależy od rodzaju czynnika chłodzącego, ukształtowania powierzchni względem siły grawitacji, rodzaju powierzchni, różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią a czynnikiem chłodzącym.

1.4.2. Chłodzenie wymuszone

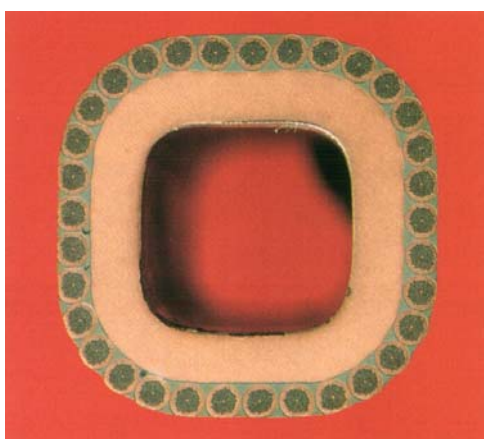
Chłodzenie wymuszone można realizować przez przepływ ciekłego lub gazowego helu, wodoru lub azotu w kanałach chłodzących wewnątrz uzwojenia i po jego powierzchni, w rurkach umieszczonych wewnątrz przewodu nadprzewodnikowego bądź w rurkach nawiniętych na chłodzone uzwojenie. Wymiana ciepła pomiędzy czynnikiem chłodzącym a ścianką rurki, w której ten czynnik przepływa odbywa się na drodze konwekcji wymuszonej. Możliwość zmiany współczynnika przejmowania ciepła przez zwiększenie prędkości przepływu cieczy kriogenicznej jest główną zaletą tej techniki chłodzenia w porównaniu z chłodzeniem w kąpeli. Przepływ ciepła z uzwojenia do rurek chłodzących odbywa się na drodze przewodnictwa cieplnego. W uzwojeniu stosowane są często mostki cieplne odprowadzające ciepło z wnętrza uzwojenia do rurek chłodzących.

W przypadku dużych strat cieplnych w uzwojeniu, jak i w przypadku przepływu czynnika chłodzącego wewnątrz przewodów, powstają duże różnice ciśnień i znaczne różnice temperatury w uzwojeniu oraz konieczny jest duży wydatek mocy na pompowanie czynnika chłodzącego. Z uwagi na małą objętość helu, wodoru czy azotu zaangażowaną w chłodzenie, mogą pojawić się trudności w opanowaniu skutków dużych zakłóceń mechanicznych. Jeżeli czynnik chłodzący przepływa wewnątrz uzwojenia np. w rurkach pomiędzy zwojami, czy wewnątrz przewodów, to wartość współczynnika zapełnienia uzwojenia λ_{sc} ulega zmniejszeniu. Jeżeli czynnik chłodzący przepływa na zewnątrz uzwojenia, a ciepło odbierane jest z uzwojenia na drodze przewodnictwa cieplnego, to wpływ systemu chłodzenia na wartość współczynnika zapełnienia uzwojenia λ_{sc} jest

minimalny. Chłodzenie wymuszone wymaga specjalnej konstrukcji przewodów nadprzewodnikowych i specjalnej konstrukcji uzwojeń. Rysunek 1.19 przedstawia przewód typu kabel w kanale chłodzącym (CIC) o $I_{c(4,5\text{ K}, 12\text{ T})}=6\text{ kA}$.



Rys. 1.19. Przewód typu kabel w kanale chłodzącym (CIC), 13,8 mm x 13,8 mm. , $I_c = 6\text{ kA}$ (12 T, 4,5 K). 40 % wolnego przekroju dla przepływu helu. 128 prostych przewodów wielowłóknowych z Nb_3Sn w matrycy Cu + 16 przewodów Cu pokrytych Cr. Powiększenie przewodów Nb_3Sn w okolicach brzegu [7]



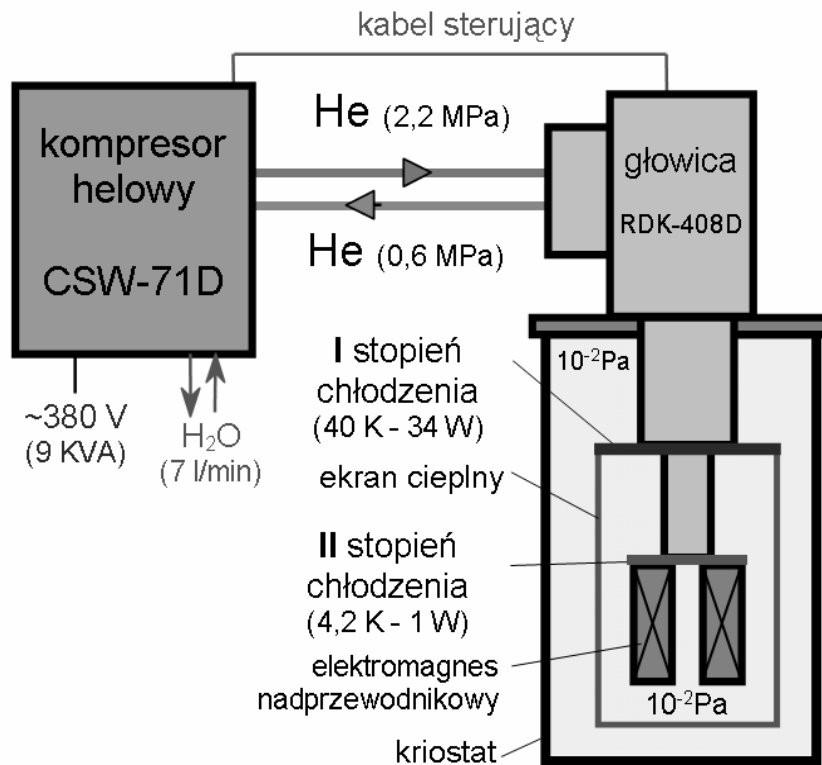
Rys. 1.20. Przewód wydrążony w postaci kształtki miedzianej z przylutowanymi prostymi przewodami wielowłóknowymi z Nb-Ti [7]

Przewód składa się z 128, przewodów wielowłókowych z Nb_3Sn w matrycy Cu i 16 przewodów miedzianych. W kablu jest 40 % wolnego przekroju dla przepływu helu. Rysunek 1.20 przedstawia przewód wydrążony w postaci kształtki miedzianej z przylutowanymi przewodami wielowłókowymi z Nb-Ti. Wymuszony przepływ czynnika chłodzącego odbywa się wewnątrz kształtki miedzianej.

Wymiana ciepła na brzegu urządzenie-czynnik chłodzący zależy od rodzaju czynnika chłodzącego, rodzaju powierzchni, różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią a czynnikiem chłodzącym i prędkości przepływu czynnika chłodzącego.

1.4.3. Chłodzenie kontaktowe

Schemat układu chłodzenia elektromagnesu nadprzewodnikowego techniką kontaktową przedstawia rys. 1.21.



Rys. 1.21. Elektromagnes nadprzewodnikowy chłodzony techniką kontaktową

Elektromagnes nadprzewodnikowy połączony z II stopniem głowicy kriołodziarki umieszczony jest w kriostacie próżniowym. Do I stopnia kriołodziarki połączony jest ekran cieplny zmniejszający strumień ciepła dopływający z zewnątrz do elektromagnesu. W całej przestrzeni kriostatu utrzymywana jest próżnia rzędu 10^{-2} Pa (izolacja próżniowa).

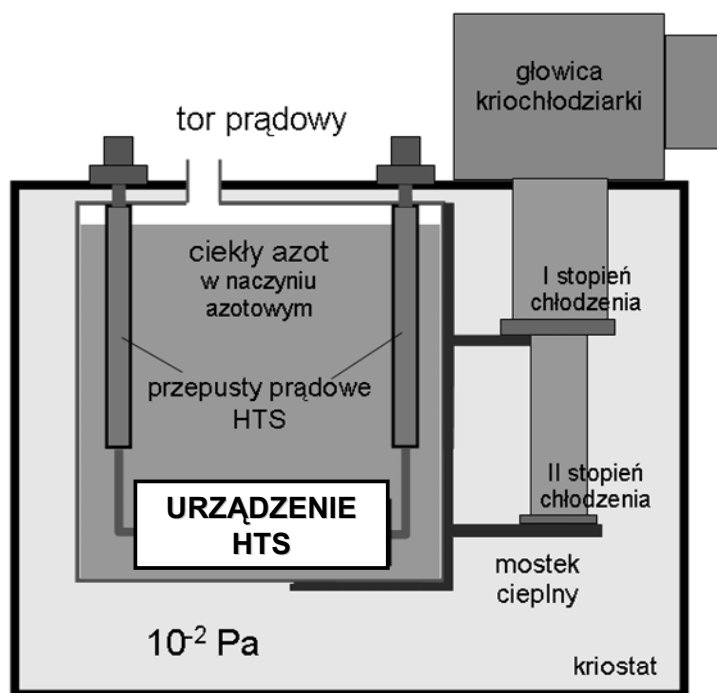
Kriołodziarki [14] pozwalają na całkowite wyeliminowanie cieczy kriogenicznych z układu chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych. Umożliwia to tworzenie autonomicznych systemów nadprzewodnikowych [15], w których wyeliminowana została konieczność okresowego uzupełniania kriogenicznych czynników chłodzących. Istnieje kilka różnych konstrukcji kriołodziarek, wśród których należy wyróżnić kriołodziarki mechaniczne i tzw. „puls-tuby” (pulse tube) [16]. Ciepło odbierane jest z uzwojenia nadprzewodnikowego głównie na drodze przewodnictwa cieplnego i poprzez karkas o odpowiednio dużej przewodności cieplnej dopływa do głowicy kriołodziarki. Podstawową wadą tej techniki jest ograniczona efektywność chłodzenia rzędu pojedynczych watów (1-1,5) w temperaturze 4,2 K oraz kilkudziesięciu watów (30-40) w temperaturze 40 K. Jeżeli potrzebna jest większa efektywność chłodzenia to należy stosować kilka kriołodziarek. Mała bezwładność cieplna wydłuża czas powrotu uzwojenia ze stanu rezystywnego do nadprzewodzącego po przejściu nadprzewodzącym.

Wpływ tej techniki chłodzenia na wartość współczynnika zapelnienia uzwojenia λ_{sc} jest minimalny (brak kanałów chłodzących). Wymiana ciepła pomiędzy urządzeniem a kriołodziarką zależy od parametrów cieplnych kriołodziarki.

1.4.4. Chłodzenie w kąpieli ze wspomaganiami

Wadą chłodzenia kontaktowego jest ograniczona efektywność chłodzenia i mała bezwładność cieplna. Wadą chłodzenia w kąpieli jest konieczność częstego uzupełniania cieczy kriogenicznych, co wymaga stałej obsługi urządzeń. Zastosowanie techniki w kąpieli ze wspomaganiami, gdzie uzwojenie zanurzone jest w cieczy kriogenicznej a kriołodziarka odbiera ciepło od tej cieczy łączy podstawowe zalety techniki chłodzenia w kąpieli zwielfokrotniając czas pomiędzy kolejnymi uzupełnieniami cieczy kriogenicznych, co pozwala na budowanie układów prawie bezobsługowych. Uzwojenie wykonane może być zarówno bez kanałów chłodzących jak i z kanałami i od tego zależy wartość współczynnika zapelnienia uzwojenia λ_{sc} . Chłodzenie w kąpieli ze wspomaganiami bardzo często stosowane jest w urządzeniach, w których występują chwilowe bardzo duże straty ciepła, a w pozostałym czasie pracy urządzenia straty te są ograniczone do możliwości chłodniczych kriołodziarki.

Kąpiel w cieczy kriogenicznej stanowi tutaj swojego rodzaju akumulator „zimna” doładowywany przez kriołodziarkę. Urządzeniami, które pracują z ustabilizowanymi stratami ciepła i w których może pojawić się gwałtowne (nie awaryjne) chwilowe zapotrzebowanie na moc chłodniczą są np. nadprzewodnikowe ograniczniki prądu. Schemat takiego układu chłodzenia techniką w kąpeli ciekłego azotu ze wspomaganie kriołodziarką przedstawia rys. 1.22.



Rys. 1.22. Urządzenie nadprzewodnikowe chłodzone techniką w kąpeli ze wspomaganie kriołodziarką

I i II stopień kriołodziarki połączony jest mostkami cieplnymi z naczyniem azotowym, w którym umieszczony jest element HTS – będący zasadniczym elementem urządzenia. Nadprzewodnikowe przepusty prądowe ograniczają dopływ ciepła z zewnątrz do środka kriostatu na drodze przewodnictwa poprzez tor prądowy. W całej przestrzeni kriostatu poza naczyniem azotowym utrzymywana jest próżnia rzędu 10^{-2} Pa (izolacja próżniowa).

Na etapie przepływu ciepła z urządzenia nadprzewodnikowego do czynnika chłodzącego, chłodzenie techniką w kąpeli ze wspomaganie modelowane jest tak jak chłodzenie techniką w kąpeli.

1.5. KRIOPRZEPUSTY PRĄDOWE

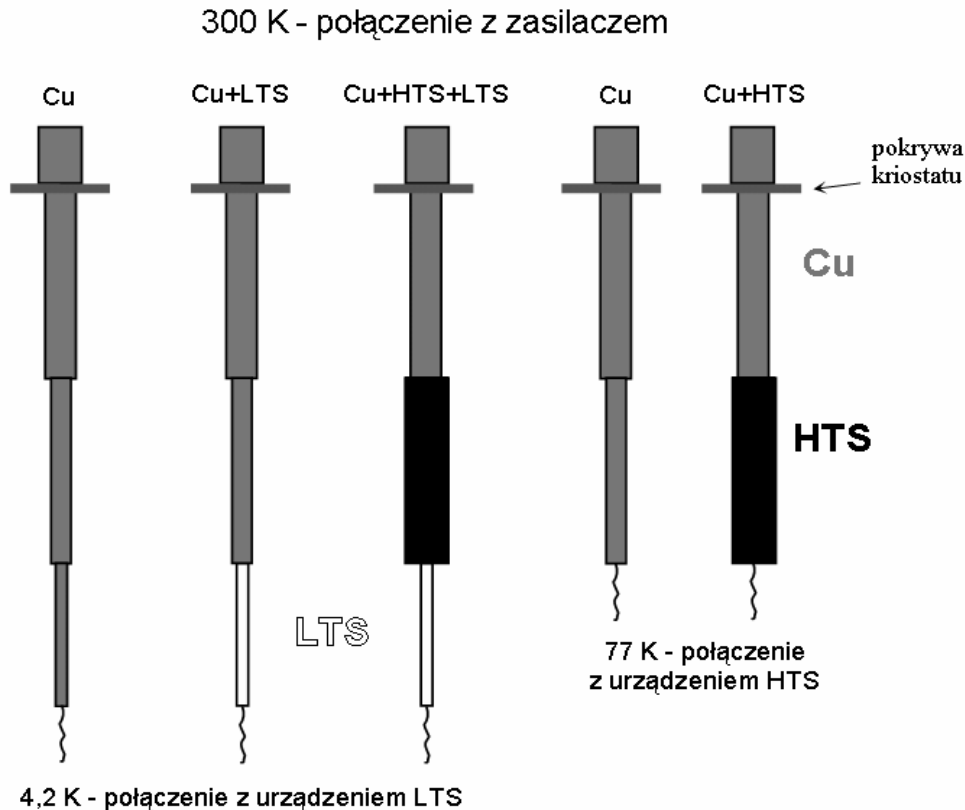
Krioprzepusty prądowe są powszechnie stosowane jako integralne części elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych.

Zasadę budowy krioprzepustów prądowych z miedzi oraz materiałów LTS i HTS przedstawia rys. 1.23. Prąd roboczy płynący od zasilacza do urządzenia nadprzewodnikowego umieszczonego w kriostacie przepływa przez krioprzepusty prądowe. Ciepły koniec krioprzepustu prądowego przyłączony do źródła prądu ma temperaturę pokojową (293 K). Zimny koniec krioprzepustu, przyłączony do urządzenia nadprzewodnikowego pracuje zwykle w temperaturze ciekłego helu (4,2 K) albo ciekłego azotu (77 K) [17], [18]. Krioprzepusty prądowe mogą być wykonane z materiałów nienadprzewodnikowych jak i z nadprzewodnikowych zarówno HTS i LTS. Strumień ciepła dopływający przez krioprzepust prądowy do wnętrza kriostatu oraz ciepło Joule'a generowane w nienadprzewodnikowych lub nienadprzewodzących częściach krioprzepustu przez prąd zasilający urządzenie elektryczne mogą zwiększyć zużycie cieczy kriogenicznych, gdy stosowana jest technika chłodzenia w kąpeli lub nawet uniemożliwić schłodzenie urządzenia do wymaganej temperatury pracy, gdy stosowana jest technika chłodzenia kontaktowego.

Rezystancja krioprzepustów i przewodów łączących zasilacz z krioprzepustami oraz rezystancja wewnętrzna zasilacza przy zerowej rezystancji urządzenia nadprzewodnikowego są czynnikami ograniczającymi maksymalny prąd w obwodzie z elementami nadprzewodnikowymi. Ze względu na konieczność minimalizacji rezystancji, krioprzepusty prądowe powinny mieć możliwie duży przekrój poprzeczny. Z drugiej strony przez duży przekrój poprzeczny dopływa duży strumień ciepła do wnętrza kriostatu na drodze przewodnictwa cieplnego. Zmniejszenie przekroju krioprzepustu zmniejsza dopływ ciepła z zewnątrz ale jednocześnie zwiększa straty Joule'a w krioprzepuście, przez który płynie duży prąd. Krioprzepusty miedziane na rys. 1.23 mają stopniowany przekrój, ponieważ wraz ze spadkiem temperatury przepustu zmniejsza się rezystywność miedzi i można zmniejszyć przekrój nie powodując wzrostu strat Joule'a a zmniejszając dopływ ciepła wzdłuż przepustu.

Do chłodzenia krioprzepustów prądowych zarówno konwencjonalnych jak i nadprzewodnikowych wykorzystywana może być technika chłodzenia wymuszonego bądź technika kontaktowa. Chłodzenie wymuszone krioprzepustów, w przypadku urządzenia w kriostacie chłodzonego techniką w kąpeli, można realizować na dwa sposoby. W pierwszym sposobie, pompa zewnętrzna wytwarza podciśnienie w kriostacie i wywołuje przepływ gazu chłodzącego wzdłuż przepustów. W drugim sposobie wywołuje się w kriostacie nadciśnienie przez

kontrolowane podgrzewanie cieczy kriogenicznej, a gaz wydostając się z kriostatu specjalnymi kanałami wzdłuż przepustów schładza je odbierając ciepło wydzielane w krioprzepustach i napływające z zewnątrz na drodze przewodnictwa. W dobrze zaprojektowanym układzie: kriostat + krioprzepusty + urządzenie nadprzewodnikowe, można doprowadzić do równowagi cieplnej tak, że odpowiedni przepływ gazu chłodzącego krioprzepusty wywołany jest samoczynnie przez straty mocy w uzwojeniu i ciepło dopływające do wnętrza kriostatu z zewnątrz.

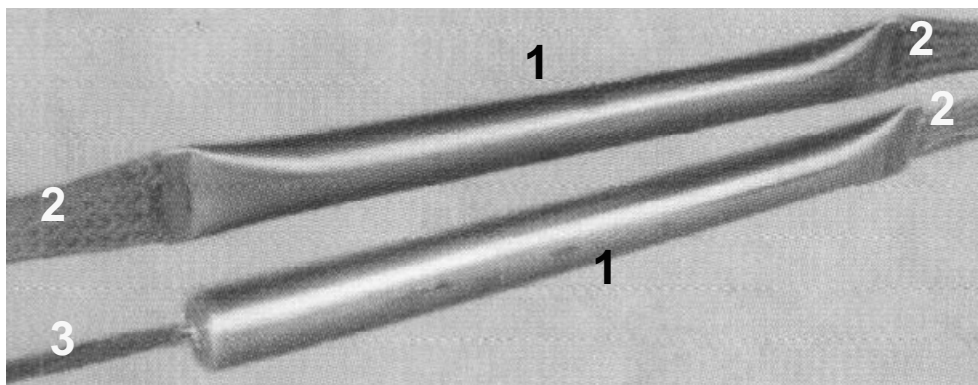


Rys. 1.23. Budowa krioprzepustów prądowych wykonanych z różnych materiałów

Krioprzepusty przystosowane do chłodzenia wymuszonego pracują przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego. Ciepło odbierane jest z przepustu głównie na drodze konwekcji wymuszonej na całej długości krioprzepustu. Krioprzepusty prądowe przystosowane do chłodzenia kontaktowego pracują w próżni, a ciepło odbierane jest z nich na drodze przewodnictwa cieplnego.

Dopływ ciepła do kriostatu przez krioprzepusty prądowe ma znaczący udział w bilansie cieplnym kriostatu. W przypadku urządzeń stałoprądowych w których stosowany jest reżim pracy z prądem nie zanikającym [3], można zmniejszyć dopływ ciepła do kriostatu przez mechaniczne odłączenie krioprzepustów o specjalnie do tego celu przystosowanej konstrukcji (np. firmy Cryomagnetics [19]).

Jednym z podstawowych parametrów krioprzepustów jest ich prąd znamionowy. W przypadku prądów znamionowych do 1 kA problemy cieplne i prądowe w krioprzepustach nie są jeszcze na tyle duże i można stosować własne rozwiązania czy wybrać typowe krioprzepusty dostarczane przez producentów. Firma Cryomagnetics oferuje cały szereg konwencjonalnych krioprzepustów prądowych stałych i rozłączalnych na prądy znamionowe od 50 A do 1000 A. We wstępnych badaniach urządzeń HTS w prostych naczyniowych kriostatach badawczych można korzystać z gotowych krioprzepustów HTS w obudowie, dostarczanych przez producentów. Krioprzepusty takie nie wymagają dodatkowych osłon i obudowy ani elementów mocujących. Z jednej strony przylutowuje się je do przewodów łączących z zasilaczem, z drugiej strony do uzwojenia nadprzewodnikowego. Drugim, obok prądu znamionowego, bardzo istotnym parametrem jest dopływ ciepła przez krioprzepusty do kriostatu. Sprawdzając ten parametr należy zwracać uwagę jakiego przedziału temperatur dotyczy i czy podawany jest dla jednego krioprzepustu czy dla ich pary (tab. 1.8, tab. 1.9, tab. 1.10, tab. 1.11).



Rys. 1.24. Krioprzepusty prądowe (Cu+HTS i Cu+HTS+LTS) CSL-120-L⁷ (CAN Superconductors): 1 – obudowa Cu-Ni z rurą Bi-2223, 2 – płaska splotka Cu, 3 – wiązka Cu/Nb-Ti

⁷ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

Krioprzepusty prądowe połączone ze stosem Bi-2212 przedstawia rys. 1.23. Są to krioprzepusty prądowe CSL-120-L (rys. 1.24), których parametry zamieszczono w tab. 1.8.

Krioprzepusty te wykonane są z rury Bi-2223 umieszczonej w obudowie z rury Cu-Ni. Krioprzepusty mają wyprowadzenia w postaci płaskiej splotki miedzianej z obu stron w zastosowaniach dla urządzeń HTS (Cu+HTS) lub splotki Cu z jednej strony i wiązki Nb-Ti/Cu z drugiej strony w zastosowaniach dla urządzeń LTS (Cu+HTS+LTS). W tab. 1.9 przedstawione są parametry rur z Bi-2223 ze stykami Ag. Firma CAN Superconductors specjalizuje się w kształtkach z Bi-2223. Firma Nexans specjalizuje się w kształtkach z Bi-2212. W tab. 1.10 i tab. 1.11 przedstawione są parametry wybranych prętów i cylindrów z Bi-2212 oferowanych przez Nexans.

Tab. 1.8. Parametry przepustów prądowych z Bi-2223 w obudowie Cu-Ni (CAN Superconductors) [20]

typ	\varnothing_{zew}	dł. rury Cu-Ni	dł. splotki Cu lub wiązki Nb-Ti/Cu	$I_{zn(77K)}$	$I_c(77K)$	dopływ ciepła ⁸ 77 K–4 K	dopływ ciepła ⁸ 64 K–4 K
	mm	mm	mm	A	A	W	W
CSL-50	10	135	250	50	100	0,2	0,14
CSL-50-L	10	205	250	50	100	0,1	0,07
CSL-80	12	150	250	80	170	0,3	0,2
CSL-80-L	12	230	250	80	170	0,15	0,1
CSL-120	15	200	250	120	250	0,3	0,2
CSL-120-L ⁹	15	300	250	120	250	0,15	0,1

W tablicach przedstawiających kształtki do wykorzystania w krioprzepustach prądowych podawany jest bardzo istotny parametr - dopływ ciepła drogą przewodnictwa. Należy zwrócić uwagę, że producenci mogą podawać ten parametr dla różnych różnic temperatur oraz może on

⁸ przez parę krioprzepustów

⁹ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

dotyczyć pojedynczej kształtki lub pary elementów HTS. Kształtki do zastosowań w przepustach prądowych mają napyloną warstwę srebra na końcach w celu ułatwienia połączenia z innymi częściami krioprzepustu. Kształtki takie w przeciwieństwie do tych prezentowanych na rys. 1.24 wymagają konstrukcyjnych elementów mocujących i połączeniowych. Producenci stosują różne rozwiązania połączeń z ceramicznymi elementami krioprzepustów HTS, rys.1.25. Krioprzepusty mogą być wykonane z pręta HTS z przylutowanymi zaciskami do przykręcenia mechanicznego. Z jednej strony zacisk przylutowany jest na sztywno, z drugiej strony przez elastyczna splotkę miedzianą. Ma to zapobiec mechanicznemu uszkodzeniu ceramicznego krioprzepustu podczas schładzania i zmiany odległości pomiędzy elementami kriostatu.

Tab. 1. 9. Parametry wybranych rur Bi-2223 ze stykami Ag (CAN Superconductors) [20]

typ	\varnothing_{zew}	długość /styk Ag	przekrój	I_c (77 K, pole własne)	dopływ ciepła ¹⁰ 77 K – 4 K	dopływ ciepła ¹⁰ 64 K – 4 K
	mm	mm	mm ²	A	W	W
CSL-7/70.1 ¹¹	7,2	70/10	14	60	0,08	0,05
CSL-7/70.2	7,2	70/10	14	100	0,08	0,05
CSL-12/80.3	12	80/12	34	370	0,17	0,12
CSL-12/120.3	12	120/12	34	370	0,1	0,07
CSL-12/160.3	12	160/12	34	370	0,07	0,05
CSL-18/80.3	18	80/15	78	750	0,4	0,3
CSL-18/120.3	18	120/15	78	750	0,2	0,16
CSL-18/160.2 ¹¹	18	160/15	78	450	0,15	0,11
CSL-26/120.3	26	120/20	180	1500	0,6	0,4

¹⁰ dopływ ciepła na drodze przewodnictwa przez parę przepustów

¹¹ rys. 2.10

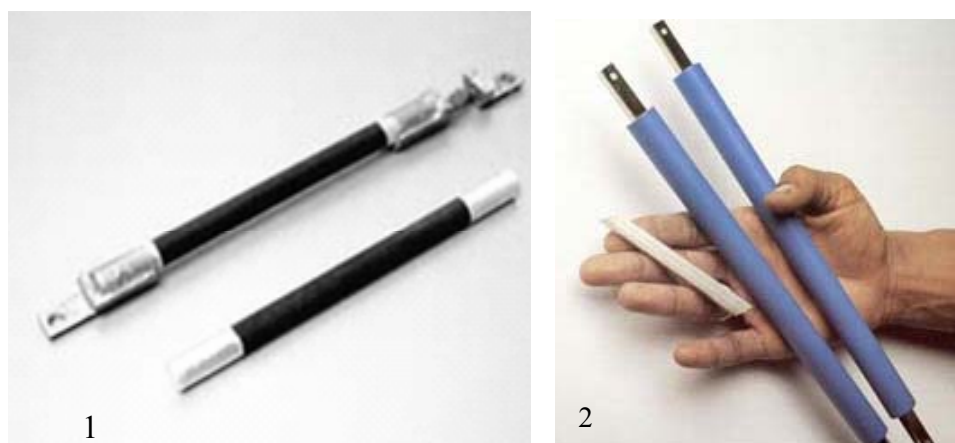
Tab. 1.10. Parametry prętów z Bi-2212 (Nexans)

\varnothing	długość	przekrój	I_c (77 K, pole własne) (1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	dopływ ciepła ¹² 77 K – 4 K	dopływ ciepła ¹² 40 K – 4 K
mm	mm	mm ²	A	mW	mW
5	do 200	20	200	8,39	2,70
8	do 300	50	400	21,49	6,91
10	do 400	75	600	33,58	10,80
13	do 200	133	1000	56,75	18,25
15	do 200	177	1200	75,55	42,29

Tab. 1.11. Parametry cylindrów z Bi-2212 ze stykami Ag lub bez styków (Nexans)

\varnothing	długość	przekrój	I_c (77 K, pole własne) (kryterium 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	dopływ ciepła ¹³ 77 K – 4 K
mm	mm	mm ²	kA	mW
26	do 200	330	1,6	85
35	do 400	620	3,0	79
43	do 300	840	3,8	144
50	do 300	1000	5,0	171
60	do 300	1240	6,0	212
70	do 300	1560	7,0	267
80	do 250	1810	8,5	371
90	do 250	2060	10,0	423
113	do 200	2330	12,0	598
200	do 100	4240	20,5	2178

¹² dopływ ciepła na drodze przewodnictwa dla pręta o dł. 120 mm¹³ dla najdłuższej rury



Rys. 1.25. Wysokotemperaturowe krioprzepusty prądowe z wyprowadzonymi połączeniami mechanicznymi:
1 – Furukawa Electric [21], 2 – American Superconductor

Krioprzepust HTS firmy ACCEL-Instruments [22] przedstawia rys. 1.26. Krioprzepust ten na prąd roboczy do 400 A lub większy na specjalne zamówienie przystosowany jest do chłodzenia techniką kontaktową z 2 lub 3 stopniową kriołodziarką bądź techniką chłodzenia wymuszonego helmu gazowym. Krioprzepust oferowany jest zarówno w wersji rozłączalnej jak i nie rozłączalnej. Znamionowa temperatura pracy zimnego końca zawiera się w przedziale od 4 K do 77 K. W części nadprzewodnikowej krioprzepust wykonany jest z pręta Bi-2212 z posrebrzаныmi kontaktami. Krioprzepust ten doprowadza do kriostatu tylko 1/10 ciepła w porównaniu z optymalnie zaprojektowanym krioprzepustem konwencjonalnym.



Rys. 1.26. Rozłączalny krioprzepust prądowy HTS ACCEL-Instruments o prądzie znamionowym do 400 A



materiał HTS	Bi-2212
prąd znamionowy	13 000 A
dopływ ciepła do IHe	1,5 W przy 13 kA 1,0 W przy 0 A
rezystancja styków	20 nΩ w 4 K 20 nΩ w 50 K
długość	1,5 m
średnica zewnętrzna	120 mm
poziom izolacji	3 500 V

Rys. 1.27. Krioprzepust prądowy HTS dla LHC, CERN
(ACCEL- Instruments)

Krioprzepusty dla prądów rzędu kiloamperów wymagają już zazwyczaj bardzo zaawansowanych rozwiązań konstrukcyjnych dostosowanych do indywidualnych wymagań stawianych przez urządzenie nadprzewodnikowe i jego kriostat. Krioprzepust prądowy HTS dla projektu LHC w CERN przedstawia rys. 1.27. Ten krioprzepust prądowy zaprojektowany został do pracy z prądem znamionowym 13 kA i temperaturą nadprzewodnika do 60 K. Krioprzepust ten, podobnie jak krioprzepust prądowego z rys. 1.26, doprowadza do kriostatu tylko 1/10 ciepła w porównaniu z optymalnie zaprojektowanym krioprzepustem konwencjonalnym.

1.6. ELEKTROMAGNESY NADPRZEWODNIKOWE

Materiały nadprzewodnikowe w postaci przewodów wykorzystywane są do budowy stałoprądowych elektromagnesów wytwarzających silne pola magnetyczne w dużych przestrzeniach roboczych. Elektromagnesy nadprzewodnikowe stosowane są w fizyce cząstek elementarnych do skupiania i odchylenia strumienia cząstek oraz magazynowania cząstek w pierścieniach. Elektromagnesy nadprzewodnikowe pozwalają na magazynowanie energii elektromagnetycznej w SMES-ach. W badaniach nad kontrolowaną syntezą termojądrową do ogniskowania plazmy wykorzystywane jest pole magnetyczne wytwarzane przez elektromagnesy nadprzewodnikowe. Elektromagnesy nadprzewodnikowe wykorzystywane są z powodzeniem w aparaturze NMR i aparaturze MRI. Elektromagnesy nadprzewodnikowe w aparaturach NMR i MRI są obok elektromagnesów nadprzewodnikowych separatorów magnetycznych jednym z pierwszych komercyjnych zastosowań nadprzewodnictwa w dużych urządzeniach.

1.6.1. Konstrukcja uzwojenia nadprzewodnikowego

Odpowiednia konstrukcja uzwojenia elektromagnesu nadprzewodnikowego ma zapewnić możliwość chłodzenia oraz przenoszenia dużych dynamicznych i statycznych sił mechanicznych. Siły dynamiczne powstające na skutek oddziaływania prądów o dużych gęstościach z polem magnetycznym o dużej indukcji mogą być o kilka rzędów wielkości większe niż w uzwojeniach konwencjonalnych. Pomimo że wytrzymałość materiałów uzwojenia wzrasta w temperaturach helowych o ok. 30 %, a wytrzymałość np. Nb-Ti jest wyższa od wytrzymałości miedzi prawie czterokrotnie, siły te stanowią poważne zagrożenie mechaniczne dla uzwojeń i konstrukcji wsporczych. Aby wyeliminować ruchy uzwojeń pod wpływem wielkich sił, zwiększa się ich sztywność przez wzmocnienie obręczami lub "bandażowanie" taśmą usztywniającą, oraz przez impregnację np. żywicą epoksydową.

Siły statyczne powstają w skutek nierównomiernego kurczenia się materiałów uzwojenia podczas jego schładzania od temperatury spoczynkowej (temperatury wykonania – zazwyczaj bliskiej 293 K) do temperatury pracy w zakresie od kilku do kilkudziesięciu kelwinów.

Jeżeli materiały wzmacniające umieszczone są w środku uzwojenia to wartość współczynnika zapelnienia uzwojenia λ_{sc} ulega zmniejszeniu. Gdy elektromagnes zbudowany jest z kilku oddzielnych cewek, których pola magnetyczne oddziałują ze sobą to ze względu na bardzo duże siły przyciągania lub odpychania karkas elektromagnesu musi mieć odpowiednią wytrzymałość mechaniczną. Karkasy są zazwyczaj

wykonywane z materiałów o bardzo dobrej przewodności cieplnej i elektrycznej.

Grubość ścianek karkasu może być znaczna i porównywalna z grubością uzwojenia. Gruby karkas z materiału o dobrej przewodności elektrycznej stanowi zwarty zwój o małej rezystancji. Pole magnetyczne generowane przez prądy indukowane w karkasie przeciwstawia się zmianom pola magnetycznego generowanego przez prąd w uzwojeniu nadprzewodnikowym. Indukowane w karkasie prądy mogą powodować dodatkowe straty ciepłe w kriostacie. W urządzeniach stałoprądowych karkas, stanowiący zwarty zwój, uwidacznia swój wpływ w stanach przejściowych, przeciwstawiając się zmianom strumienia magnetycznego w uzwojeniu. Takie sprzężenie magnetyczne powoduje, że część energii cieplnej, która wydzielana jest w elektromagnesie podczas przejścia uzwojenia ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego, zostaje wytracona w karkasie zmniejszając przyrost temperatury uzwojenia nadprzewodnikowego. W chłodzeniu kontaktowym ścianki karkasu są podstawową drogą transportu ciepła z uzwojenia do głowic kriochłodziarki.

1.7. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 1

- [1] Stankowski J., Czyżak B.: *Nadprzewodnictwo*. WNT, Warszawa, 1999.
- [2] Cyrot M., Pavuna D.: *Wstęp do nadprzewodnictwa. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1996.
- [3] PN-IEC 60050-815:2002 – *Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki – Część 815: Nadprzewodnictwo*.
- [4] PN-EN 61788 - 1 – *Nadprzewodnictwo – Część 1: Pomiar prądu krytycznego. Prąd krytyczny dla prądu stałego nadprzewodników kompozytowych Cu/Nb-Ti*.
- [5] PN-EN 61788 - 2 – *Nadprzewodnictwo – Część 2: Pomiar prądu krytycznego. Prąd krytyczny dla prądu stałego nadprzewodników kompozytowych Nb₃Sn*.
- [6] IEC 61788-3 – *Superconductivity – Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors*.
- [7] Materiały reklamowe EUROPA METALLI spa, 2002.
- [8] Wilson M. N.: *Superconducting magnets*. Clarendon Press, Oxford 1990.
- [9] Kozak S.: *Elektromagnesy nadprzewodnikowe dla separatorów magnetycznych typu OGMS*. PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 206, str. 93-133, 2000.
- [10] Kozak S.: *Modelowanie elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 221, 2005.
- [11] Materiały informacyjne producenta, Nexans, 2003-2004.
- [12] Materiały informacyjne producenta, TRITHOR, 2004.
- [13] Rupich M. W., et al.: *Metalorganic Deposition of YBCO Films for Second-Generation High-Temperature Superconductor Wires*. MRS BULLETIN High-Performance YBCO-Coated Superconductor Wires, vol. 29, no. 8., pp. 572-578, 2004.
- [14] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G.: *Postępy w zastosowaniach nadprzewodników*. Prace Naukowe Instytutu Podstaw

- Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, nr 37, seria: Konferencje nr 12, str. 261-268, 2000.
- [15] Janowski T., Wojtasiewicz G., Malinowski H., Kozak S., Kondratowicz-Kucewicz B.: *Stanowisko do eksperymentalnych badań nadprzewodników*. XXIII-SPETO, str. 171-174, 2000.
- [16] Yuan S.W.K., Kuo D.T., Loc A.S.: *Design and Preliminary Testing of BEI's CryoPulse 1000, the Commercial One Watt Pulse Tube Cooler*. Proc.of the 10th International Cryocooler Conference, pp. 191-196, 1998.
- [17] Kozak S.: *Current leads of superconducting device calculation*, XXII-SPETO 1999, str.133-136, Gliwice - Ustroń 1999.
- [18] Kozak S.: *FLUX2D for current leads of superconducting device calculations*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, ELMECO'97 - Conference Proceedings, pp. 155-160, 1997.
- [19] Materiały informacyjne, Cryomagnetics, 2002.
- [20] Materiały informacyjne producenta, CAN Superconductors, 2002-2004.
- [21] Materiały informacyjne, Furukawa Electric, 2003.
- [22] ACCEL-Instruments: *Selected Reference Projects*. September 2004.

2. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKACH ENERGII

2.1. WPROWADZENIE

Koncepcja gromadzenia energii elektrycznej w polu magnetycznym cewki powstała ponad 100 lat temu, natomiast wykorzystanie materiałów nadprzewodnikowych do tego rodzaju urządzeń zaproponowane zostało w 1960 roku. Pionierskie prace w tej dziedzinie były prowadzone w Uniwersytecie w Wisconsin, który w roku 1970 podjął badania naukowe związane z urządzeniem SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) [3].

W latach siedemdziesiątych promowano energetykę jądrową jako podstawowe źródło energii elektrycznej w przyszłości. Ponieważ regulacja mocy w cyklu dobowym elektrowni jądrowych są bardzo trudne, a wyłączenia praktycznie niemożliwe więc istnienie zasobnika energii takiego jak SMES potrafiącego wyrównywać dobowy poziom obciążenia stacji generującej prąd było bardzo potrzebne. Zastosowanie zasobnika mogło ograniczyć wykorzystanie tradycyjnych generatorów energii opartych na spalaniu ropy lub węgla [3].

Pierwsze SMES-y miały gromadzić energię elektryczną co najmniej rzędu 5000 MWh. Idea ta byłaby realizowana poprzez budowę solenoidalnych cewek o średnicy 1 kilometra umieszczanych pod powierzchnią ziemi. Cewki te miały mieć rozmiary większe niż jakiegokolwiek urządzenia nadprzewodnikowe budowane i projektowane w tym czasie [1],[2]. W 1976 roku Narodowe Laboratorium Stanów Zjednoczonych w Los Alamos (Los Alamos National Laboratory – LANL) rozpoczęło współpracę badawczą z Uniwersytetem w Wisconsin nad nadprzewodnikowym zasobnikiem energii o energii 30 MJ. Opracowany system zapewnił stabilność pracy dyspozytorni mocy w Bonneville (Bonneville Power Authority – BPA) zarządzającej strategiczną linią energetyczną zwaną Pacific Intertie. Na przykładzie dyspozytorni mocy w Bonneville zademonstrowano wykonalność koncepcji użytecznego zastosowania zasobników energii. W roku 1980 zakłady przemysłowe zauważyły korzyści płynące z zastosowania urządzeń SMES i aktywnie włączyły się do działań prowadzących do ulepszania tych urządzeń. Jedną z nich była grupa Bechtel, która nawiązała współpracę z Instytutem Electric Power Research Institute (EPRI) oraz National Laboratory w Los Alamos (LANL).

W roku 1987 Departament Obrony Stanów Zjednoczonych zdecydował o rozpoczęciu prac nad SMES-em o energii 20 MWh. System ten miał pracować jako urządzenie zasilające w laserze nad którym prowadzono badania.

Obecnie SMES-y postrzegane są głównie jako urządzenia wspomagające sterowanie przemysłowymi układami energetycznymi. Niezawodność i wysoka jakość dostarczanej energii ma istotne znaczenie dla przemysłu. Nadprzewodnikowe zasobniki energii mogą ją zapewnić. Opracowane i realizowane w ostatnich latach projekty przemysłowych zastosowań SMES-ów obejmują trzy grupy: układy μ SMES o energiach rzędu MJ wchodzących częściowo w fazę komercjalizacji, układy o energiach rzędu GJ (lub MWh), będące jeszcze w fazie studiów projektowych i konstrukcyjnych, a także zasobniki wysokotemperaturowe o niewielkich energiach w zakresie kilodżuli, których technologia wymaga jeszcze intensywnych badań. W tab. 2.1 przedstawione zostały parametry wybranych SMES-ów z elektromagnesami LTS i HTS.

Tab. 2.1. Parametry wybranych SMES-ów opracowanych na świecie

kraj	organizacja	typ	specyfikacja
Finlandia	Uniwersytet w Tampere	HTS μ SMES	160 A/ 200 V, 5 kJ
Niemcy	EUS GmbH	HTS μ SMES	100 A/ 200 V, 8 kJ
Niemcy	ACCEL	LTS μ SMES	1 kA/ 400 V, 2 MJ
Niemcy	FZK Research Center	LTS μ SMES	2,5 kA/ 6 kV, 0,22 MJ
Niemcy	TU Munich	LTS μ SMES	1380 A/ 3 kV, 1 MJ
Włochy	CESI	LTS μ SMES	1 MVA, 4 MJ
USA	FSU – CAPS	LTS SMES	4 kA/ 24 kV, 100 MJ
Japonia	JAERI	LTS SMES	3 kA/ 32,6 kV, 71,1 MJ
Japonia	KEPCo	HTS μ SMES	600 A, 4 kJ
Korea	KEMCo	LTS μ SMES	0,9 kA, 1 MJ

Na rys. 2.1 przedstawiony został SMES z elektromagnesem LTS umieszczonym w kriostacie helowym. Materiałem zastosowanym

do wykonania elektromagnesu był nadprzewodnik Nb-Ti, a czynnikiem chłodzącym ciekły hel. SMES spełnia rolę systemu zasilania awaryjnego. Średni pobór mocy jest rzędu 200 kW w czasie nie przekraczającym 8 s. W tab. 2.2 podane są parametry techniczno – eksploatacyjne układu:



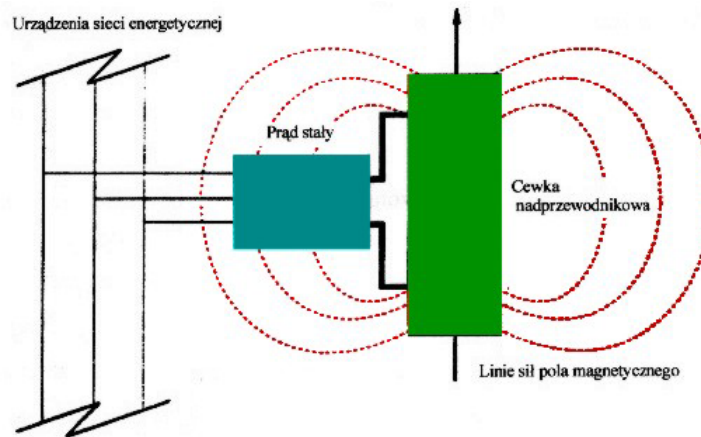
Rys. 2.1. 2 MJ SMES firmy ACCEL [14]

Tab. 2.2. Parametry układu SMES 2MJ firmy Accel [14]

parametr	wartości
prąd	$I_{smes} = 100 \text{ A}$
gromadzona energia	2,1 MJ
średnia moc	200 kW
maks. moc	800 kW
czas	>8 s
napięcie stałe	800 V
pole magnetyczne	4,5 T
indukcja	4,1 H
średnica elektromagnesu	760 mm
wysokość	600 mm

Działanie SMES-a polega na gromadzeniu energii elektrycznej prądu stałego w elektromagnesie nadprzewodnikowym w postaci energii

pola magnetycznego, rys. 2.2. Prąd w uzwojeniu nadprzewodnikowym, chłodzonym, w zależności od typu nadprzewodnika, ciekłym helem lub azotem, płynie praktycznie bezoporowo i bez strat. Dzięki temu możliwe jest osiągnięcie znacznych gęstości prądu w cienkim drucie nadprzewodnikowym lub taśmie HTS, a w ściśle nawiniętym uzwojeniu, gęstości energii pola magnetycznego osiąga 10^6 J/m^3 . Wartość ta jest ponad rząd wielkości większa, niż dla pola elektrostatycznego. W niewielkich objętościach cewek nadprzewodnikowych można zatem gromadzić duże energie. Mimo, iż zasobniki nadprzewodnikowe charakteryzują się mniejszą gęstością energii w stosunku do konwencjonalnego akumulatora kwasowo-ołowiowego, jednak zaletą ich jest bardzo duża gęstość mocy, którą można pobrać lub oddać bardzo szybko. Ponadto charakteryzują się wysoką sprawnością, wynikającą z naturalnej przemiany energii pola magnetycznego na energię elektryczną oraz praktycznie nieograniczonym czasem przechowywania energii pola magnetycznego uwarunkowanym jedynie działaniem układu chłodzenia.



Rys. 2.2. Idea działania SMES-a

Energia zmagazynowana w polu magnetycznym elektromagnesu nadprzewodnikowego jest tym większa im większa jest objętość obszaru z silnym polem magnetycznym:

$$(2-1) \quad E = \frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV$$

gdzie H – oznacza natężenie pola magnetycznego (A/m),
 μ – przenikalność magnetyczną (H/m), V – objętość,
 E – energię (J).

Elektromagnesy nadprzewodnikowe pozwalają na wytwarzanie silnego pola magnetycznego w dużych przestrzeniach więc zgodnie z równaniem (2-1) umożliwiają gromadzenie znacznej energii w ich polu magnetycznym. Energię zmagazynowaną w polu magnetycznym elektromagnesu można wyrazić również równaniem:

$$(2 - 2) \quad E = \frac{1}{2} L I^2$$

gdzie L – oznacza indukcyjność elektromagnesu (H),
 I – prąd w elektromagnesie (A), E – energię (J).

W uzwojeniu nadprzewodnikowym prąd płynie bez strat¹, więc zmagazynowana energia nie jest rozpraszana i może być przechowywana dowolnie długo, gdy elektromagnes znajduje się w stanie nadprzewodzącym [1].

Zmagazynowana energia w polu magnetycznym elektromagnesów nadprzewodnikowych może znaleźć, w zależności odżądanego czasu przekazywania, następujące zastosowania:

- przy czasie rzędu mikrosekund, w obciążeniach rezystancyjnych takich jak lampy flesztowe i lasery,
- przy czasach rzędu milisekund, w obciążeniach indukcyjnych np. przy ograniczeniu plazmy w reaktorach syntezy termojądrowej,
- przy czasach rzędu sekund, do ograniczania krótkotrwałych dużych poborów energii w systemie elektroenergetycznym,
- przy czasach rzędu godzin, do wyrównywania szczytów lub zmian obciążeń w systemie elektroenergetycznym.

Tablica 2.3 przedstawia energię SMES-ów i ich czas rozładowania w zależności od zastosowania.

W rzeczywistych rozwiązaniach SMES jest urządzeniem współpracującym z siecią energetyczną gdzie napięcie ma charakter przemienny. Ponieważ elektromagnes nadprzewodnikowy gromadzi energię prądu stałego, wymagane są układy konwersji napięcia zwane systemem formowania napięcia (PCS). Przeważnie składa się on z typowego falownika przetwarzającego prąd stały na napięcie sieci energetycznej przy procesie oddawania energii z cewki i typowego prostownika gdy wymagane jest naenergetyzowanie cewki.

¹ poza stratami w układzie chłodzenia wydatkowanymi na utrzymanie stanu nadprzewodzącego w elektromagnesie

Tab. 2.3. Potencjalne zastosowania SMES-ów

zastosowanie	energia	czas rozładowania
wyrównywanie szczytów	50 MJ – 180 GJ	minuty – godziny
poprawa jakości energii	0,1 MJ – 10 MJ	sekundy
lokalne źródło mocy	0,1 MJ – 10 MJ	dziesiątki mikrosekund
współpraca ze źródłami małej mocy i innymi źródłami energii współpraca z rozproszonymi źródłami energii współpraca z systemami fotowoltaicznymi i akumulatorowymi	5 – 50 kJ	sekundy

Podstawowym elementem układu nadprzewodnikowego zasobnika energii jest stałoprądowy elektromagnes nadprzewodnikowy, który jest utrzymywany w temperaturze kriogenicznej zapewnianej przez układ chłodzenia. Ten ostatni układ chłodzi również krioprzepusty prądowe, stanowiące zarówno elektryczne jak i termiczne połączenie elektromagnesu nadprzewodnikowego z układem PCS. Układ PCS (np. przekształtnik AC/DC) łączy elektrycznie sieć energetyczną z zasobnikiem energii jak też z wrażliwym odbiornikiem.

Wymienione układy będące głównymi składnikami układu nadprzewodnikowego zasobnika energii stanowią o kosztach wytwarzania i eksploatacji całego urządzenia.

Aby zasobniki nadprzewodnikowe były konkurencyjne w stosunku do innych układów gromadzenia energii, należy zoptymalizować pod względem kosztów elektromagnes nadprzewodnikowy wraz z krioprzepustami prądowymi i układem kriogenicznym.

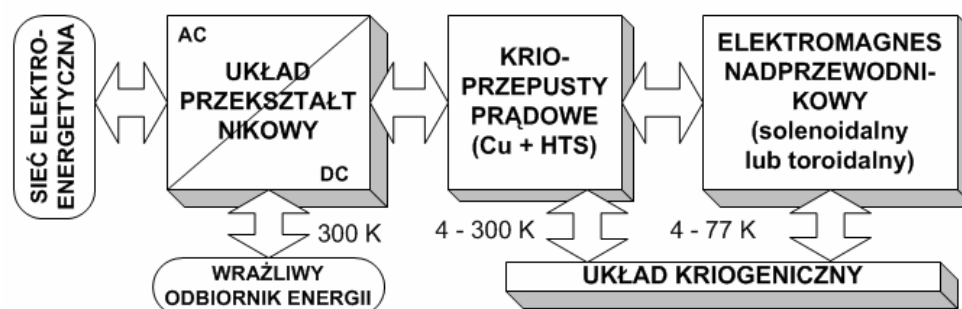
Głównym obszarem zastosowań SMES-ów jest obecnie zabezpieczenie przed nieplanowanymi przerwami w dostawie energii, zapewnienie jakości dostarczanej energii poprzez łagodzenie efektów chwilowych zaników energii i obniżeń napięcia, a także do wyrównywania obciążeń mocy odbiorników energii pracujących w sposób impulsowy lub przerywany, np. kuźni, tartaków czy elektrycznych pieców łukowych.

SMES-y mogą pracować w układach awaryjnego zasilania UPS (*Uninterruptible Power Supply*), kompensacji mocy, filtrów aktywnych, modulacji mocy, sterowania i stabilizacji napięcia w sieciach energetycznych.

Rosnące wykorzystanie automatycznego sterowania procesami produkcyjnymi prowadzi do wzrastającej liczby odbiorców, którzy wymagają wysokiej jakości pobieranej energii. Obniżenia napięcia lub przerwy w dostawie energii trwające do 3 s stanowią 80-90% wszystkich awarii energetycznych. Mogą one być wyeliminowane poprzez użycie układów awaryjnego zasilania opartych na technologii SMES.

2.2. PODSTAWOWE SKŁADNIKI UKŁADU NADPRZEWODNIKOWEGO ZASOBNIKA ENERGII

Podstawowym elementem układu nadprzewodnikowego zasobnika energii jest stałoprądowy elektromagnes nadprzewodnikowy utrzymywany w niskiej temperaturze zapewnianej przez układ kriogeniczny, który chłodzi również krioprzepusty prądowe, stanowiące elektryczne i termiczne połączenie elektromagnesu nadprzewodnikowego z układem przekształtnikowym. Przekształtnik AC/DC łączy elektrycznie sieć energetyczną z zasobnikiem energii i wrażliwym odbiornikiem (rys. 2.3).



Rys. 2.3. Schemat układu nadprzewodnikowego zasobnika energii współpracującego z siecią elektroenergetyczną [13]

Wymienione składniki układu nadprzewodnikowego zasobnika energii stanowią o kosztach wytwarzania i eksploatacji całego urządzenia. Technologia tych układów nie jest jeszcze wystarczająco znana i dopracowana w porównaniu z technologią układów przekształtnikowych.

2.2.1. Elektromagnes nadprzewodnikowy

Elektromagnes pełniący funkcję zasobnika energii może być pojedynczą cewką lub układem cewek nadprzewodnikowych. Mogą one mieć konstrukcje solenoidalne lub toroidalne. Zaletą solenoidu jest większa pojemność energii na jednostkę długości przewodu niż w toroidzie i znacznie prostsza i tańsza konstrukcja. Z kolei zaletą toroidu jest ograniczenie pola magnetycznego wyłącznie do otworu o kształcie toroidu, dzięki czemu nie występują problemy z niekorzystnym oddziaływaniem strumienia rozproszenia na otaczające środowisko.

Konstrukcja elektromagnesu powinna uwzględniać siły mechaniczne oddziałujące na przewód z prądem znajdujący się w polu magnetycznym uzwojenia. W solenoidzie elektrodynamiczne siły promieniowe rozciągają uzwojenie, a osiowe ściskają je. W układach cewek lub toroidach na poszczególne cewki składowe działają znaczne siły, które muszą być zrównoważone odpowiednimi elementami konstrukcyjnymi. Rozkład tych sił zależy od geometrii i konfiguracji uzwojeń. W konfiguracji toroidalnej siła dośrodkowa ściska toroid dążąc do zmniejszenia jego średnicy.

2.2.2. Układ kriogeniczny SMES-a

Układ chłodzenia elektromagnesu HTS magnetycznego zasobnika energii w zasadzie nie różni się znacznie od opisanych w rozdziale 1.4 sposobów chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych. Ze względu na duże wartości indukcji stosowanych w elektromagnesach zasobników energii oraz koniecznych dużych gęstości prądu, elektromagnesy HTS pracują przy temperaturach znacznie niższych od temperatury ciekłego azotu (20 – 40 K). Temperatury takie mogą zapewnić chłodziarki kontaktowe Typu Gifforda-McMahona dla małych jednostek SMES, bądź typu Collins'a przy jednostkach większych. Izolacje termiczną rzędu 10^{-5} Pa zapewniają pompy próżniowe. W elektromagnesach dużych SMES-ów uzwojenia wykonuje się z nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS), a do chłodzenia stosuje się ciekły (4,2 K) lub nadciekły (2,1 K) hel. Do chłodzenia elektromagnesów nadprzewodnikowych HTS stosuje się również chłodzenie w kąpieli ciekłego azotu ze wspomaganiami opisane w rozdziale 1.4.4.

Elektromagnes SMES-a zbudowanego w ramach projektu KBN nr. 4 T10A 004 25 jest chłodzony chłodziarką kontaktową w kriostacie próżniowym w zakresie temperatur 300 ± 20 K.

2.2.3. Przepusty prądowe SMES-a

Przepusty prądowe łączą elektrycznie nadprzewodnikowe uzwojenie elektromagnesu w zimnym wnętrzu kriostatu z zewnętrznym układem elektrycznym w temperaturze umownie nazywanej pokojową (293 K) i stanowią integralną część każdego nadprzewodnikowego urządzenia elektrycznego. Krioprzepusty prądowe zostały szczegółowo opisane w rozdziale 1.5. Obecnie powszechnie stosuje się przepusty wykonane z nadprzewodników wysokotemperaturowych i metali, co pozwala wielokrotnie zmniejszyć generowanie i doprowadzanie ciepła w kriostacie w stosunku do ilości ciepła wprowadzanego przez przepusty metalowe, najczęściej miedziane. W elektromagnesach SMES-ów dla zminimalizowania ilości ciepła w kriostacie elektromagnesu stosuje się tzw. zworę nadprzewodnikową. Umieszczona w kriostacie zwora jest wykonana z nadprzewodnika stabilizowanego stopem miedziowo – niklowym dzięki czemu po utracie nadprzewodnictwa ma ona dużą rezystancję, co oznacza otwarcie obwodu i elektromagnes może być ładowany lub rozładowywany. Schłodzenie zwory do temperatury krytycznej umożliwia jej przejście do stanu nadprzewodnictwa i wtedy prąd płynie w obwodzie uzwojenia zwory. Po naładowaniu zasobnika prąd nie płynie przez „ciepłe”, nienadprzewodzące części przepustów prądowych i nie generuje strat energii we wnętrzu kriostatu w czasie „wyczekiwania”, tj. podczas stanu gotowości do oddania energii do sieci lub wrażliwego na przerwy dostawy energii odbiornika. Zastosowanie zwory nadprzewodnikowej zmniejsza straty energii elektrycznej w SMES-ie i obniża koszty związane z chłodzeniem elektromagnesu.

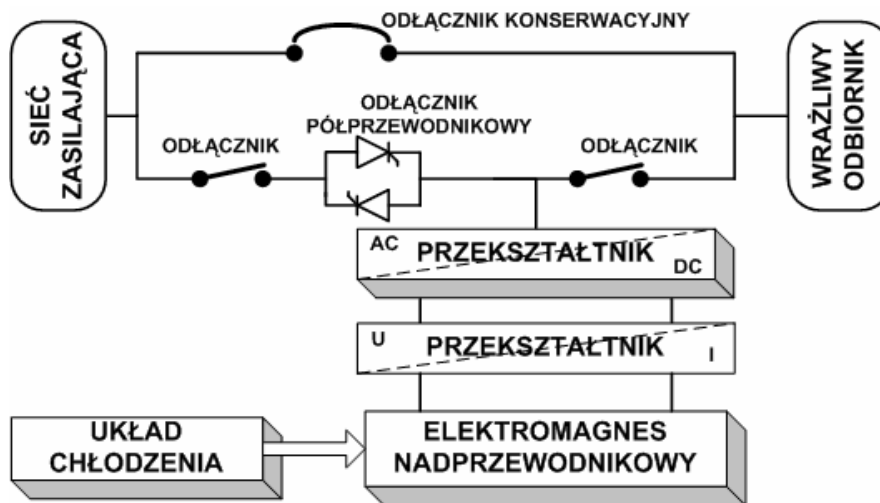
2.2.4. Układ przekształtnikowy SMES-a

Podstawowy element zasobnika energii, jakim jest elektromagnes nadprzewodnikowy, może być w zależności od zastosowań, dołączony do sieci i wrażliwego odbiornika na różne sposoby w celu zwiększenia skuteczności jego ochrony. Wymagania dla elektromagnesu zasadniczo nie zależą od konfiguracji, natomiast pośredniczący układ przekształtnikowy jest inny dla każdego typu zastosowań [16].

Układ równoległy

W konfiguracji równoległej (rys. 2.4) wrażliwy odbiornik prądu przemiennego chroniony jest przed obniżeniami napięcia i przerwami zasilania poprzez odłączenie od sieci podczas zakłócenia i zasilenie

odbiornika energią zgromadzoną w zasobniku nadprzewodnikowym. Układ ten może chronić praktycznie każdy typ wrażliwego odbiornika lub procesu przemysłowego. Odbiornik jest początkowo zasilany ze źródła sieciowego poprzez zwykle zamknięte mechaniczne odłączniki znajdujące się po obu stronach odłącznika półprzewodnikowego. Gdy nastąpi obniżenie lub zanik napięcia w sieci, odłącznik półprzewodnikowy otwiera się, izolując odbiornik od zakłóconego napięcia źródła sieciowego. Zasobnik nadprzewodnikowy natychmiast zaczyna rozładowywać się poprzez falownik. Tym samym obciążenie odbiornika zostaje bez przełączenia przeniesione ze źródła sieciowego do układu zasobnika energii. Jeśli wymagane napięcie sieci zasilającej zostanie przywrócone, następuje synchronizacja układu zasobnika z siecią i odłącznik półprzewodnikowy przenosi obciążenie z powrotem do źródła sieciowego. Zasobnik jest następnie doładowywany energią do pełnej pojemności i jest gotowy do następnych cykli ochrony wrażliwego odbiornika.

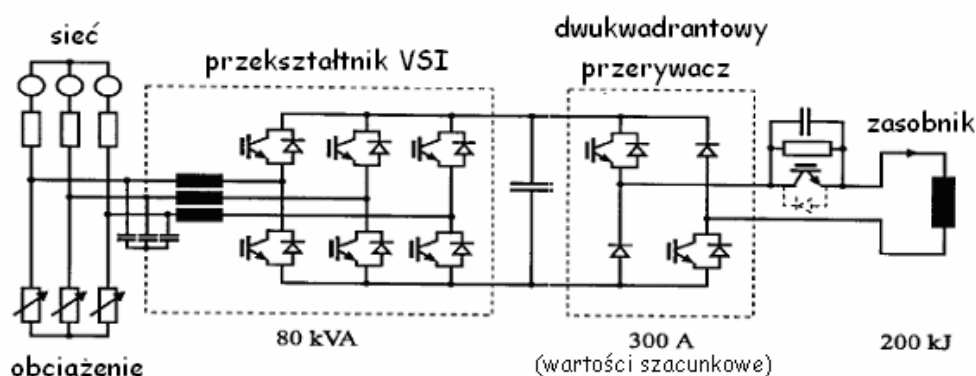


Rys. 2.4. Nadprzewodnikowy zasobnik energii przyłączony równoległe do sieci [13]

Połączenie równoległe stosowane jest między innymi w układach zasilania awaryjnego (UPS - Uninterruptible Power Supply) [4]. Rysunek 2.5 przedstawia przykładowy schemat zasobnika nadprzewodnikowego przyłączonego równoległe do sieci.

Przy wykryciu w sieci jakiegokolwiek zakłócenia odpowiedź nadprzewodnikowego zasobnika energii jest niemal natychmiastowa (mniej niż 4 ms). Wrażliwy odbiornik jest izolowany od sieci odłącznikiem

półprzewodnikowym, a zasobnik rozładowuje się przez falownik przejmując rolę zasilania podczas awarii sieci elektroenergetycznej. Rozładowywanie zasobnika trwa, w zależności od potrzeb, milisekundy, minuty lub nawet godziny. Po powrocie napięcia w sieci zasilającej odłącznik półprzewodnikowy otwiera się i odbiornik ponownie zasilany jest z sieci, a zasobnik nadprzewodnikowy zostaje ponownie naładowany i gotowy do następnego użycia.



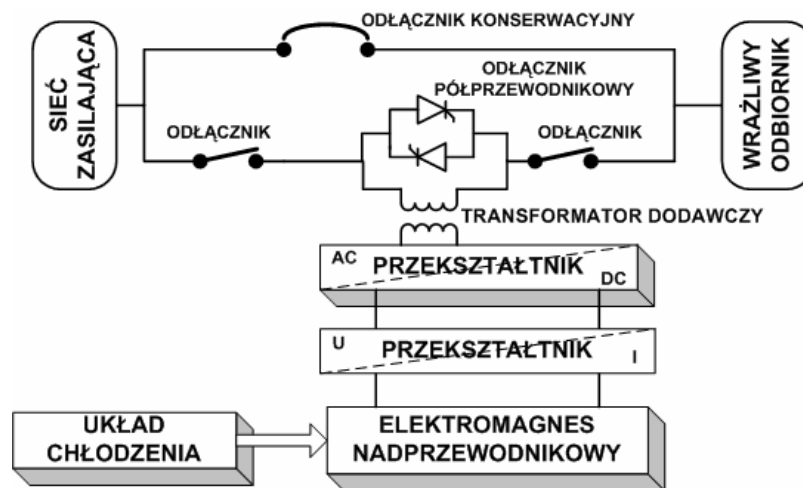
Rys. 2.5. Zasobnik nadprzewodnikowy przyłączony równolegle do sieci [15]

Układ szeregowy

W konfiguracji szeregowej (rys. 2.6) wrażliwy odbiornik prądu przemiennego chroniony jest przed obniżeniami napięcia, które jest kompensowane zwiększonym napięciem przez transformator dodawczy zasilany z zasobnika nadprzewodnikowego. Ponieważ w przeciwieństwie do układu równoległego, w układzie szeregowym zasobnik nie wspomaga pełnego obciążenia, ta sama ilość energii może zasilać albo większe obciążenie w ciągu danego czasu albo dane obciążenie w ciągu dłuższego czasu. Odbiornik jest podczas normalnej pracy zasilany ze źródła sieciowego poprzez odłącznik półprzewodnikowy bocznikujący transformator dodawczy. Gdy wykryte zostanie obniżenie napięcia w sieci, odłącznik półprzewodnikowy otwiera się i prąd odbiornika płynie przez transformator dodawczy. Falownik dostarcza do transformatora energię wystarczającą, aby utrzymać wymagany poziom napięcia na odbiorniku. Odłącznik zamyka się, gdy przywrócone zostaje napięcie znamionowe. Następnie zasobnik nadprzewodnikowy jest doładowywany i oczekuje na następne zadziałanie.

Połączenie szeregowe nadprzewodnikowego zasobnika energii z siecią elektroenergetyczną i odbiornikiem stosuje się w układach

statycznych kompensatorów szeregowych. W konfiguracji tej układ przekształtnikowy zasobnika (falownik napięcia) podłącza się do sieci elektroenergetycznej za pomocą transformatorów dodawczych. Dzięki temu uzyskujemy sterowalne źródło napięcia, które może wspomagać źródło zasilania, dodając do napięcia sieci żądaną wartość napięcia pobieraną z zasobnika. Zależnie od typu sterowania, możliwe jest użycie dodatkowego źródła napięcia, co pozwala na korekcję niezrównoważenia napięć sieciowych, regulację napięcia obciążenia, kompensację obniżeń napięcia i harmonicznych niższego rzędu.



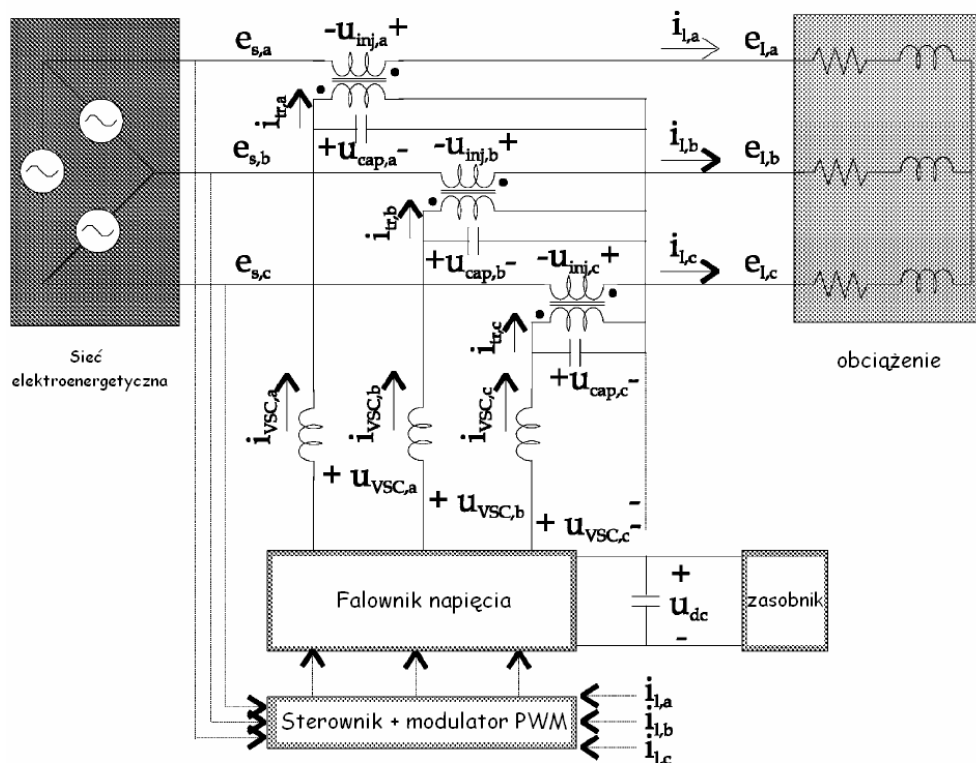
Rys. 2.6. Nadprzewodnikowy zasobnik energii włączony szeregowo do sieci [13]

Instalowanie dużych zasobników jest kosztowne, jednakże bardzo atrakcyjne dla dużych odbiorców przemysłowych, gdyż pozwala to na ochronę całego zakładu przemysłowego poprzez zainstalowanie tylko jednego urządzenia. Niestety układ szeregowy ma podstawowe ograniczenie, wynikające ze sposobu podłączenia do sieci - nie chroni odbiorników przed całkowitym zanikiem napięcia. Ponadto wrażliwe odbiorniki, znajdujące się w chronionym zakładzie przemysłowym, nie będą chronione przed obniżeniami napięć powstałymi w tym zakładzie. Przykładowy schemat układu szeregowego zamieszczono na rys. 2.7.

Przekształtnik DC/AC generuje odpowiednie napięcie, które następnie zostaje dodane do napięcia sieci elektroenergetycznej w celu kompensacji. Ponieważ współpracuje on z siecią trójfazową, każda faza musi być chroniona niezależnie. Wartość napięcia, jaką może wytworzyć falownik, jest jednocześnie maksymalną wartością napięcia, która może

być dodana i skompensowana. Istniejące urządzenia mogą kompensować zwykle do 50% napięcia sieci.

Do wyeliminowania wysokoczęstotliwościowych składowych harmonicznnych otrzymywanych w napięciu wyjściowym przekształtnika DC/AC, pomiędzy falownik a transformator instaluje się filtr LC drugiego rodzaju. Możliwe jest też stosowanie kondensatora po wtórnej stronie transformatora dodatkowego, jednak to rozwiązanie zmusza do użycia większego kondensatora i transformatora.

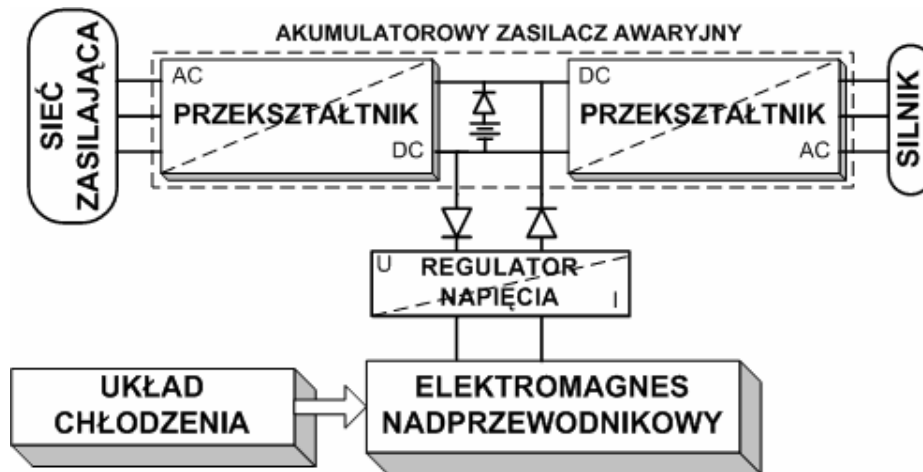


Rys. 2.7. Schemat kompensatora szeregowego łagodzącego skutki obniżenia napięcia [16]

Układ hybrydowy z akumulatorem awaryjnym

W konfiguracji z akumulatorem (rys. 2.8) zasobnik nadprzewodnikowy dostarcza energię do odbiornika podczas krótkotrwałych zakłóceń, natomiast akumulator awaryjny pracuje jedynie podczas długotrwałych przestoju. Mała liczba cykli pracy i mniejsza

głębokość rozładowywania energii z akumulatorów znacznie zwiększa ich żywotność. Układ zasobnika jest zintegrowany z konwencjonalnym akumulatorowym układem podtrzymania napięcia UPS.



Rys. 2.8. Nadprzewodnikowy zasobnik energii w układzie hybrydowym z akumulatorowym źródłem zasilającym UPS [13]

Regulator napięcia zasobnika monitoruje obwód stałoprądowy układu UPS i dostarcza energię z zasobnika, gdy napięcie w tym obwodzie obniży się z powodu zakłócenia w sieci zasilającej prostownik. Jeśli zakłócenie przedłuży się i wyczerpuje się energia zgromadzona w zasobniku, energia stopniowo zaczyna być dostarczana do falownika z akumulatora. Konfiguracja ta pozwala wspomagać obciążenie całkowicie podczas krótkich zakłóceń oraz spowalniać czas wzrostu wyładowania akumulatora dla długotrwałych zakłóceń. Układ hybrydowy zasobnika znacznie polepsza działanie akumulatora, gdyż głębokie krótkotrwałe rozładowania obniżałyby żywotność samego akumulatora.

2.3. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 2

- [1] Luongo C.A., *Superconducting storage systems: an overview*, *IEEE Trans. Magn.*, 32 (1996) n.4, 2214-2223.
- [2] Mikkonen R., *Highlights of SC Power Applications in Europe*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 12 (2002) n.1, 782-787.
- [3] Ter-Gazarian A., *Energy Storage for Power Systems*, Peter peregrinus Ltd. – Inst. of Electrical Eng., (1994), 154-171.
- [4] Surdacki P., *Superconducting Magnetic Energy Storages*, Proc. of the 3rd Int. Conf. "Electromagn. Dev. and Proc. in Env. Protection ELMECO", Nałęczów, 4-6 June (2000), 200-205.
- [5] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G., *Postępy w zastosowaniach nadprzewodników*, Prace Nauk. IPEiE Polit. Wrocławskiej nr 37, Konferencje nr 12, (2000), 261-268.
- [6] Peck S.D., Zeigler J.C., *Power Quality*, Wiley Encycl. of Electr. Eng. and Electronics Eng., (1999).
- [7] Czerwiński D., Janowski T., Surdacki P., *Wybrane zagadnienia projektowe krioprzepustów prądowych urządzeń nadprzewodnikowych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 73 (1997), n.3, 74-77.
- [8] Janowski T., Surdacki P., *Stan zastosowań silnoproudowych urządzeń nadprzewodnikowych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2002) 5s, 168-176.
- [9] Machowski J., *Elastyczne systemy przesyłowe – FACTS*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2002) 7, 189-196.
- [10] American Superconductor, <http://www.amsuper.com/>
- [11] Juengst K.P., Salbert H., Simon O., *SMES compensator for fluctuating loads*, 15th Int. Conf. on Magnet Technology MT-15, Beijing, China, Proc. Science Press Beijing, (1998) 494-497.
- [12] Juengst K.P., *Status and future planning of SMES projects in Europe*, *ISTEC Journal*, 12, (3) (1999) 29-35.
- [13] Surdacki P., *Nadprzewodnikowe zasobniki energii - postępy technologii i zastosowań*, *Przegląd Elektrotechniczny*, Rok LXXIX, Nr 9, 2003, str. 605-611.

-
- [14] ACCEL-Instruments: Selected Reference Projects. September 2004.
- [15] Juengst K. P., Kaugerts J., *SMES compensator for fluctuating loads*, 15th Int. Conf. Magnet Technology, October 20-24, 1997, Beijing, China, Proceedings Science Beijing (1998), pp. 494-497.
- [16] Sannino A., Svensson J., Larsson T., *Power-electronic solutions to power quality problems*, Electric power systems research, no. 66, 2003, pp. 71-82.

3. PROJEKT I BUDOWA ELEKTROMAGNESU NADPRZEWODNIKOWEGO ZASOBNIKA ENERGII

3.1. SFORMUŁOWANIE ZAŁOŻEŃ DO PROJEKTU NADPRZEWODNIKOWEGO ELEKTROMAGNESU ZASOBNIKA ENERGII

3.1.1. Model numeryczny elektromagnesu HTS

Model numeryczny elektromagnesu HTS został opracowany dla maksymalnych parametrów uzwojenia w stanie nadprzewodzącym, tj. dla wartości krytycznych prądu i indukcji w temperaturze znacznie mniejszej od krytycznej.

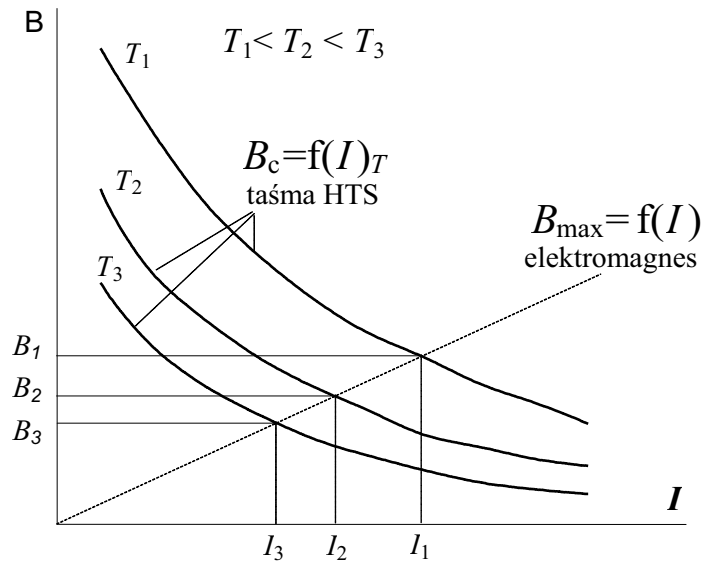
Założono, że układ chłodzenia zapewnia określoną temperaturę (35 K lub 50 K) uzwojenia nadprzewodnikowego a model numeryczny elektromagnesu HTS SMES-a dotyczy zjawisk magnetostatycznych. Elektromagnes SMES-a ma geometrię osiowosymetryczną, więc do opracowania jego modelu numerycznego można wykorzystać moduł magnetostatyczny MS (magnetostatics) programu polowego FLUX2D. W module MS zmienną podstawową jest potencjał wektorowy a rozwiązywanym równaniem jest:

$$(3-1) \quad \text{rot}((1/\mu) \cdot \text{rot}(\vec{A})) = \vec{J} - \text{rot}(\vec{H}_{ko})$$

gdzie: A – oznacza potencjał wektorowy (Wb/m),
 J – gęstość prądu (A/m^2),
 μ – przenikalność magnetyczna (H/m),
 H_{ko} – natężenie pola koercji magnesu trwałego (A/m).

Model opracowano w celu obliczenia optymalnej, ze względu na zmagazynowaną energię, konfiguracji uzwojenia elektromagnesu HTS. Uzwojenie elektromagnesu SMES-a wykonane jest w postaci cewek krążkowych z taśmy Bi-2223/Ag laminowanej stałą. Geometria modelu numerycznego zmieniana była podczas poszukiwania optymalnej konfiguracji: liczby cewek krążkowych. W modelu numerycznym zastosowano uproszczenie pozwalające na ominięcie ograniczeń programu FLUX2D i uwzględnienie w obliczeniach zależności parametrów przewodu nadprzewodnikowego od: temperatury, prądu i natężenia pola magnetycznego. Zamiast rozbudowywania modelu numerycznego w programie FLUX2D skorzystano z faktu, że natężenie pola magnetycznego w elektromagnesie zależy liniowo od prądu [1].

Model numeryczny posłużył do wyznaczenia charakterystyki $B_{\max} = f(I)$ elektromagnesu HTS, a obliczenia maksymalnego prądu i energii zgmagazynowanej w elektromagnesie w zależności od temperatury pracy uzwojenia dokonano przy wykorzystaniu zewnętrznych programów autorskich. Na rys. 3.1 przedstawiona jest metoda wyznaczenia maksymalnego prądu w elektromagnesie na podstawie charakterystyki $B_{\max} = f(I)$ elektromagnesu HTS, wyznaczonej w modelu numerycznym, oraz charakterystyk krytycznych taśmy HTS – $B_c = f(I)_T$.



Rys. 3.1. Metoda wyznaczenia maksymalnego prądu w uzwojeniu elektromagnesu HTS [1]

3.1.2. Wybór konfiguracji uzwojeń elektromagnesu HTS dla SMES-a


W tab. 3.1 przedstawione zostały wyniki obliczeń konfiguracji elektromagnesu HTS dla SMES-a przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu numerycznego. Wyniki obliczeń były podstawą podjęcia decyzji o liczbie cewek krążkowych, a w konsekwencji o liczbie odcinków taśmy nadprzewodnikowej dostarczonej przez producenta. Założono, że każdy krążek będzie wykonany z jednego odcinka taśmy bez łączeń. Prąd krytyczny i energia elektromagnesu w temperaturze 50 K i 35 K zostały obliczone na podstawie charakterystyk elektromagnesu oraz charakterystyk krytycznych taśmy HTS według metody przedstawionej na rys. 3.1.

Tab. 3.1. Parametry elektromagnesów dla SMES-a

liczba krążków	l. zw. krążka	a_1	$2b$	L	I_c (35 K)	E (35 K)	I_c (50 K)	E (50 K)
-	-	mm	mm	H	A	J	A	J
$a_2 = 180$ mm								
6	297	87,9	40,2	0,78	123	5908	62	1491
6	297	87,9	25,2	0,86	117	5849	58	1446
8	200	118,0	53,6	0,81	128	6631	65	1702
8	200	118,0	33,6	0,91	121	6643	61	1667
10	152	132,9	67,0	0,80	131	6871	67	1782
10	152	132,9	42,0	0,91	123	6835	62	1724
12	123	141,9	80,4	0,78	132	6813	67	1774
12	123	141,9	50,4	0,90	125	7081	63	1803
14	104	147,8	93,8	0,76	139	7359	72	1961
14	104	147,8	58,8	0,89	128	7292	65	1872
15	96	150,2	100,5	0,75	140	7331	72	1962
15	96	150,2	63,0	0,88	129	7360	66	1898
16	89	152,4	107,2	0,73	142	7305	74	1966
18	79	155,5	120,6	0,71	143	7298	74	1974
$a_2 = 160$ mm								
12	144	115,4	80,4	0,81	128	6642	65	1708
16	103	128,1	107,2	0,76	136	7038	70	1859
18	90	132,1	120,6	0,73	139	7050	72	1880

gdzie a_1 i a_2 – oznaczają promień wewnętrzny i zewnętrzny elektromagnesu,
 $2b$ – wysokość elektromagnesu,
 E – energię,
 I_c – prąd krytyczny,
 L – indukcyjność

Na rys. 3.2 pokazany jest certyfikat dla taśmy z jednej z 15 szpul taśmy zakupionej do wykonania elektromagnesu dla SMES-a. Minimalny prąd krytyczny każdego 100-metrowego kawałka taśmy zmienia się w przedziale od, gwarantowanej dla tej taśmy, wartości 115 A do 128 A. Charakterystyki krytyczne taśmy $B_c=f(I)_T$ zostały wyznaczone na podstawie danych zawartych w certyfikatach taśmy (rys. 3.2) oraz charakterystyk nadprzewodnika Bi-2223 – $B_c=f(J)_T$ podawanych przez producenta (rys. 1.7, rys. 1.8).



CERTIFICATE OF ANALYSIS

HTS HIGH STRENGTH WIRE

Date Certified	AMSC Wire Number	Minimum length(m)
6/25/2004	SW-427	100

CERTIFICATION TABLE - HTS HIGH STRENGTH WIRE		
Wire Property	Specification	Measured Value
Average Thickness	0.29 - 0.33mm	0.300
Min. Width	4.0 mm	4.1
Max. Width	4.4mm	4.4
Minimum 10m I _c	115A (77K self field, 1μV/cm)	128
Bend Test	95% I _c Retention for 70mm Diam*	99%
Min. Critical Tensile Stress	265MPa at 95% I _c Retention (77K)*	350
Min. Critical Tensile Strain	0.4% at 95% I _c Retention (77K)*	0.40%

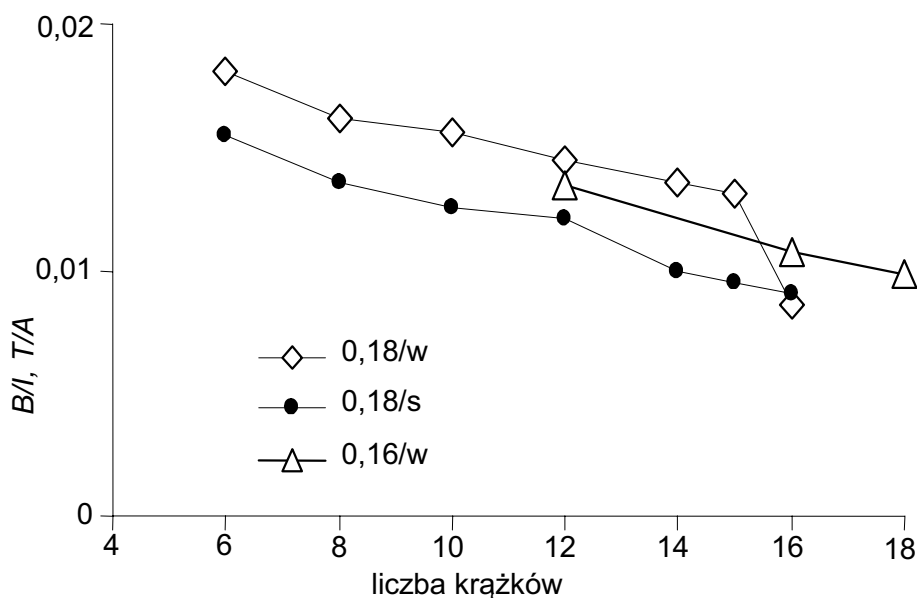
*Test done on representative sample

Rys. 3.2. Certyfikat taśmy Bi-2223/AgFe (tab. 3.1) [2]

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że do wykonania elektromagnesu wykorzystano 1500 m taśmy HTS (tab. 3.1, rys. 3.2). Założono również, że elektromagnes HTS dla SMES-a umieszczony będzie

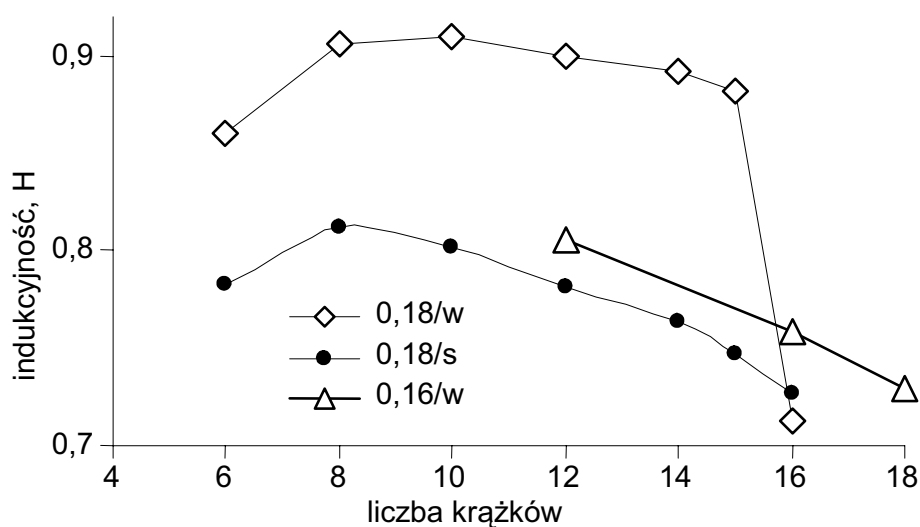
w kriostacie azotowym, którego średnica wewnętrzna wynosi 0,4 m. Przyjęto więc, że maksymalny promień zewnętrzny elektromagnesu nie może przekroczyć 0,18 m. Wykonane zostały, przy tych założeniach, obliczenia dla elektromagnesów HTS o promieniu zewnętrznym 0,18 m z liczbą cewek krążkowych od 6 do 18 lub o promieniu wewnętrznym 0,16 m z liczbą cewek krążkowych od 12 do 18.

Charakterystyki $B_{\max}=f(I)$ elektromagnesu HTS są funkcjami liniowymi. Rys. 3.3 przedstawia współczynniki kierunkowe tych charakterystyk. "0,18/w" oznacza elektromagnes o promieniu zewnętrznym = 0,18 m, z małą odległością pomiędzy cewkami, a "0,18/s" oznacza elektromagnes o takim samym promieniu ale większą odległość pomiędzy cewkami. "0,16/w" oznacza elektromagnes o promieniu zewnętrznym 0,16 m, z małą odległością pomiędzy cewkami. Z punktu widzenia maksymalnego pola magnetycznego optymalny jest elektromagnes z 6 cewkami krążkowymi o promieniu zewnętrznym 0,18 m z małą odległością pomiędzy cewkami.



Rys. 3.3. Współczynnik kierunkowy charakterystyki elektromagnesu $B_{\max}=f(I)$ [1]

Rysunek 3.4 przedstawia indukcyjność elektromagnesu HTS dla SMES-a w funkcji liczby krążków. Z punktu widzenia maksymalnej indukcyjności optymalny jest elektromagnes "0,18/w" z 8-10 krążkami.

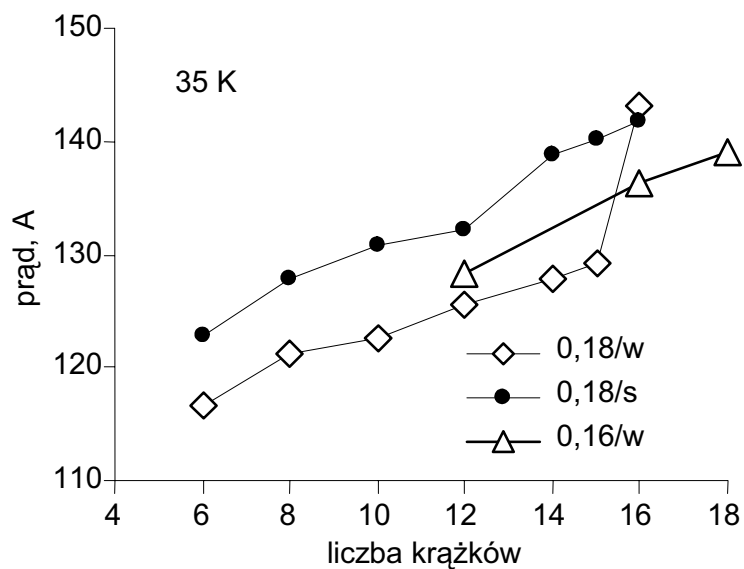


Rys. 3.4. Indukcyjność elektromagnesu SMES-a w funkcji liczby krążków [1]

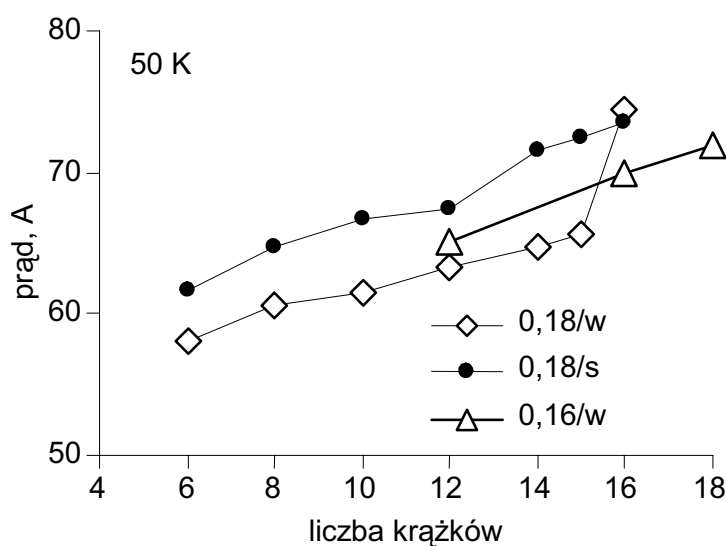
Rysunek 3.5 i rys. 3.6 przedstawiają prąd krytyczny i maksymalną indukcyjność w elektromagnesie SMES-a w funkcji liczby krążków. Z punktu widzenia prądu krytycznego lepsze są elektromagnesy z maksymalną liczbą cewek krążkowych, a z punktu widzenia indukcyjności, elektromagnesy z minimalną liczbą cewek krążkowych.

Rysunek 3.7 i rys. 3.8 przedstawiają maksymalną energię SMES-a w funkcji liczby krążków dla elektromagnesu pracującego w temperaturze 35 K oraz 50 K. Z punktu widzenia energii SMES-a optymalne są elektromagnesy z 14-15 krążkami z większą odległością pomiędzy nimi.

Porównując wyniki obliczeń z wynikami zamieszczonymi na rys. 3.5 widać różnice pomiędzy elektromagnesami nadprzewodnikowymi a konwencjonalnymi. Optymalny ze względu na energię elektromagnes konwencjonalny to elektromagnes o największej indukcyjności, czyli zgodnie z rys. 3.4 elektromagnes "0,18/w" z 10 krążkami. Optymalny ze względu na energię elektromagnes nadprzewodnikowy to, zgodnie z rys. 3.7, elektromagnes "0,18/s" z 14 cewkami krążkowymi.

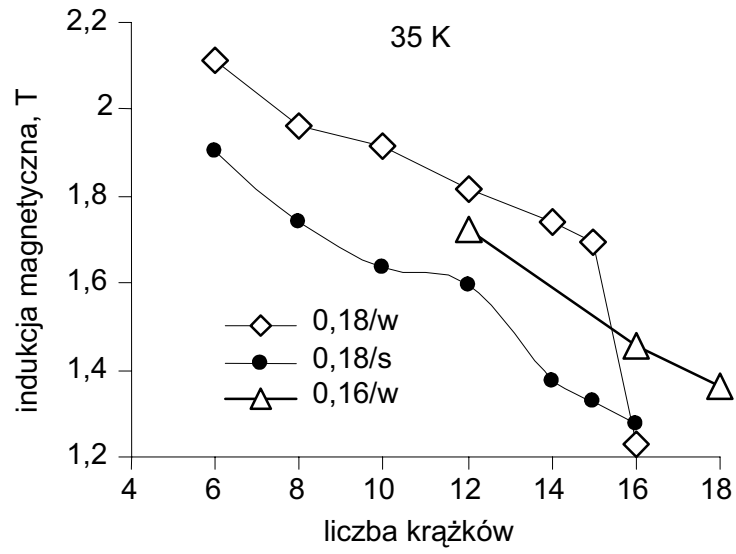


(a)

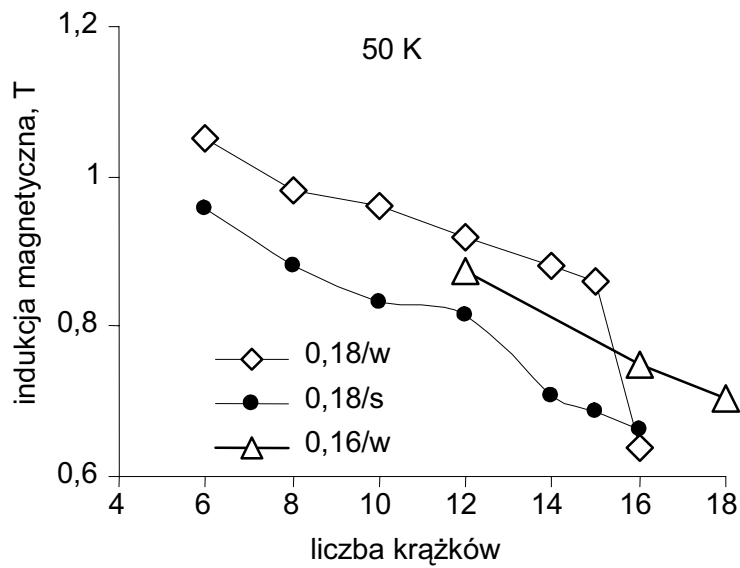


(b)

Rys. 3.5. Prąd krytyczny elektromagnesu SMES-a w funkcji liczby krążków dla temperatur 35 K (a) i 50 K (b) [1]

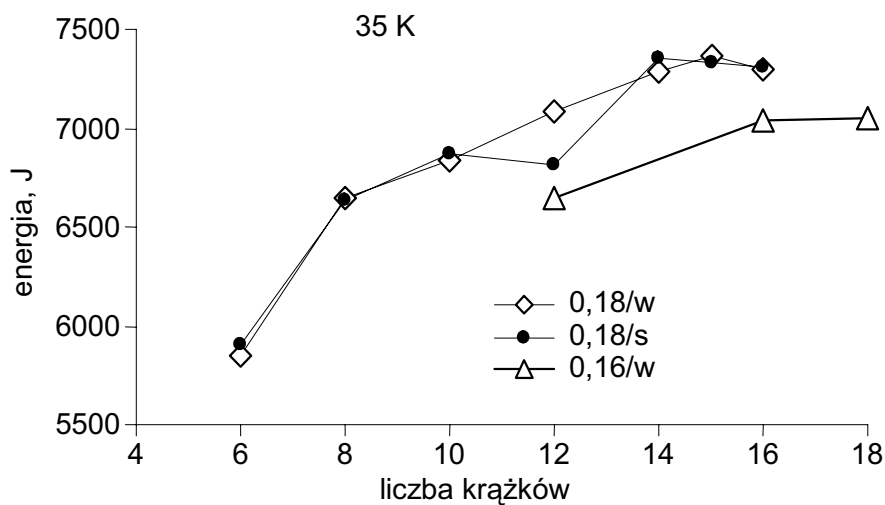


(a)

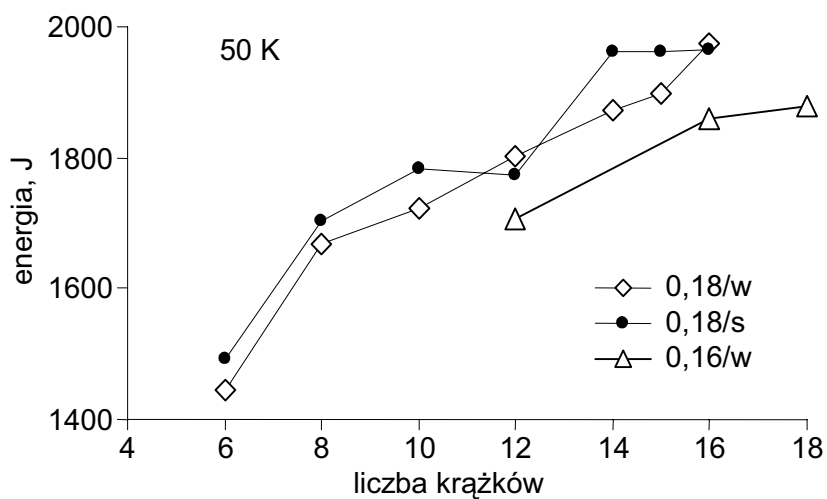


(b)

Rys. 3.6. Maksymalna indukcja w elektromagniesie SMES-a w funkcji liczby krążków dla temperatur 35 K (a) i 50 K (b) [1]



Rys. 3.7. Maksymalna energia SMES-a (w temp. 35 K) w funkcji liczby krążków



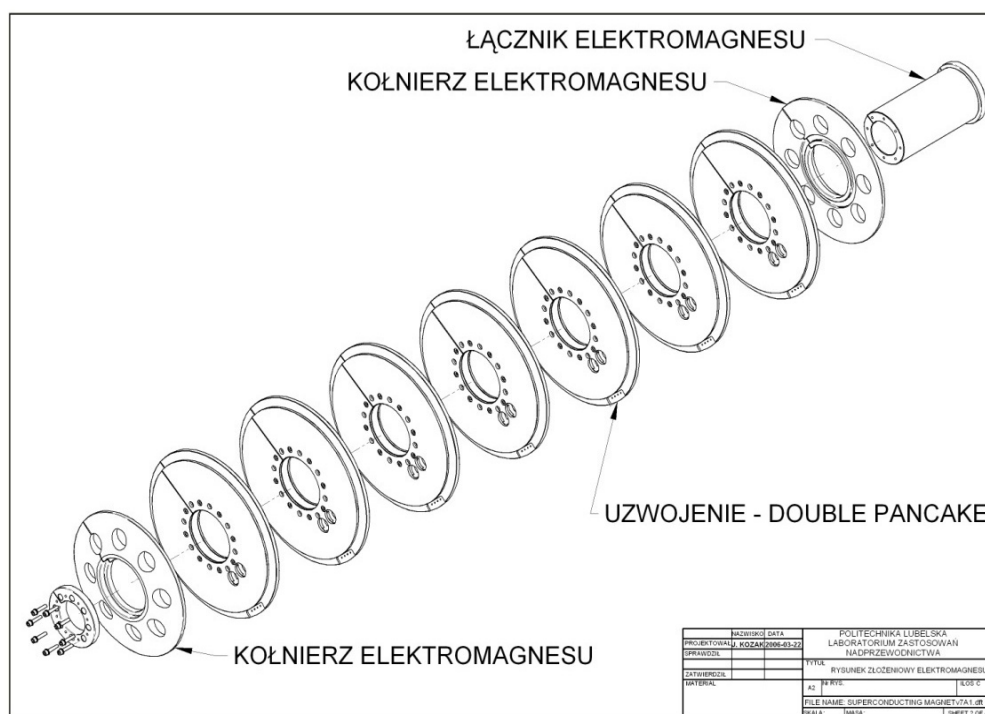
Rys. 3.8. Maksymalna energia SMES-a (w temp. 50 K) w funkcji liczby krążków [1]

Na podstawie obliczeń wykonanych z wykorzystaniem modelu numerycznego podjęta została decyzja o konfiguracji elektromagnesu HTS dla SMES-a. Wybrano uzwojenie 14-krążkowe, którego parametry zostały

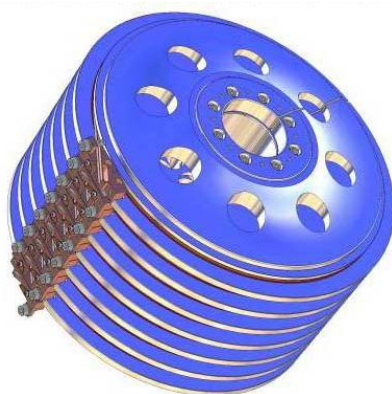
wyróżnione w tab. 3.1 Ponieważ okazało się, że producent może dostarczyć taśmę w odcinkach 100 m lub będących wielokrotnością 100m, zakupiona została taśma w 15 odcinkach po 100 m. Wynika stąd, że poza parametrami fizycznymi materiałów należy w trakcie obliczeń optymalizacyjnych urządzeń nadprzewodnikowych uwzględnić również "parametr producenta".

3.2. PROJEKT NADPRZEWODNIKOWEGO ELEKTROMAGNESU DLA ZASOBNIKA ENERGII

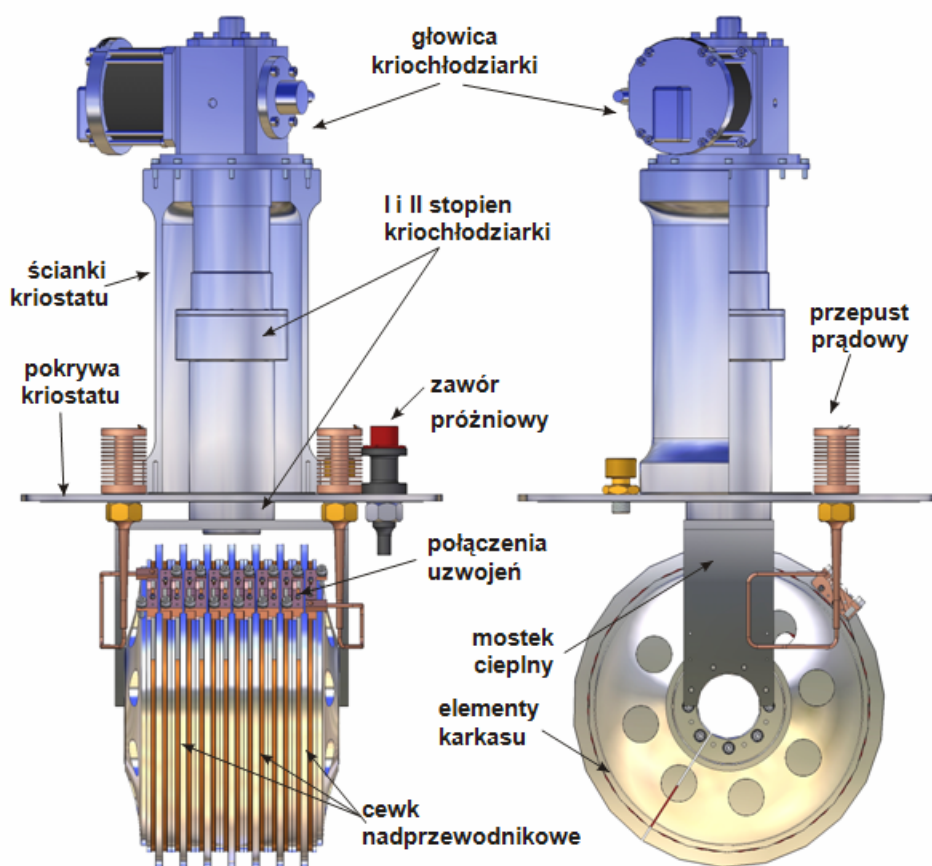
Na podstawie przeprowadzonej analizy rozwiązań nadprzewodnikowych zasobników energii opracowywanych na świecie, modelu numerycznego oraz dotychczasowych prac nad zastosowaniem i eksploatacją urządzeń nadprzewodnikowych zaproponowano projekt elektromagnesu nadprzewodnikowego (rys. 3.9, 3.10, 3.11 i 3.12) przeznaczonego dla zasobnika energii z kontaktowym układem chłodzenia.



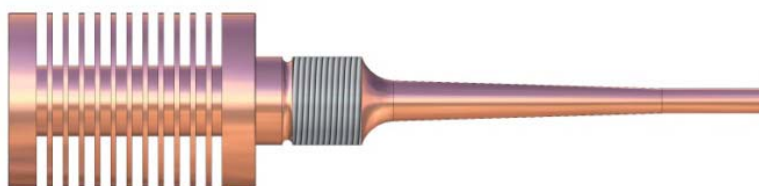
Rys. 3.9. Elementy elektromagnesu HTS – rysunek złożeniowy



Rys. 3.10. Zaprojektowany elektromagnes dla SMES-a



Rys. 3.11. Zaprojektowany elektromagnes dla SMES-a z elementami kriostatu i głowicą kriołodziarki SRDK-408D



Rys. 3.12. Przepust prądowy dla elektromagnesu SMES-a

3.3. BUDOWA ELEKTROMAGNESU HTS DLA SMES- a

3.3.1. Elementy uzwojenia nadprzewodnikowego.

Do wykonania uzwojenia poszczególnych cewek została wykorzystana taśma nadprzewodnikowa firmy American Superconductor. Przekrój taśmy pokazany jest na rys. 3.13. Parametry techniczno – eksploatacyjne taśmy zamieszczono w tab. 3.2.



Rys. 3.13. Przekrój poprzeczny taśmy nadprzewodnikowej dla uzwojeń elektromagnesu nadprzewodnikowego zasobnika energii [2]

Tab. 3.2. Parametry taśmy Bi-2223 [2]

taśma nadprzewodnikowa	HTS High Strength Wire Stainless Steel Laminated	
nadprzewodnik	Bi-2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$)	
grubość	mm	0,31
szerokość	mm	4,2
min. średnica gięcia	mm	70
prąd krytyczny	A	115
temperatura krytyczna	K	77

Włókna nadprzewodnikowe wykonane są z nadprzewodnika Bi-2223 i umieszczone w matrycy srebrnej. Powierzchnia taśmy jest pokryta stalowym laminatem, co zapewnia jej dobrą wytrzymałość mechaniczną. Każda część uzwojenia elektromagnesu została nawinięta z dostarczonej przez producenta taśmy w odcinkach o długości min. 100 m.

Rzeczywiste wartości parametrów krytycznych i wymiary poszczególnych szpul różnią się od wartości nominalnych (gwarantowanych przez producenta). Przy szeregowym połączeniu cewek, prąd krytyczny I_c cewki o najmniejszej wartości limitować będzie prąd w całym uzwojeniu. Warunki chłodzenia cewek środkowych i skrajnych różnią się oraz prąd krytyczny poszczególnych cewek jest różny (tab.3.1). Rozmieszczając cewki o największym prądzie krytycznym w środku elektromagnesu, gdzie warunki chłodzenia są najgorsze, a cewki o najmniejszym prądzie krytycznym na skrajach, uzyskamy największą energię SMES-a.

3.3.2. Izolacja uzwojeń

Jako podstawową izolację uzwojeń zastosowano żywicę epoksydową oraz materiały poliiimidowe w postaci folii i taśmy, które wzmacniają konstrukcje uzwojeń oraz pełnią również funkcję izolacji elektrycznej zwojów, cewek i uzwojeń nadprzewodnikowych. Elementy i materiały, potrzebne do wykonania uzwojenia elektromagnesu SMES-a, przedstawiono na rys. 3.14.

Podczas pracy uzwojenia nadprzewodnikowego w warunkach znamionowych (w stanie nadprzewodzącym) nie jest konieczne stosowanie izolacji elektrycznej uzwojeń elektromagnesu SMES-a ponieważ rezystancja uzwojenia nadprzewodnikowego nie przekracza wartości rzędu $1 \times 10^{-6} \Omega$ i w praktyce jest zbliżona do zera. Jednakże w czasie występowania stanów nieustalonych tzn. w trakcie ładowania i rozładowywania uzwojenia elektromagnesu indukuje się napięcie w uzwojeniu i izolacja elektryczna jest niezbędna [4].

Dobra izolacja elektryczna jest także konieczna podczas szybkiego kontrolowanego rozładowania zasobnika energii lub w czasie występowania zjawisk związanych z quenczem uzwojenia w wyniku zmian wartości i rozkładu pola magnetycznego, kiedy indukują się gwałtownie duże wartości napięcia. Do wykonania izolacji elektrycznej wykorzystano izolację w postaci folii kaptonowej HN film – 25 μm . Podstawowe właściwości folii kaptonowej przedstawiono w tabelach 3.3 – 3.5 i rysunku 3.15 [4], [5], [6].

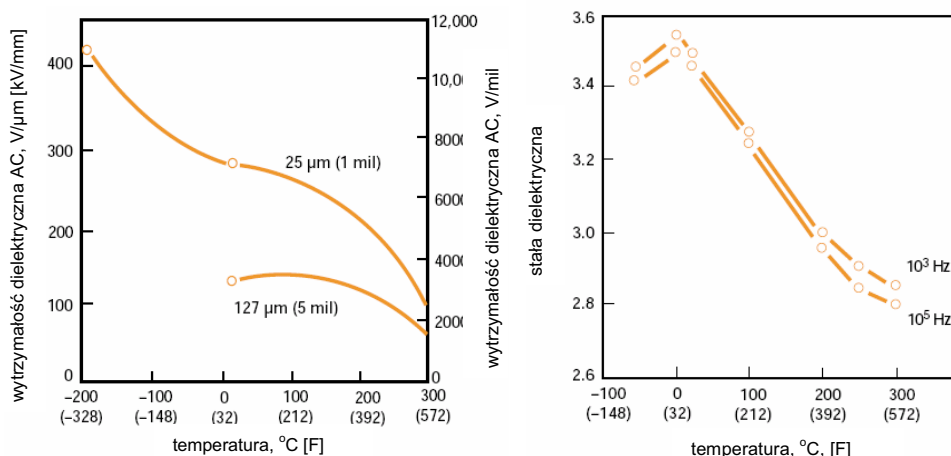


Rys. 3.14. Elementy i materiały do wykonania pojedynczej cewki nadprzewodnikowej:

- a₁, a₂, a₃ – elementy karkasu cewki (pokryte izolacją),
- b – elementy łączące uzwojenia, śruby łączące,
- c – taśma nadprzewodnikowa (w opakowaniu producenta),
- d - izolacja międzyzwojowa (taśma kaptonowa),
- e – żywica epoksydowa,
- f – izolacja dla elementów karkasu (folia kaptonowa).

Tab. 3.3. Właściwości fizyczne izolacji kaptonowej HN [3]

parametry fizyczne	wartość
wytrzymałość na rozciąganie, MPa	231
granica plastyczności, MPa	69
naprężenie powodujące 5% wydłużenie, MPa	90
wydłużenie przy zerwaniu, %	72
moduł wydłużenia, GPa	2,5
Udarność, Ncm	78
wytrzymałość na składanie, cykl	285 000
wytrzymałość na rozdarcie – początkowe, N	0,07
wytrzymałość na rozdarcie – propagacja, N	7,2
Gęstość, g/cc lub g/mL	1,42
współczynnik tarcia kinetycznego (warstwa o warstwę)	0,48
współczynnik tarcia statycznego (warstwa o warstwę)	0,63
współczynnik załamania	1,70
współczynnik Poisson'a	0,34



Rys. 3.15. Stała dielektryczna(a) i natężenie pola elektrycznego (b) w funkcji temperatury dla folii kaptonowej HN 25 μm [3]

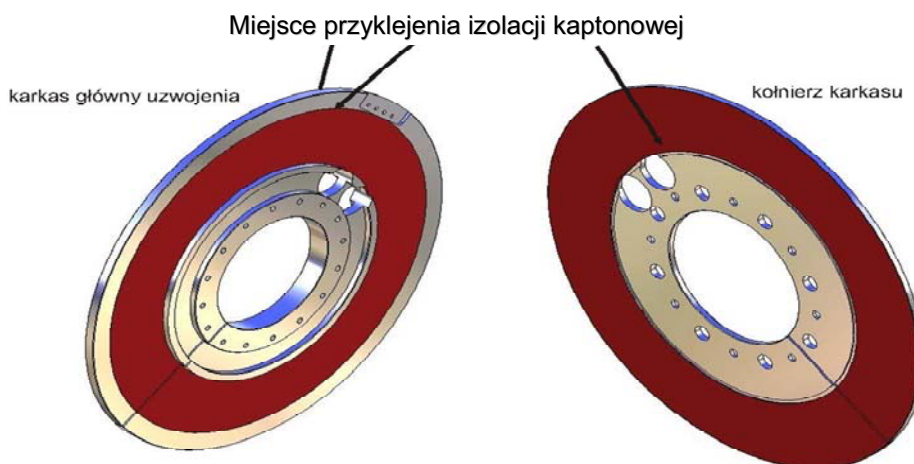
Tab. 3.4. Termiczne właściwości folii kaptonowej HN [3]

parametry cieplne	wartość
granica topnienia	brak
współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej, ppm/°C	20
współczynnik przewodności cieplnej, W/mK	0,12
ciepło właściwe, J/gK	1,09
Kurczliwość, %	
30 min w 150 °C	0,17
120 min w 400 °C	1,25
maksymalny współczynnik utleniania, %	37-45

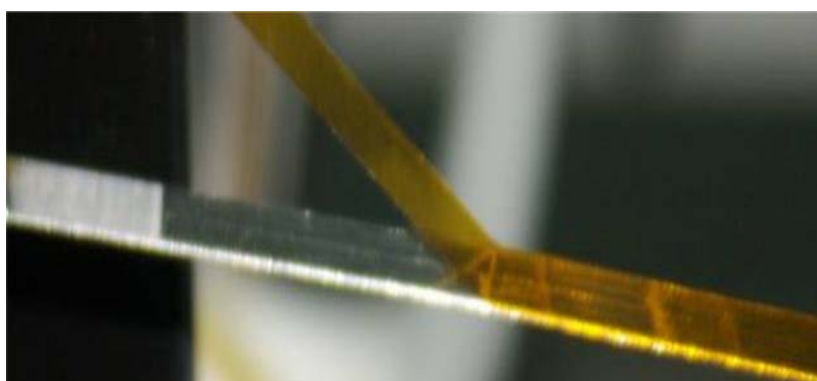
Tab. 3.5. Właściwości elektryczne folii kaptonowej HN [3]

parametry elektryczne	wartość
wytrzymałość dielektryczna, V/m	303
stała dielektryczna	3,4
współczynnik rozproszenia	0,0018
rezystywność skrośna, Ωcm	$1,5 \times 10^{17}$

Miejsca zastosowania izolacji kaptonowej oraz proces wykonywania izolacji międzyzwojowej uzwojenia elektromagnesu SMES-a przedstawiono na rys. 3.16 i 3.17



Rys. 3.16. Miejsce przyklejenia izolacji kaptonowej do elementów karkasu pojedynczej cewki



Rys. 3.17. Proces pokrywania izolacją taśmy nadprzewodnikowej HTS

Konstrukcja elektromagnesu nadprzewodnikowego powinna umożliwiać dobre chłodzenie uzwojenia nadprzewodnikowego oraz dobrą odporność na mechaniczne naprężenia statyczne i dynamiczne. Do wykonania konstrukcji karkasu i innych elementów elektromagnesu zastosowano aluminium o symbolu 6063. Materiał ten zapewnia dobrą wytrzymałość mechaniczną i dobre przewodnictwo cieplne.

Podstawową izolację cieplną elektromagnesu nadprzewodnikowego stanowi natomiast ciecz kriogeniczna (ciekły azot), w przypadku chłodzenia w kąpieli, lub próżnia – przy chłodzeniu kontaktowym za pomocą kriołodziarki kontaktowej. W projektowanym elektromagnesie zostanie zastosowana kriołodziarka kontaktowa firmy Sumitomo, SRDK-408D.

Jako dodatkową izolację zastosowano żywicę epoksydową Epidian 5, której podstawowym zadaniem jest poprawa przewodzenia ciepła w uzwojeniu poprzez wypełnienie wolnych przestrzeni, a także wzmocnienie mechaniczne uzwojenia. Rysunek 3.18 przedstawia proces pokrywania taśmy HTS żywicą epoksydową. Parametry użytej żywicy zamieszczono w tab. 3.6.



Rys. 3.18. Proces pokrywania taśmy HTS płynną żywicą epoksydową w trakcie nawijania

Tab. 3.6. Wybrane parametry żywicy epoksydowej [4]

parametr	wartość
wytrzymałość na ściskanie, MPa	90 – 115
wytrzymałość na zginanie, MPa	80 – 110
Twardość, MPa	100– 110
temperatura ugięcia wg metody Martens'a, °C	90 – 110
wytrzymałość na rozciąganie, MPa	45 – 60
właściwa rezystywność skrośna, Ωcm	1×10^{16}
czas zespolenia (próbka 100 g, temperatura 20 °C), min	33

Epidian 5 jest kompozycją epoksydową, zawierającą jako modyfikator nieaktywny rozcieńczalnik. Charakteryzuje się ona średnią lepkością i posiada bardzo dobre właściwości elektroizolacyjne. W uzwojeniu żywica epoksydowa powoduje sklejenie elementów

uzwojenia, poprawia jego sztywność. Żywicę stosowano w połączeniu z utwardzaczem o symbolu Z1 w proporcjach zalecanych przez producenta [4].

3.3.3. Nawijanie uzwojeń nadprzewodnikowych

Na podstawie obliczeń numerycznych zaprojektowano elektromagnes złożony z 14 cewek krążkowych. Uzwojenia wykonano w postaci 7 dwucewek krążkowych.



Rys. 3.19. Zmontowany elektromagnes HTS dla SMES-a

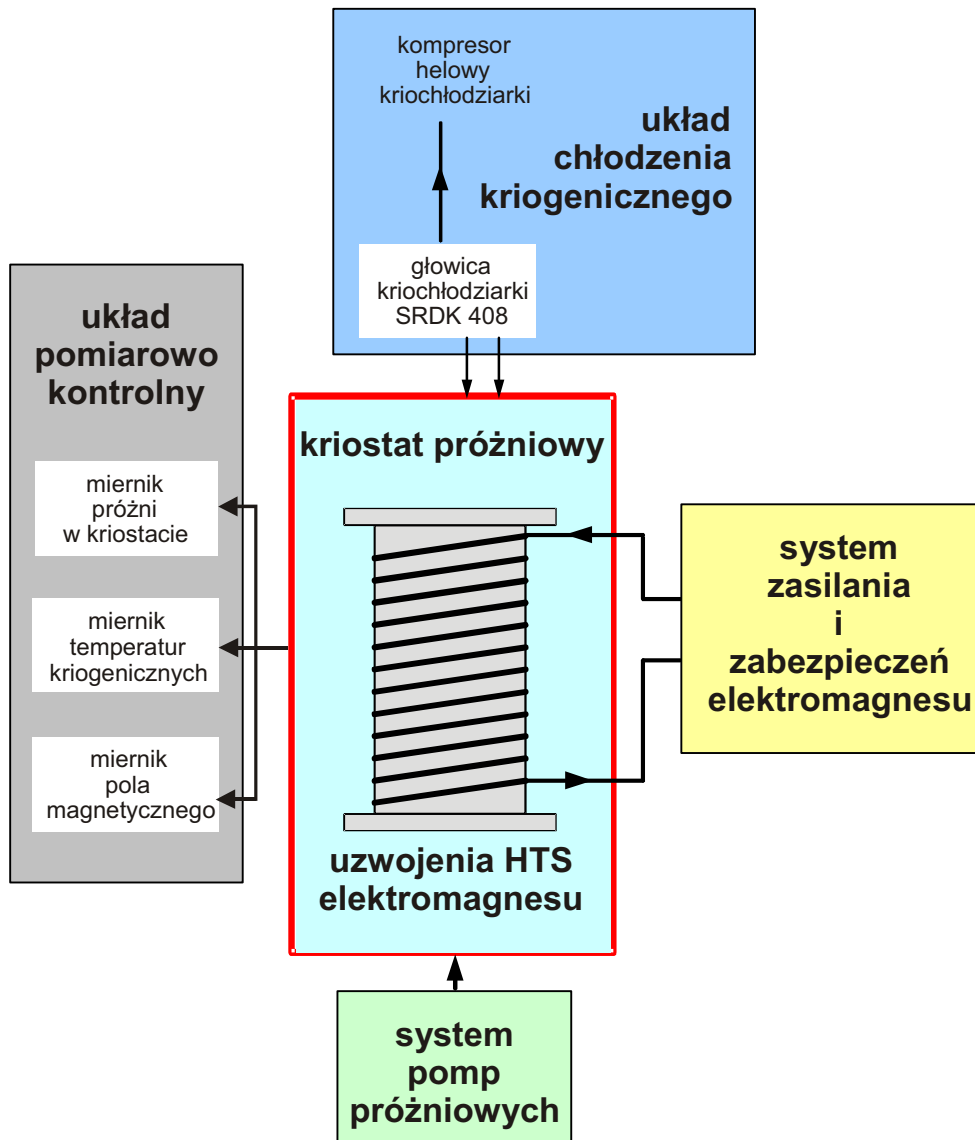
Zestawienie taśm wykorzystanych do nawinięcia poszczególnych cewek zamieszczono w tabeli 3.7.

Tab. 3.7. Zestawienie taśm wykorzystanych do nawijania uzwojeń.

Nr uzw.	AMSC Nr przewodu	Minimalna długość, m	Liczba zwojów	Prąd krytyczny I_c (77K, 1mV/cm, pole własne), A	Masa kg
1a	SW - 427	100	143	128	6,580
1b	SW - 428	100	143	126	
2a	SW - 445	100	142	115	6,560
2b	SW - 426	100	144	115	
3a	SW - 447	100	142	115	6,565
3b	SW - 448	100	141	115	
4a	SW - 429	100	137	123	6,515
4b	SW - 425	100	144	122	
5a	SW - 453	100	136	115	6,500
5b	SW - 454	100	138	116	
6a	SW - 446	100	141	118	6,495
6b	SW - 450	100	139	118	
7a	SW - 451	100	139	115	6,555
7b	SW - 449	100	140	115	

3.3.4. Podstawowe podzespoły elektromagnesu SMES-a

System nadprzewodnikowego elektromagnesu zasobnika energii zawiera układ chłodzenia kriogenicznego, układ zasilania i zabezpieczeń, układ zapewniających izolację próżniową oraz układy kontrolno-pomiarowe (rys. 3.20). Elementy te zostały przedstawione i opisane w następnym rozdziale (rozdział 5, rys. 4.1 – 4.5).



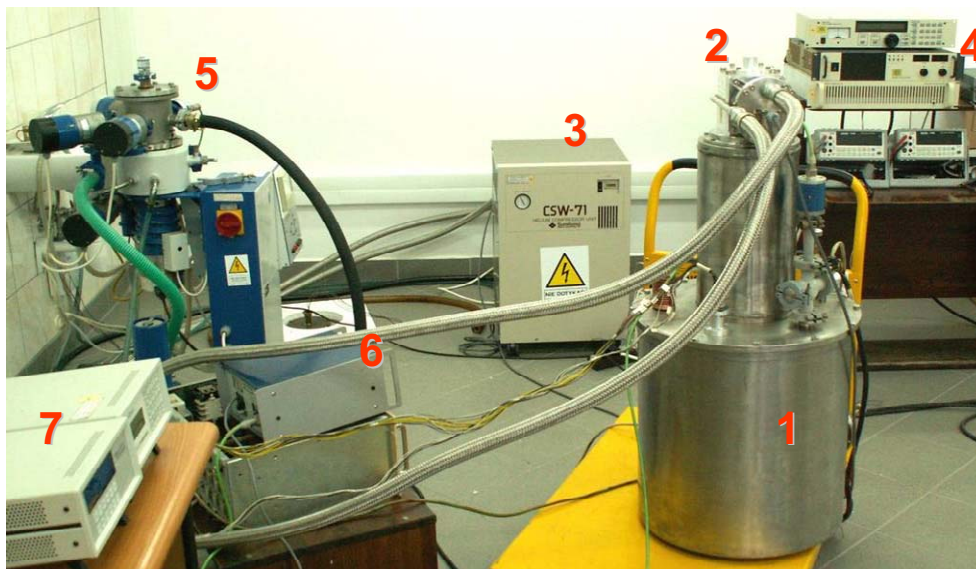
Rys. 3.20. Podstawowe podzespoły elektromagnesu SMES-a

3.4. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 3.

- [1] Kozak S.: *Modelowanie elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 221, 2005.
- [2] American Superconductor, <http://www.amsuper.com/>
- [3] Dupont, <http://www.dupont.com/>
- [4] Hirokazu Y.: *Thermal conductivity of polyimide film at cryogenic temperature*, Cryogenics, Vol. 35, 1995, pp. 799-800.
- [5] Barucci M., Gottardi E., Peroni I., ventura G., *Low temperature thermal conductivity of Kapton and Upilex*, Cryogenics, Vol. 40, 2000, pp. 145-147.
- [6] Evans D., *Turn, layer and ground insulation for superconducting magnets*, Physica C, vol. 354, 2001, pp. 136 – 142.

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE ZBUDOWANEGO ELEKTROMAGNESU SMES-A

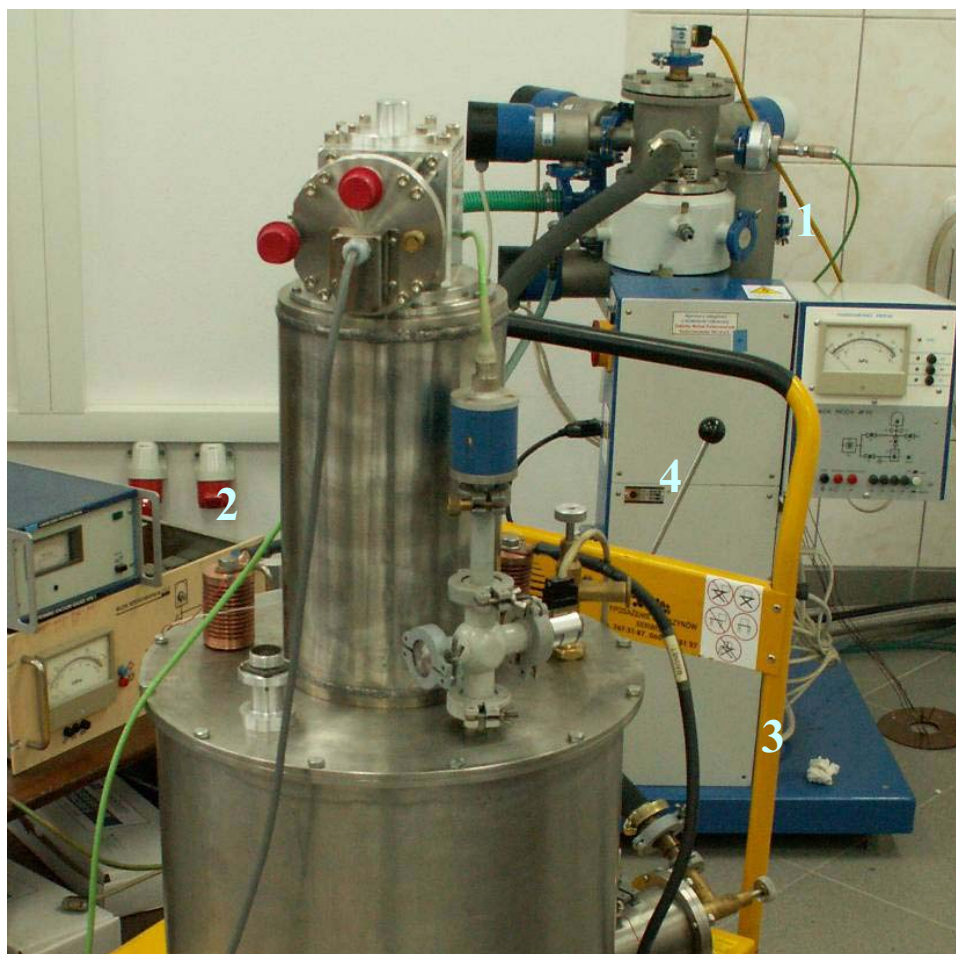
4.1. STANOWISKO BADAWCZE



Rys. 4.1. Stanowisko do wyznaczania charakterystyk krytycznych SMES-a w funkcji temperatury:

- 1 - elektromagnes SMES-a w kriostacie,
- 2 - głowica kriochłodziarki SRDK-408 D (Sumitomo):
3,8÷300 K, 1 W/4,2 K, 34 W/40 K,
- 3 - kompresor helowy kriochłodziarki SRDK-408,
- 4 - system zasilania, sterowania i zabezpieczeń urządzeń nadprzewodnikowych - 12200PS-420 Digital Power Supply System (American Magnetics): 0÷200 A/ 0÷12 V/ 2400 VA),
- 5 - system pomp próżniowych SD100E (Tepro Koszalin):
próżnia rzędu 10^{-4} Pa,
- 6 - mierniki próżni w kriostacie,
- 7 - miernik temperatur kriogenicznych Model 218 (Lake Shore): 0,5÷400 K
i miernik pola magnetycznego Model 421 (Lake Shore): 0,00000001 ÷ 30 T

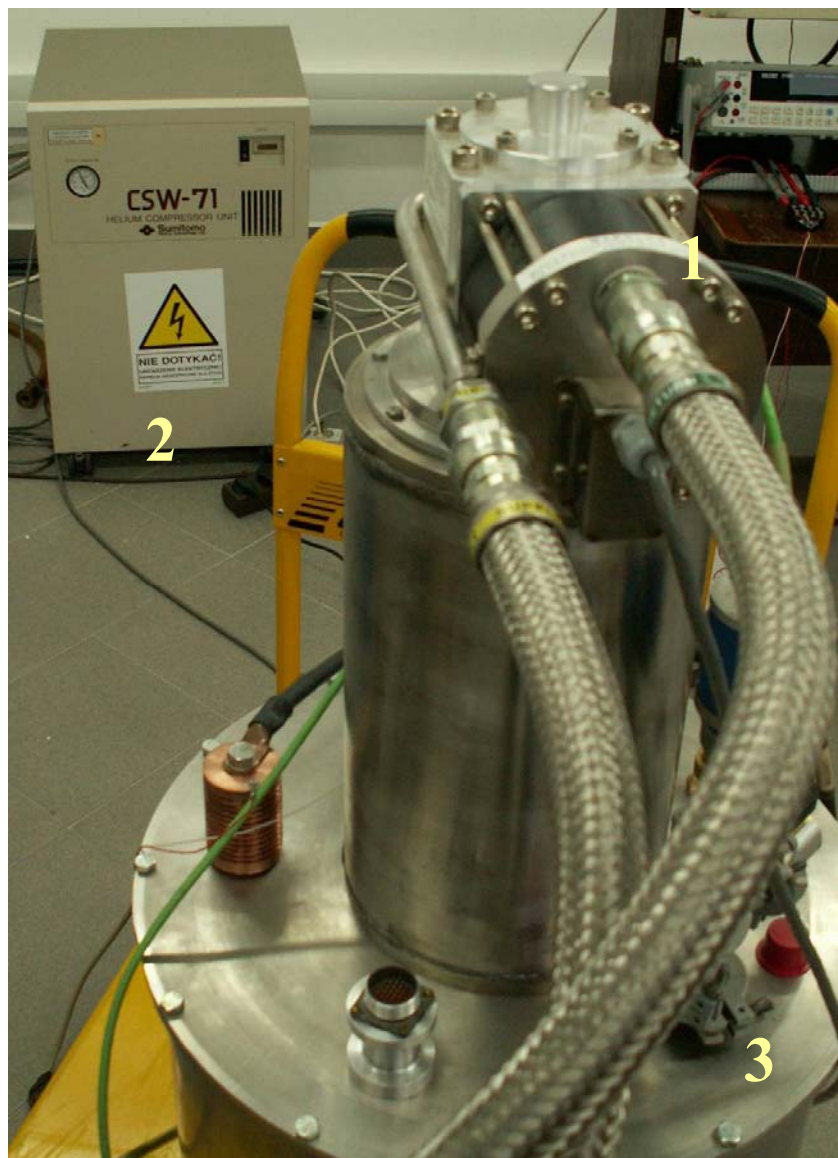
System próżniowy



Rys. 4.2. System próżniowy SMES-a:

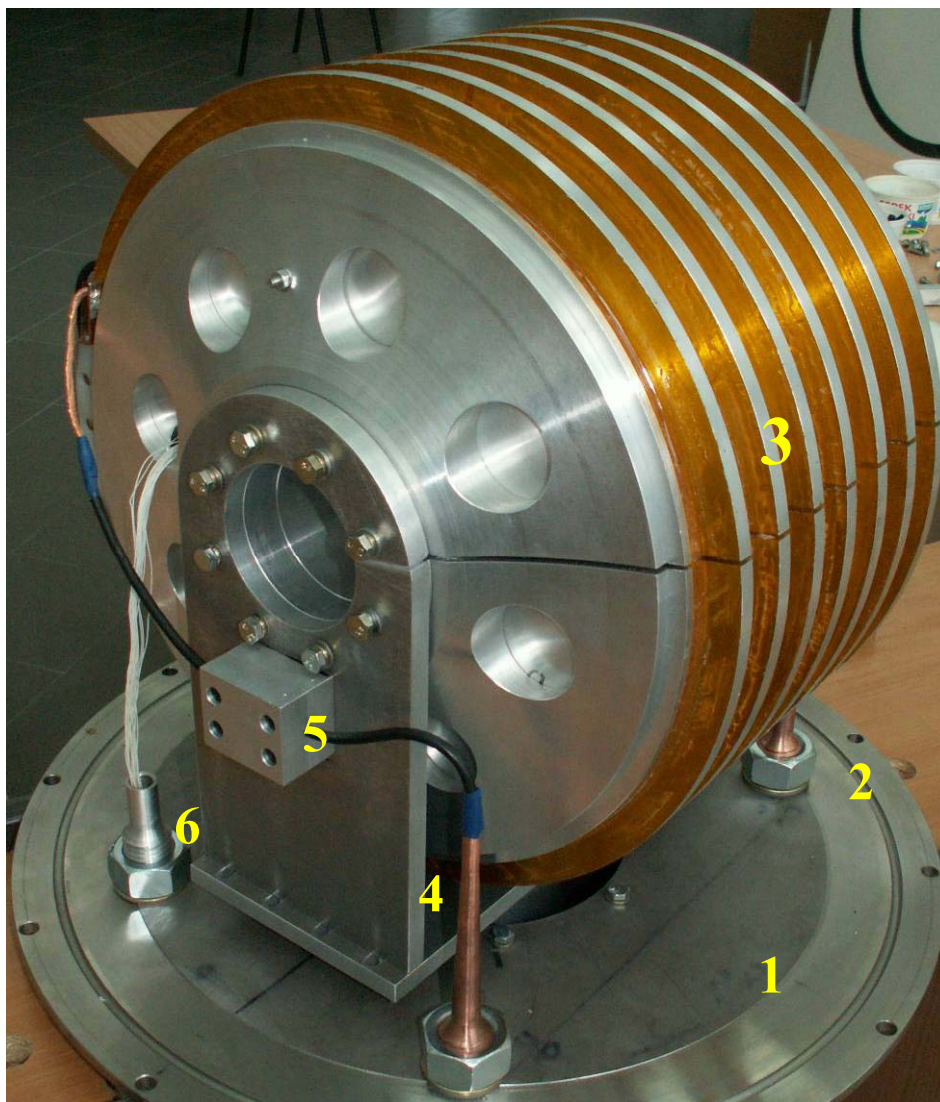
- 1 - system pomp próżniowych SD100E (Tepro Koszalin):
próżnia rzędu 10^{-4} Pa,
- 2 - mierniki próżni w kriostacie,
- 3 - klucz próżniowy próżni zewnętrznej,
- 4 - klucz próżniowy próżni wewnętrznej

System chłodzenia



Rys. 4.3. System chłodzenia elektromagnesu SMES-a:

- 1 - głowica kriochłodziarki SRDK-408 (Sumitomo):
3,8÷300 K, 1 W/4,2 K, 34 W/40 K,
- 2 - kompresor helowy CSW-71 kriochłodziarki SRDK-408,
- 3 - helowe przewody ciśnieniowe łączące głowicę
z kompresorem

Elektromagnes SMES-a

Rys. 4.4. Elektromagnes SMES-a:

- 1 - pokrywa kriostatu,
- 2 - przepust prądowy,
- 3 - elektromagnes SMES-a,
- 4 - mostek cieplny do chłodzenia elektromagnesu,
- 5 - mostek cieplny do chłodzenia przepustu prądowego,
- 6 - przepust próżniowy doprowadzeń czujników pomiarowych temperatury i pola magnetycznego

Układy pomiarowe



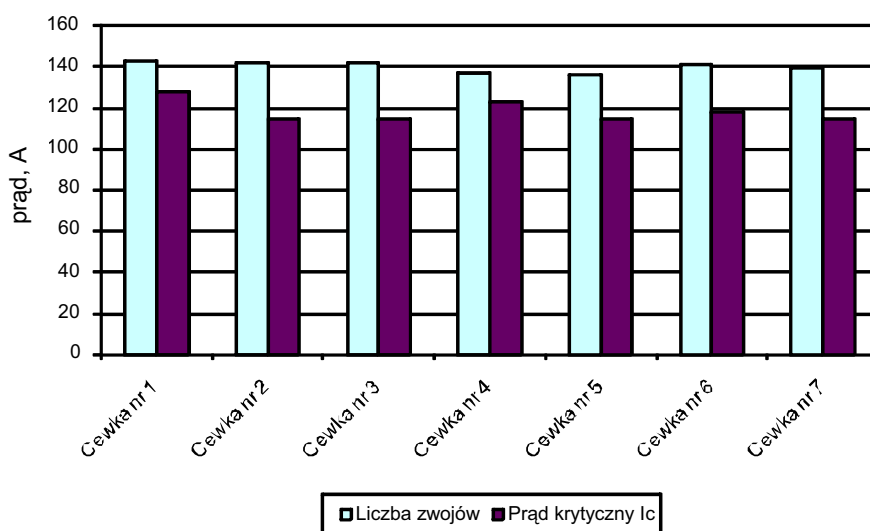
Rys. 4.5. Elektromagnes SMES-a z kriochłodziarką:

- 1 - kriostat,
- 2 - głowica kriochłodziarki SRDK-408
- 3 - przepust prądowy,
- 4 - czujnik próżni zewnętrznej,
- 5 - przepust próżniowy doprowadzeń czujników pomiarowych temperatury i pola magnetycznego,
- 6 - przewody do pomiaru napięcia elektromagnesu SMES-a podczas badania jego charakterystyk krytycznych w funkcji temperatury

Przed wykonaniem badań eksperymentalnych zebrano parametry uzwojeń elektromagnesu nadprzewodnikowego dla SMES-a wynikające z danych producenta taśmy nadprzewodnikowej zastosowanej do nawijania uzwojeń oraz z parametrów konstrukcyjnych elektromagnesu. Wartości tych parametrów zamieszczono w tab. 4.1 i pokazano na rys. 4.6.

Tab. 4.1. Parametry cewek nadprzewodnikowych

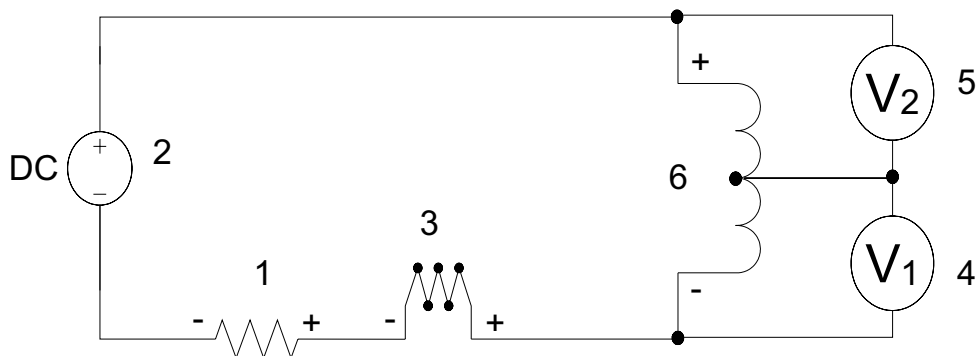
	Nr uzw.	AMSC Nr przewodu	Minimalna długość [m]	Liczba zwojów	I _c (77K, 1μV/cm, pole własne) [A]	Kryterium 1		Masa [kg]
						μV/cm		
Cewka nr 1	1a	SW - 427	118,1	143	128	11,81	23,62	6,580
	1b	SW - 428	118,1	143	126	11,81		
Cewka nr 2	2a	SW - 445	117,1	142	115	11,71	23,62	6,560
	2b	SW - 426	119,1	144	115	11,91		
Cewka nr 3	3a	SW - 447	117,1	142	115	11,71	23,32	6,565
	3b	SW - 448	116,1	141	115	11,61		
Cewka nr 4	4a	SW - 429	112,2	137	123	11,12	23,03	6,515
	4b	SW - 425	119,1	144	122	11,91		
Cewka nr 5	5a	SW - 453	111,2	136	115	11,12	22,44	6,500
	5b	SW - 454	113,2	138	116	11,32		
Cewka nr 6	6a	SW - 446	116,1	141	118	11,61	23,03	6,495
	6b	SW - 450	114,2	139	118	11,42		
Cewka nr 7	7a	SW - 451	114,2	139	115	11,42	22,93	6,555
	7b	SW - 449	115,1	140	115	11,51		



Rys. 4.6. Wartości parametrów cewek nadprzewodnikowych

4.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE POJEDYNCZYCH CEWEK ELEKTROMAGNESU SMES-A

Pomiary wartości parametrów pojedynczych cewek elektromagnesu nadprzewodnikowego dla SMES-a wykonano w układzie pomiarowym pokazanym na rysunku 4.7.

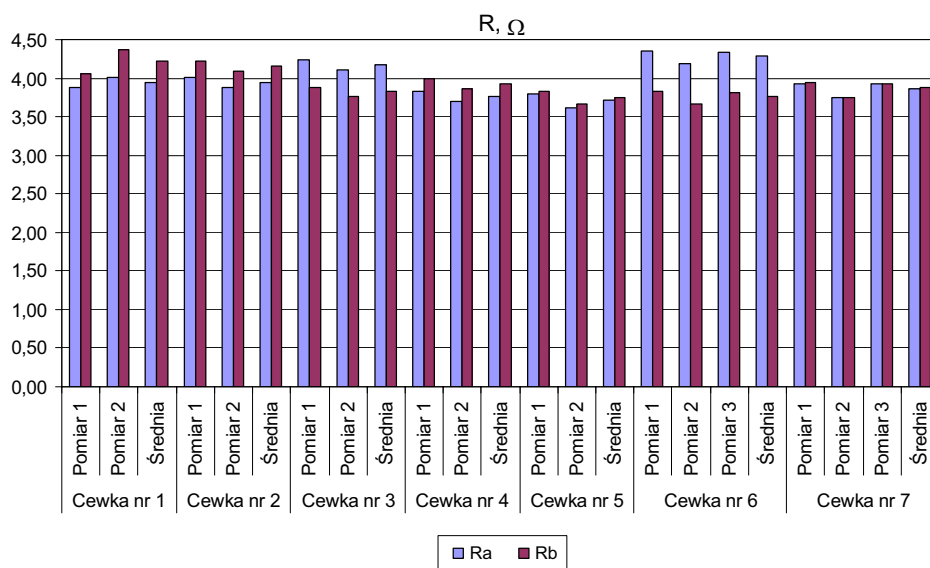


Rys. 4.7. Układ pomiarowy dla badań pojedynczych cewek elektromagnesu:

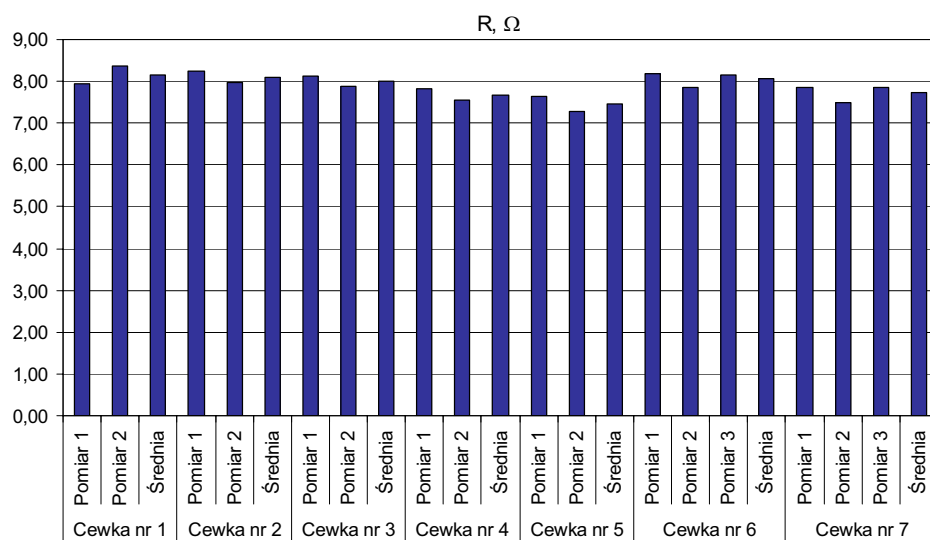
- 1 – system sterowania (American Magnetics)
Model 420 Power Supply Programmer,
- 2 – system zasilania (American Magnetics)
Digital Power Supply 12200 PS, 0 ÷ 200 A/0 ÷ 12 V/2400VA)
- 3 – system zabezpieczeń (American Magnetics)
Model 601 Energy Absorber,
- 4,5 – multimetry laboratoryjne Escort 3136A,
- 6 – dwucewka elektromagnesu SMES-a

4.2.1. Pomiar rezystancji cewek w temperaturze pokojowej (290 K)

Pomiar wykonano metodą techniczną dla każdej dwucewki krążkowej po wykonaniu połączeń lutowanych obu cewek (a i b) dwucewki. Wyniki pomiarów przedstawiono graficznie na rys. 4.8. Na rys. 4.9 przedstawiono graficznie wyniki pomiarów całkowitej rezystancji każdej dwucewki.



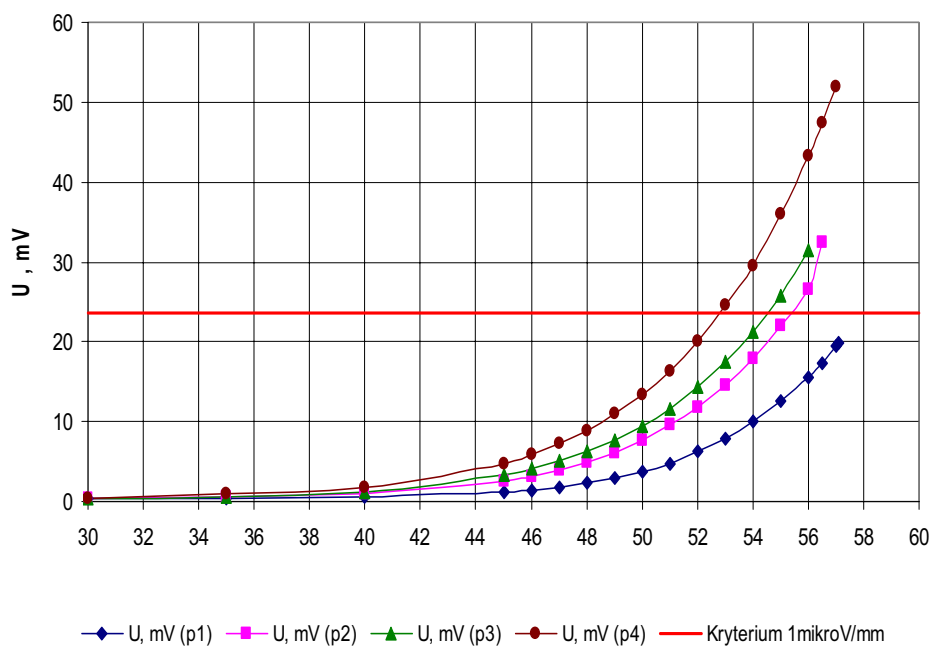
Rys. 4.8. Rezystancja cewek w temperaturze pokojowej 290 K:
 R_a, R_b - rezystancja uzwojeń cewki a i b



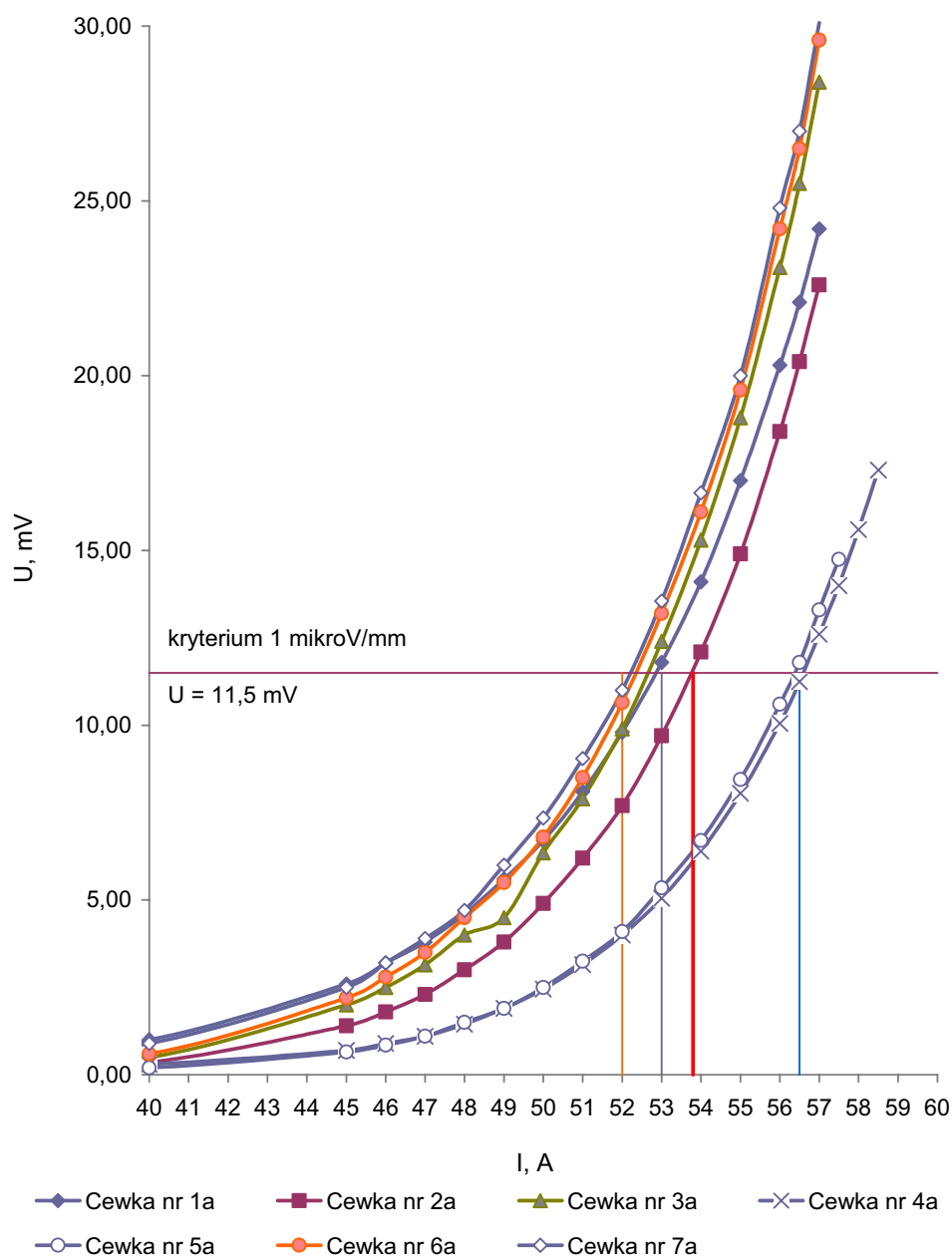
Rys. 4.9. Rezystancja całkowita R cewek
w temperaturze pokojowej 290 K

4.2.2. Pomiar charakterystyk U - I pojedynczych cewek elektromagnesu SMES-a w temperaturze 77 K

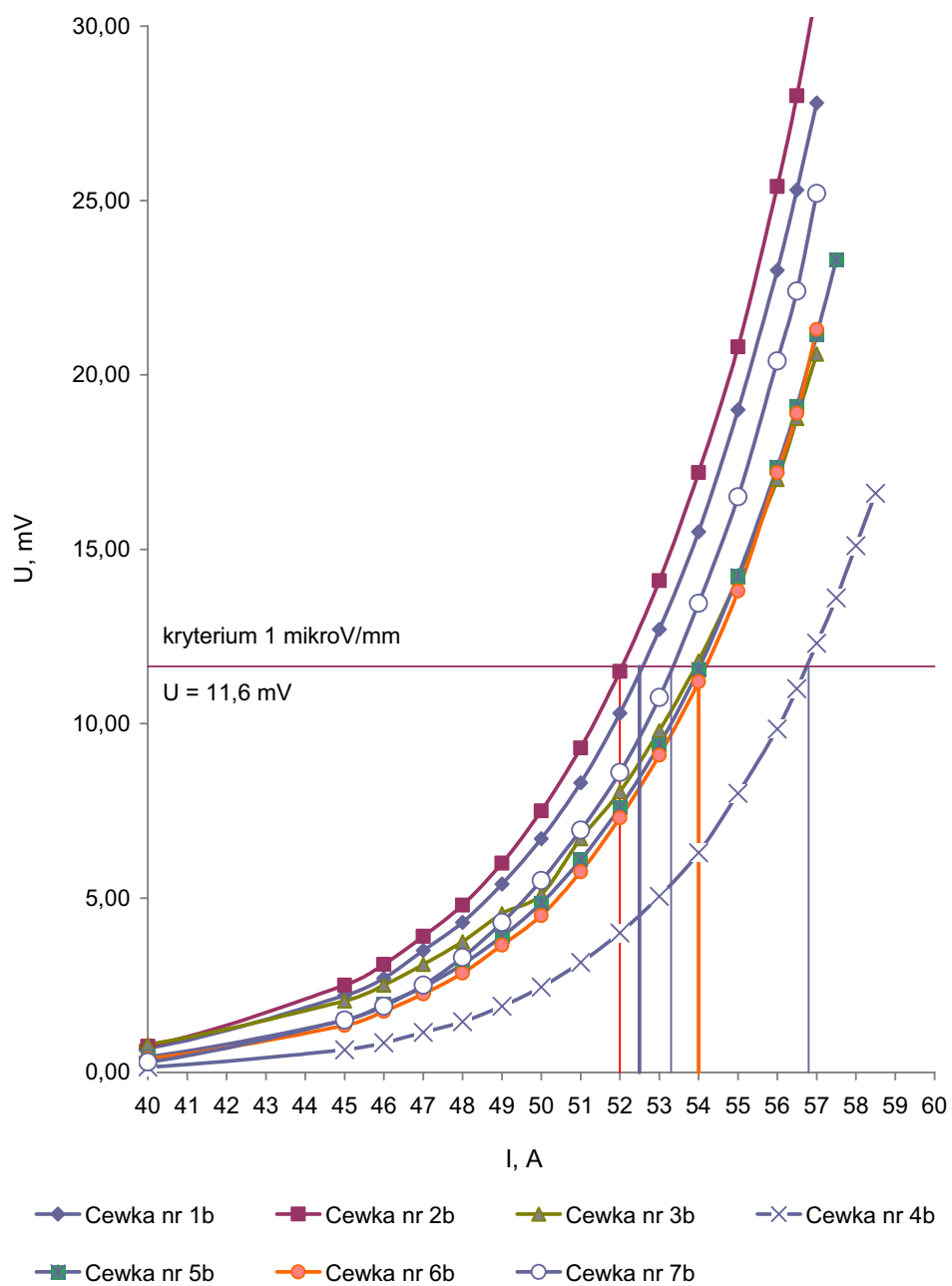
Pomiary eksperymentalne parametrów uzwojenia elektromagnesu nadprzewodnikowego SMES-a zostały wykonane przy chłodzeniu w kąpeli ciekłego azotu. Każda z cewek została kolejno schłodzona do temperatury 77 K i przebadana w układzie pomiarowym pokazanym na rys. 4.7. Pomiary wykonano dla wszystkich 14 cewek krążkowych i 7 dwucewek uzwojenia SMES-a. Wyniki pomiarów eksperymentalnych przedstawiono na rys. 4.10 – 4.13.



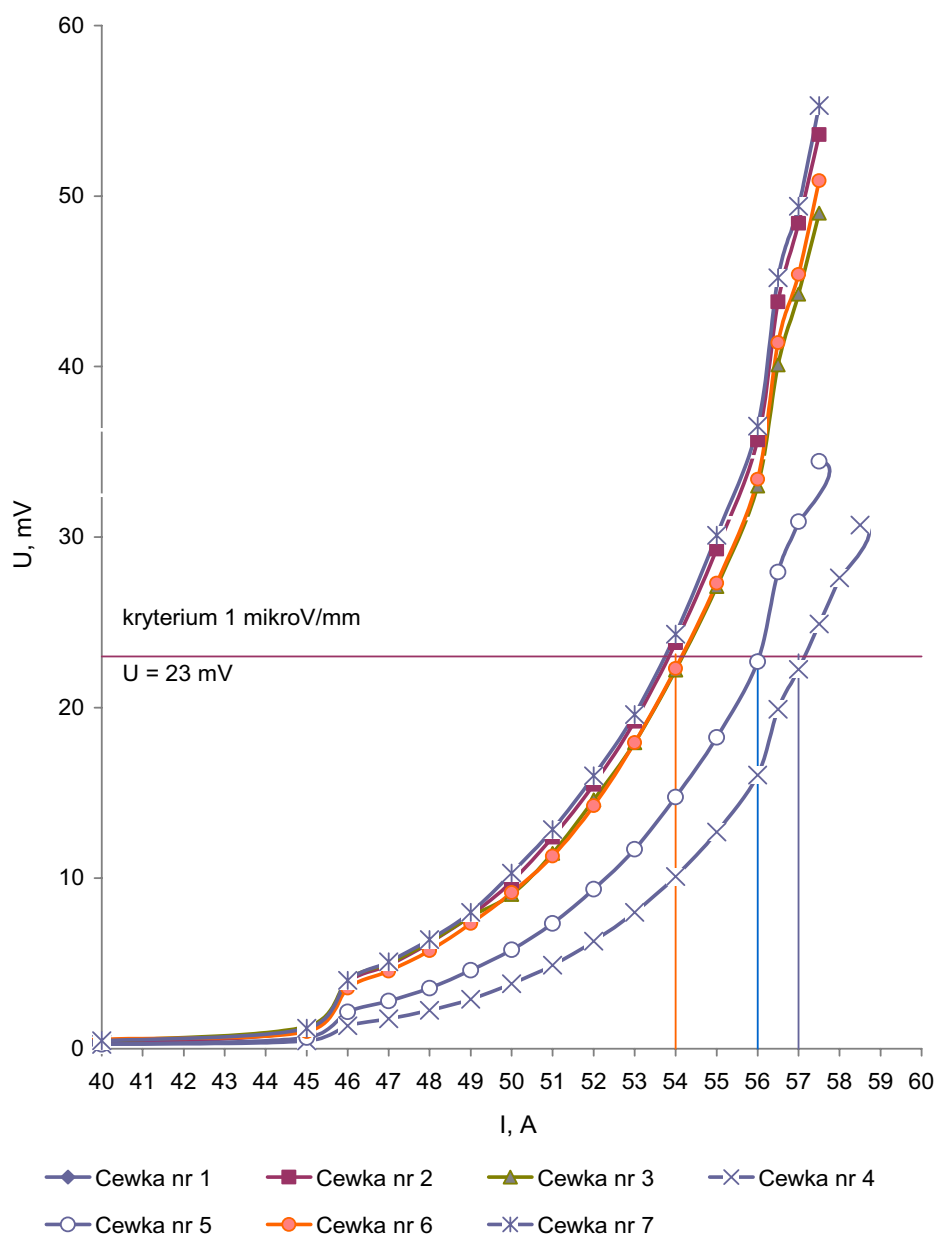
Rys. 4.10. Pomiary charakterystyk U - I cewki nr 1 (temp. 77,4 K)



Rys. 4.11. Pomiary charakterystyk U - I uzwojeń 1a-7a (temp. 77,4 K)



Rys. 4.12. Pomiary charakterystyk U - I uzwojeń 1b-7b (temp. 77,4 K)

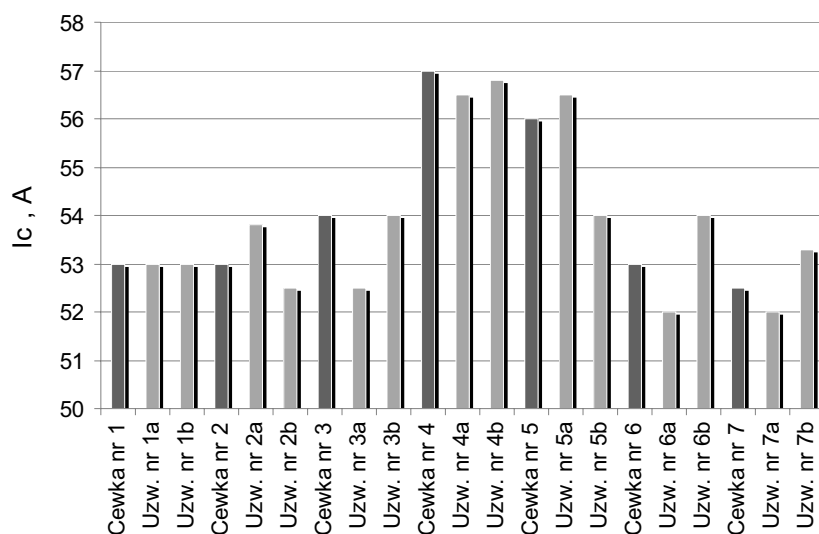


Rys. 4. 13. Pomiary charakterystyk U - I dwucewek 1-7 (temp. 77,4 K)

W tab. 4.2 zamieszczono wyniki pomiarów eksperymentalnych prądów krytycznych cewek elektromagnesu SMES-a, przedstawionych w formie graficznej na rys. 4.14.

Tab. 4.2. Wartości prądów krytycznych wyznaczonych z pomiarów eksperymentalnych dla uzwojeń nadprzewodnikowych SMES-a

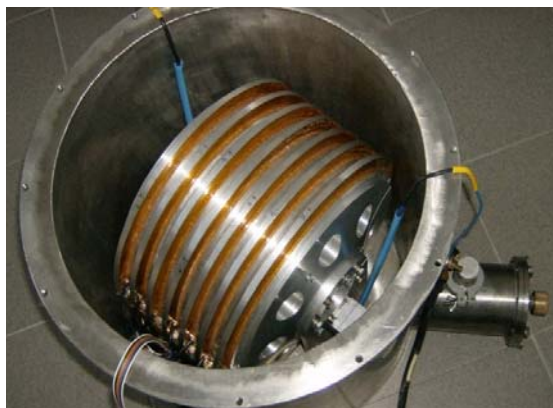
	Kryterium 1mikroV/mm	Prąd krytyczny I_c (77K)
	U, mV	I, A
Cewka nr 1	23,62	53
Uzw. nr 1a	11,81	53
Uzw. nr 1b	11,81	53
Cewka nr 2	23,62	53
Uzw. nr 2a	11,71	53,8
Uzw. nr 2b	11,91	52,5
Cewka nr 3	23,32	54
Uzw. nr 3a	11,71	52,5
Uzw. nr 3b	11,61	54
Cewka nr 4	23,03	57
Uzw. nr 4a	11,12	56,5
Uzw. nr 4b	11,91	56,8
Cewka nr 5	22,44	56
Uzw. nr 5a	11,12	56,5
Uzw. nr 5b	11,32	54
Cewka nr 6	23,03	53
Uzw. nr 6a	11,61	52
Uzw. nr 6b	11,42	54
Cewka nr 7	22,93	52,5
Uzw. nr 7a	11,42	52
Uzw. nr 7b	11,51	53,3



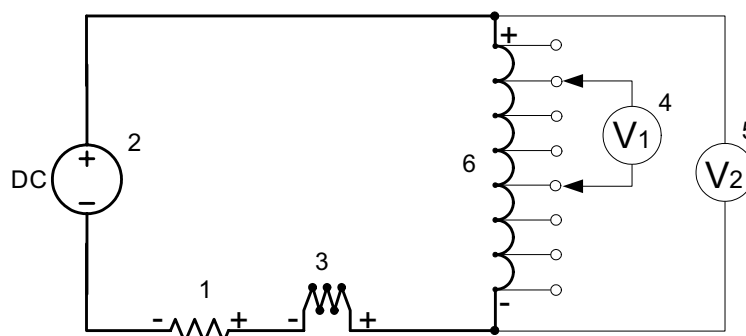
Rys. 4. 14. Wartości prądów krytycznych wyznaczonych z pomiarów eksperymentalnych dla uzwojeń nadprzewodnikowych elektromagnesu SMES-a (temp. 77,4 K)

4.3. BADANIA EKSPERYMENTALNE ELEKTROMAGNESU SMES-A

Pomiary wartości parametrów elektromagnesu nadprzewodnikowego dla SMES-a (rys.4.15) wykonano w układzie pomiarowym pokazanym na rysunku 4.16. Elektromagnes chłodzony był w kąpeli ciekłego azotu w temp 77K.



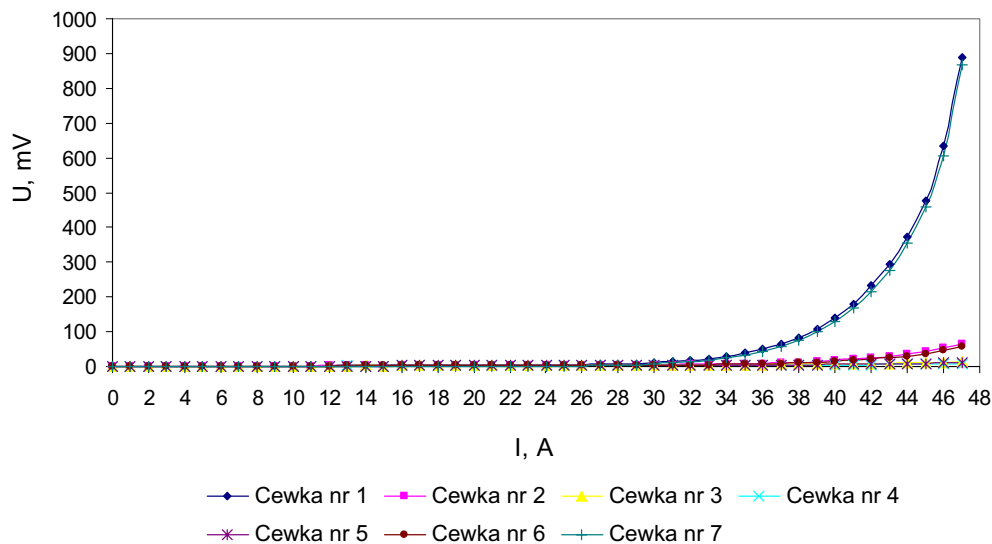
Rys. 4.15. Elektromagnes SMES-a umieszczony w kriostacie



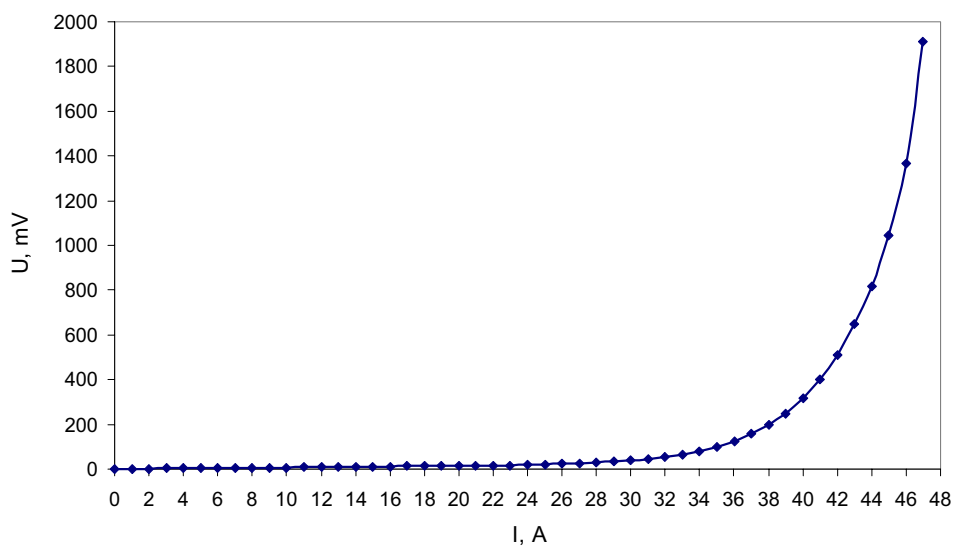
Rys. 4.16. Układ pomiarowy dla badań elektromagnesu SMES-a:

- 1 – system sterowania (American Magnetics) Model 420 Power Supply Programmer
- 2 – system zasilania (American Magnetics) Digital Power Supply 12200 PS, 0 ÷ 200 A / 0 ÷ 12 V/ 2400 VA
- 3 – system zabezpieczeń (American Magnetics) Model 601 Energy Absorber
- 4,5 – multimetry laboratoryjne Escort 3136A
- 6 – elektromagnes SMES-a złożony z 7 cewek typu pancake

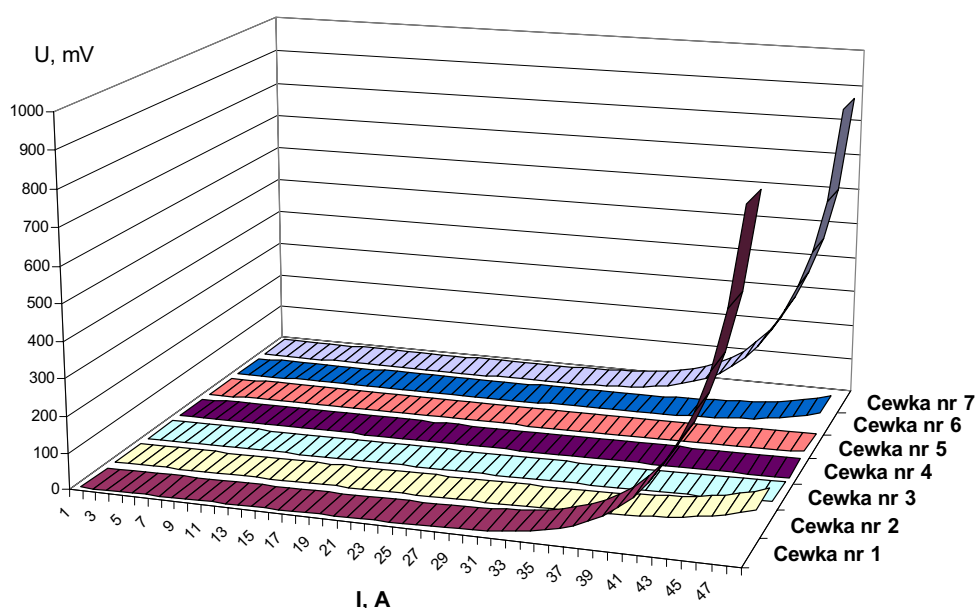
Wyniki pomiarów przedstawiono w formie graficznej na rys. 4.17, 4.18 i 4.19.



Rys. 4.17. Charakterystyki U - I elektromagnesu nadprzewodnikowego SMES-a – pomiary z pojedynczych cewek



Rys. 4.18. Pomiary napięcia w funkcji prądu dla elektromagnesu nadprzewodnikowego SMES-a – pomiary całego elektromagnesu



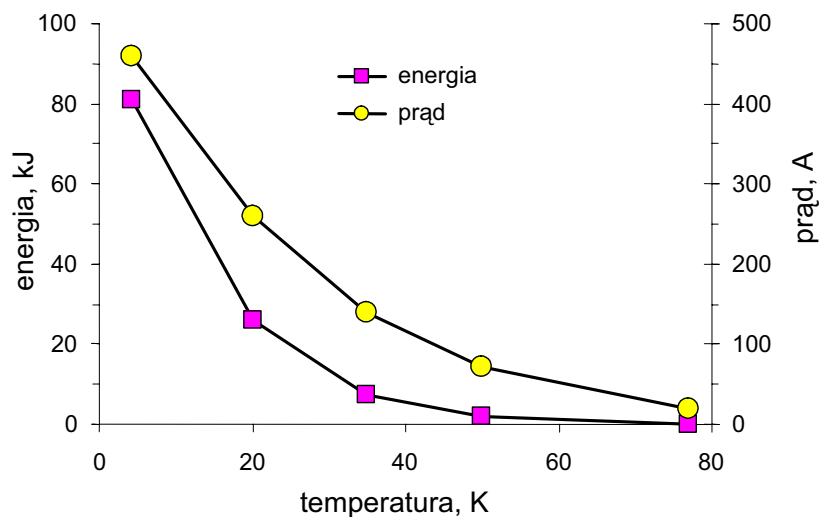
Rys. 4.19. Charakterystyki krytyczne nadprzewodnikowych cewek elektromagnesu SMES-a

4.4. ENERGIA SMES-A

Wartości energii zgromadzonej w nadprzewodnikowym uzwojeniu zasobnika zależą od temperatury w której pracuje uzwojenie. Idea działania i zależności pomiędzy wartościami parametrów elektromagnesu SMES-a zostały opisane w rozdziale 2. Z równań (2-1) i (2-2) wynika że wartość energii zależy od kwadratu wartości prądu płynącego w uzwojeniu. Obniżając temperaturę pracy zwiększamy prąd płynący w uzwojeniu nadprzewodnikowym, a zatem i wartość całkowitej energii zgromadzonej w zasobniku.

Badany elektromagnes nadprzewodnikowy jest dedykowany dla zasobnika energii należącego do grupy małych zasobników (tab. 2.3) przeznaczonych do współpracy ze źródłami małej mocy np. odnawialnymi źródłami energii. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyznaczono zależności energii gromadzonej w nadprzewodnikowym zasobniku oraz prądu w uzwojeniu nadprzewodnikowym w funkcji temperatury (rys. 4.20). Wraz z obniżaniem temperatury pracy elektromagnesu SMES-a zwiększają się możliwości magazynowania energii w urządzeniu. Obniżenie temperatury pracy z 35 K do 20 K potraja ilość energii możliwej do zmagazynowania w urządzeniu z 7,3 kJ do ok. 25 kJ. Obniżenie

temperatury pracy powoduje jednak znaczny wzrost energii którą zużywa układ chłodzenia na utrzymania urządzenia w niższej temperaturze.



Rys 4.20. Wartość energii i prądu w badanym nadprzewodnikowym zasobniku energii w funkcji temperatury

Bardzo istotne jest więc określenie optymalnej temperatury pracy SMES-a oraz wyznaczenie parametrów energoelektronicznego układu przekształtnikowego SMES-a zapewniających ekonomiczną eksploatację urządzenia w przemiennoprądowej sieci energetycznej ze źródłami energii dla których jest przeznaczony.

5. UKŁADY PRZEKSZTAŁTNIKOWE NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKÓW ENERGII

5.1. WPROWADZENIE

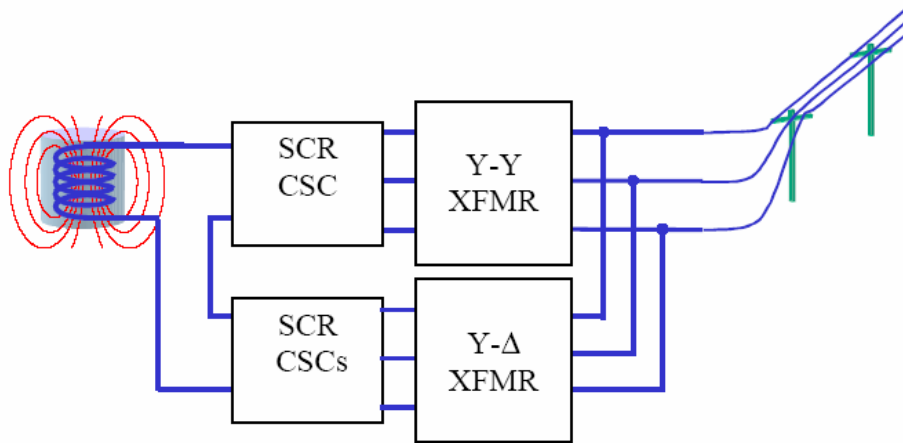
Nadprzewodnikowy zasobnik energii magazynuje energię w postaci pola magnetycznego. Aby móc magazynować i odzyskiwać energię z zasobnika, układ poprawy jakości energii PCS (Power Conditioning System - kondycjoner) powinien zapewniać odpowiednie napięcie. Układ taki musi zapewniać dopasowanie stałej wartości napięcia przemiennego i prądu (AC) sieci elektroenergetycznej z jednej strony oraz wolno zmieniającego się prądu stałego (DC) ze zmieniającym się napięciem stałym elektromagnesu zasobnika z drugiej strony. Ponadto efektywne zasobniki muszą zapewniać stałe szerokopasmowe sterowanie mocą czynną i bierną [31]. Głównym zadaniem układu PCS jest redukcja negatywnych efektów działania urządzeń pracujących w sposób impulsowy, a także kompensacja mocy biernej i składowych harmonicznych prądu odbiorników nieliniowych [6].

Stosowane są dwa podstawowe rozwiązania systemów poprawy jakości energii. Jedno bazuje na falowniku prądu (Current Source Inverter - CSI), drugie na szeregowym połączeniu stałoprądowego przerywacza DC/DC z falownikiem napięcia (Voltage Source Inverter - VSI). Mimo, że pierwsze rozwiązanie wydaje się bardziej naturalnym wyborem, ponieważ elektromagnes nadprzewodnikowy jest sztywnym źródłem prądowym, zwykle lepsze rezultaty daje drugie rozwiązanie. Jest to spowodowane tym, że aby utrzymać stały przepływ mocy, układ PCS musi wytrzymać duży prąd, kiedy elektromagnes nadprzewodnikowy jest w pełni naładowany i duże napięcie kiedy elektromagnes jest prawie całkowicie rozładowany. W takim przypadku falownik prądu musiałby mieć moc trzy do czterech razy większą od elektromagnesu nadprzewodnikowego [8]. W układzie przekształtników DC/DC i falownika napięcia tylko przekształtnik prądu stałego musi mieć wyższą moc. Wadą tego rozwiązania jest potrzeba sterowania dwoma przekształtnikami zamiast tylko jednym.

5.2. UKŁADY FALOWNIKOWE PRĄDU

Układy z falownikiem prądu wprowadzono we wczesnych etapach rozwoju nadprzewodnikowych zasobników energii i bazuje ona na sześciopulsowym falowniku prądu opartym na tyrystorach SCR. Dwa falowniki prądu połączono ze sobą szeregowo po stronie stałoprądowej i podłączono do elektromagnesu nadprzewodnikowego. Wyjścia falowników złączono za pomocą dwóch transformatorów. System może

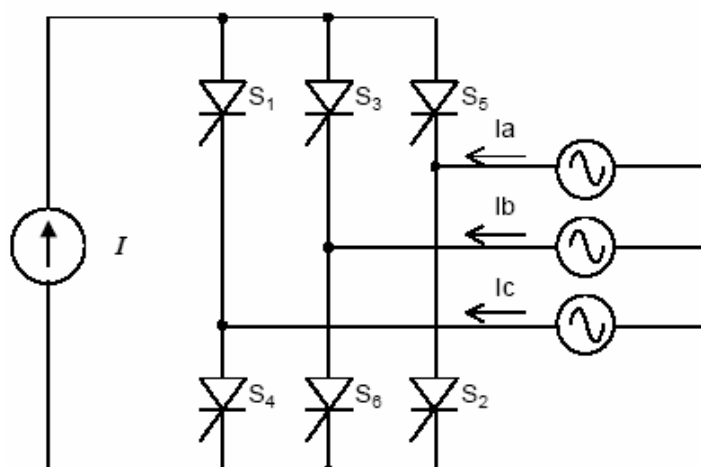
sterować mocą czynną i bierną niezależnie, wykorzystując asymetryczne kąty załączające. Wadą działania takiego układu są odkształcone przebiegi prądu z wyższymi harmonicznymi, co powodowane jest sześciopulsowym działaniem każdego falownika [31]. Schemat blokowy systemu PCS opartego na falowniku prądu pokazuje rys. 5.1.



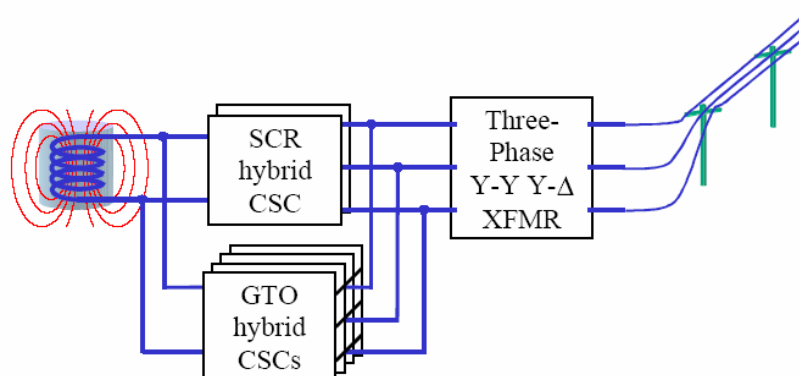
Rys. 5.1. Schemat blokowy zasobnika połączonego z siecią elektroenergetyczną za pomocą falowników prądu; SCR CSC - falownik prądu oparty na tyristorach typu SCR, XFMR - transformator dopasowujący [31]

Taki układ może sterować przepływem energii, zmieniając kąt załączenia pomiędzy dwoma falownikami prądu opartymi na tyristorach poprzez dwa trójfazowe transformatory. Metoda ta wprowadza poważne ograniczenie w sterowaniu mocy bierniej powodowane ograniczonymi zakresami kątów załączenia tyristorów. Rysunek 5.2. przedstawia przykład schematu sześciopulsowego falownika prądu.

Rozwiązaniem tego problemu miały być układy hybrydowe oparte na tyristorach SCR i GTO rozszerzające obszar sterowania przepływu mocy czynnej i bierniej (rys. 5.3) [24], [45]. Różnica pomiędzy układem z sześciopulsowym falownikiem CSI a układem hybrydowym wynika ze sposobu połączenia przekształtników. Pierwszy układ wykorzystuje szeregowe połączenie wejść i wyjść przekształtników, podczas gdy w drugim układzie zastosowano połączenie równoległe. Połączenie równoległe wykonano przed transformatorem, co spowodowało zredukowanie prądu przepływającego przez transformator i redukcję niektórych harmonicznymi.



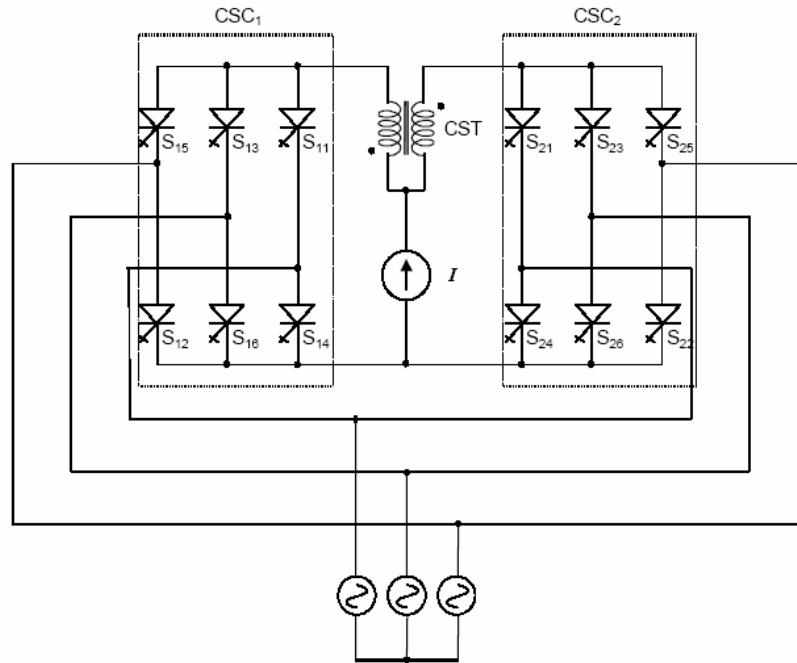
Rys. 5.2. Przykładowy sześciopulsowy falownik prądu [31]



Rys. 5.3. Schemat blokowy układu opartego na falowniku hybrydowym;
 SCR hybrid CSC - hybrydowy falownik prądu oparty na tyrystorach SCR,
 GTO hybrid CSCs - hybrydowe falowniki prądu zbudowane z tyrystorów
 GTO 3-phase XFMR - transformator trójfazowy [31]

Rysunek 5.4 przedstawia schemat hybrydowych przekształtników CSI. Aby zapewnić dużą moc, układ wymaga użycia wielu hybrydowych przekształtników. Falowniki oparte na tyrystorach SCR stosuje się do kompensacji prądów opóźniających, falowniki oparte na tyrystorach GTO - do prądów wyprzedzających. Generalnie, obciążalność tyrystorów GTO jest niższa od tyrystorów SCR. Dlatego kombinacja falownika opartego na

tyrystorach SCR z dwoma falownikami opartymi na tyrystorach GTO jest najbardziej wskazana.

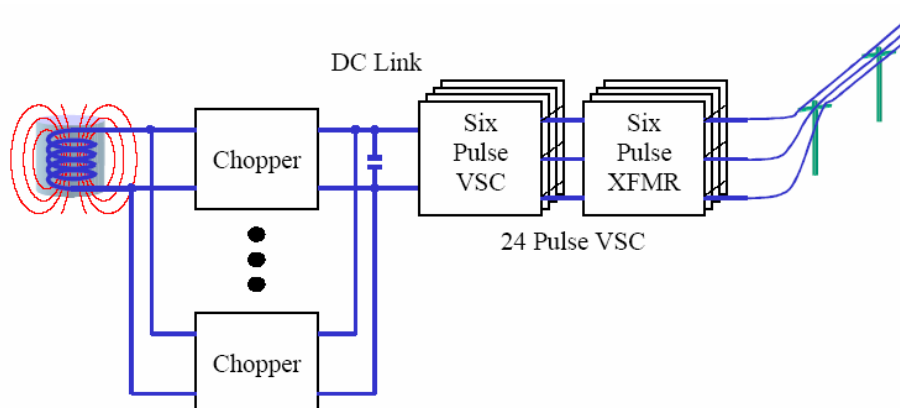


Rys. 5.4. Schemat hybrydowych falowników prądu [31]

5.3. ZASOBNIK OPARTY NA POŁĄCZENIU PRZERYWACZA DC/DC Z FALOWNIKIEM NAPIĘCIA

Zupełnie inną metodę wykorzystuje układ poprawiania jakości mocy oparty na przerywaczu DC/DC i falowniku napięcia (rys. 5.5). W tym układzie przerywacz DC/DC zamienia prąd stały elektromagnesu nadprzewodnikowego na napięcie stałe wykorzystywane następnie jako napięcie wejściowe falownika napięcia (VSI). Falownik napięcia wykorzystuje cztery pulsy (połówki) z sześciopulsowego falownika napięcia. Połączenie stałoprądowe przekształtników można traktować jako bufor pomiędzy siecią elektroenergetyczną a zasobnikiem. Zapewnia to dobrą izolację elektromagnesu nadprzewodnikowego od zakłóceń płynących z sieci elektroenergetycznej. Układ taki nie wymaga aż tak dużych mocy jak układ z falownikiem prądu, redukuje natomiast harmoniczne prądu po stronie sieci elektroenergetycznej. Prąd elektromagnesu nadprzewodnikowego, który jest sztywnym źródłem prądowym, jest

przekształcany w napięcie za pomocą licznych dwukwadrantowych przekształtników DC/DC [31]. Zasobnik podłączony jest do przerywacza DC/DC pozwalającego na dwukierunkowy przepływ energii złączem stałoprądowym. Złącze to połączone jest ze stałoprądową stroną trójfazowego falownika napięcia, który połączony jest równoległe z siecią zasilającą przez trzy cewki linii przemiennoprądowej. Sekcja DC/AC układu kondycjonera mocy ma taką samą topologię jak bocznikowy aktywny filtr mocy [6]. Konfiguracja taka odseparowuje elektromagnes zasobnika od sieci i redukuje efekty wystawienia zasobnika na zakłócenia sieci elektroenergetycznej.



Rys. 5.5. Układ kondycjonera mocy oparty na układzie łączonym przekształtników; chopper - przerywacz DC/DC, six pulse VSC - sześciopulsowy falownik napięcia, six pulse XFMR - transformator sześciopulsowy, DC link - złącze stałoprądowe [31]

Powyższy układ poprawy jakości energii umożliwia kontrolowany dwukierunkowy przepływ mocy czynnej, dostarcza zarówno pojemnościową jak i indukcyjną moc. Dzięki takiemu rozwiązaniu kilka różnych zadań, takich jak kompensacja mocy biernej, redukcja harmonicznych, czy „wygładzanie” obciążeń impulsowych, może być wykonywanych w tym samym czasie. Obecność zasobnika energii pozwala układowi na kompensację zjawiska migotania wprowadzanego przez urządzenia impulsowe. Sekcja filtra aktywnego układu zasobnika pozwala na kompensację mocy biernej, redukcję harmonicznych prądu i eliminację niezrównoważenia prądu obciążenia. Kompensacja migotań powoduje wygładzanie zmian mocy źródłowej powodowanych włączaniem i wyłączaniem odbiornika. Podczas tych stanów przejściowych układ PCS dostarcza mocy równej różnicy mocy chwilowej obciążenia i jej wartości

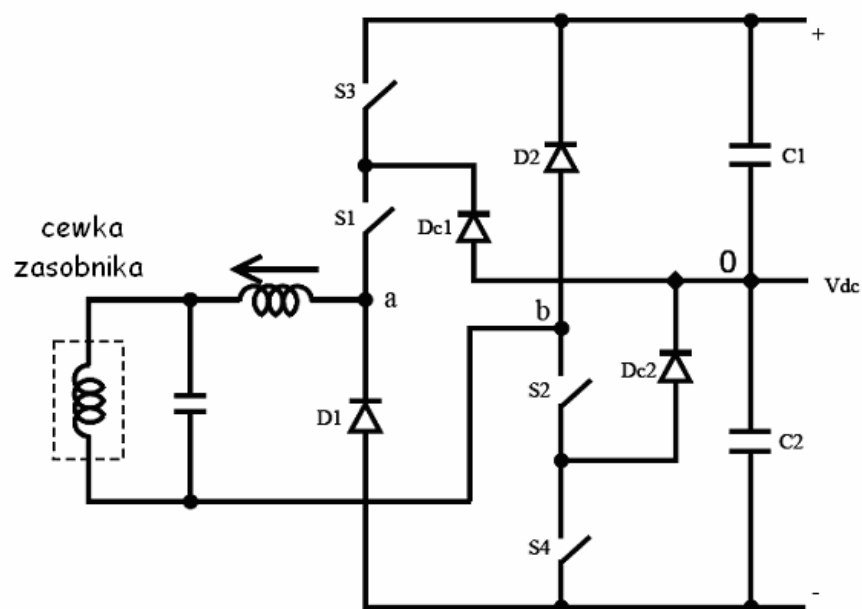
średniej. Falownika napięcia (VSI) używa się do bezpośredniego sterowania prądami w cewkach linii AC. W ten sposób prądy źródłowe mają kształt dokładnie taki, jak zrównoważone i sinusoidalne przebiegi odniesienia w każdych warunkach pracy. W konsekwencji osiąga się zrównoważone i sinusoidalne prądy źródłowe z jednostkowym współczynnikiem mocy, nawet przy zakłóceniach napięcia pochodzących z sieci. Zrównoważone i sinusoidalne przebiegi prądów źródłowych generowane są przez układ sterowania przepływem mocy.

5.3.1. Przerwywacz DC/DC

Zadaniem regulatora DC/DC (DC-DC chopper) jest sterowanie przepływem mocy przez elektromagnes nadprzewodnikowy. Kiedy elektromagnes zasobnika jest rozładowany, przerwywacz DC/DC podłącza jego uzwojenie do napięcia złącza stałoprądowego, dzięki czemu prąd elektromagnesu rośnie, wymuszając przepływ mocy przez złącze DC do zasobnika. Jeśli potrzebne jest rozładowanie elektromagnesu, regulator DC/DC dostarcza uzwojeniu przeciwnego napięcia. Stopień naładowania/rozładowania kontrolowany jest napięciem na zaciskach uzwojenia nadprzewodnikowego. Innymi słowy, regulator DC/DC zmienia wartości napięcia złącza DC do odpowiednich napięć wymaganych dla przepływu energii do i z elektromagnesu zasobnika. Aby uzyskać wymaganą dynamiczną reakcję, konieczna jest wysoka częstotliwość przełączania (powyżej 20 kHz). Podczas gdy tyrystory GTO i SCR spełniają wymagania co do wysokiego napięcia złącza DC, to nie mogą pracować przy częstotliwościach przełączania większych niż kilka kHz. Tranzystor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) spełnia zaś wymagania co do częstotliwości przełączania, ale nie posiada aż tak wysokich parametrów prądowych i napięciowych, jak tyrystory GTO czy SCR. Dlatego, aby uzyskać żądane parametry napięciowe przekształtnika z tranzystorami IGBT, koniecznym jest użycie topologii wielopoziomowej. Rysunek 5.6 przedstawia schemat trójpoziomowego przerwywacza DC/DC.

Konwencjonalne przekształtniki uzyskują wyższe parametry napięciowe przez łączenie urządzeń przełączających szeregowo. Dużym problemem takich przekształtników jest poprawny podział napięcia, zwłaszcza podczas przejść włączania i wyłączania. Podczas tych przejść jedno urządzenie przełączające może włączyć się szybciej, wystawiając tym samym inne na blokowanie napięcia znacznie wyższego niż spodziewane. Problemy takie nie występują w topologii wielopoziomowej. Zapewnia ona podział napięcia poprzez redukcję (clamping) napięcia przełącznika do $V_{DC}/2$ za pomocą diod Dc1 i Dc2 widocznych na rys. 5.6. Diody D1 i D2 muszą być w stanie blokować pełne napięcie V_{DC} . Diody nie mają takich trudności z dzieleniem napięcia, jak

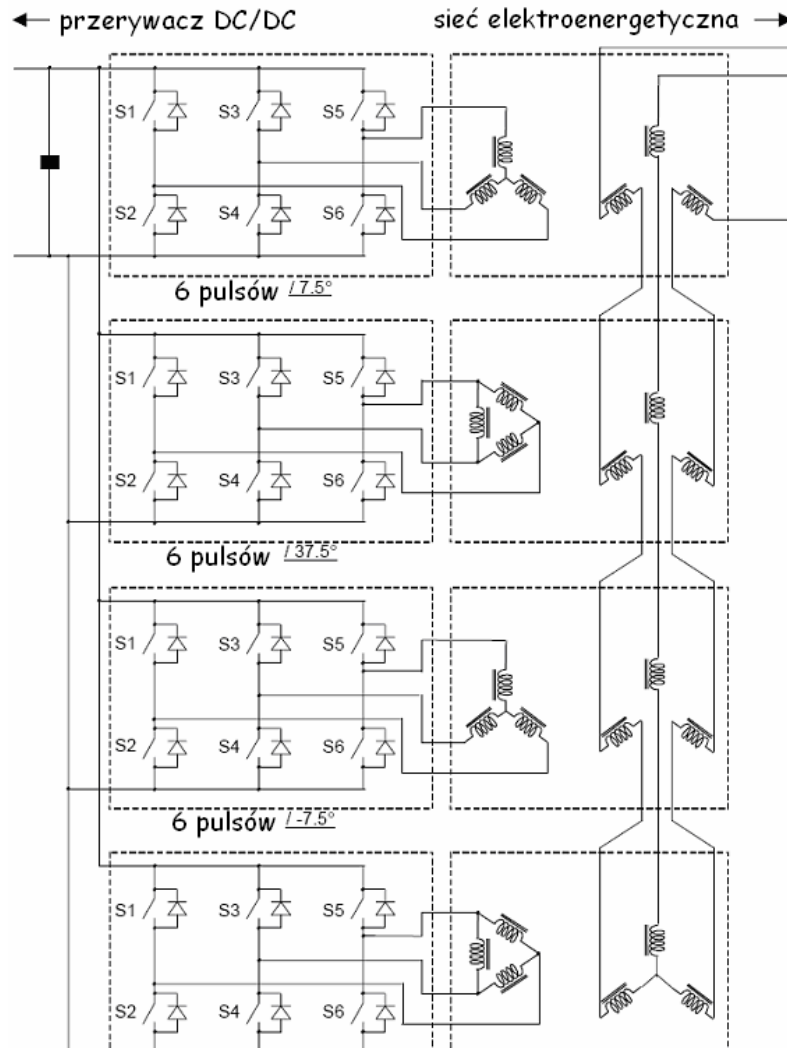
przełączniki aktywne i można je łączyć szeregowo, aby spełniały wymagania napięciowe. Problemem wynikającym z użycia topologii wielopoziomowej jest utrzymanie równowagi stanu naładowania kondensatorów złącza stałoprądowego.



Rys. 5.6. Schemat przerywacza DC/DC [31]

5.3.2. Falownik napięcia

Przerywacz DC/DC połączony jest z falownikiem napięcia za pomocą złącza stałoprądowego tworząc tym samym kompletny system kondycjonowania mocy. Falownik napięcia składa się z czterech modułów sześciopulsowych tworząc 24-pulsowy falownik napięcia. Moduły połączone są ze sobą transformatorami (rys. 5.7). Uzwojenia pierwotne transformatorów połączone są ze sobą szeregowo i następnie podłączone do sieci elektroenergetycznej. Cztery sześciopulsowe mostki przekształtników z transformatorami stanowią jeden 24-pulsowy przekształtnik. 24-pulsowy przebieg napięcia przemiennego można wygenerować, sterując czasami przełączeń w taki sposób, aby przesunięcie fazowe sześciopulsowych modułów wynosiło 15° [31].



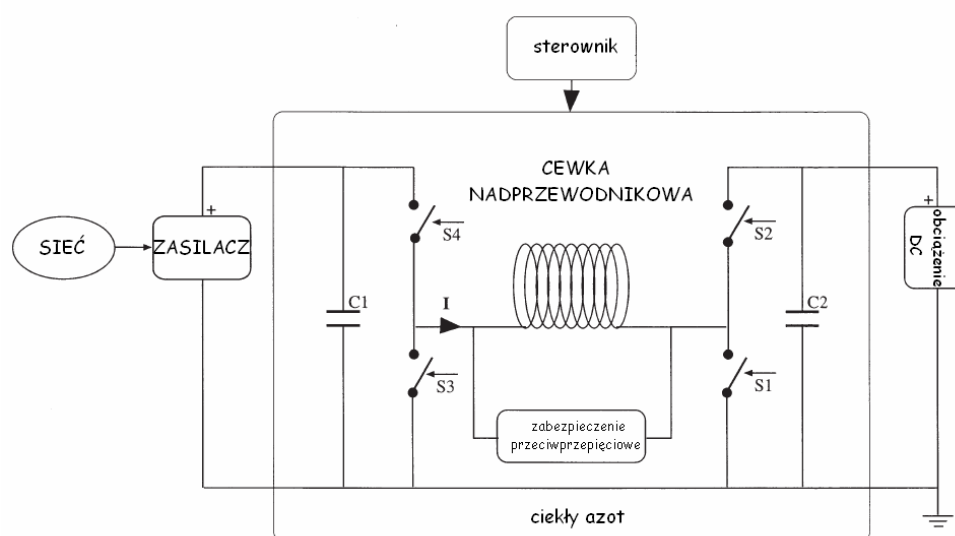
Rys. 5.7. Budowa 24-pulsowego falownika napięcia [31]

Podczas procesu ładowania elektromagnesu nadprzewodnikowego przekształtnik pracuje jak prostownik podwyższający napięcie (boost rectifier). Podłączony jest do trójfazowej sieci elektroenergetycznej z jednej strony i poprzez złącze stałoprądowe z przerywaczem DC/DC. Jego zadaniem w tym trybie pracy jest utrzymanie wymaganego napięcia złącza DC. Kiedy energia pobierana jest z elektromagnesu nadprzewodnikowego, przekształtnik VSC pracuje jako falownik napięcia. W tym trybie przerywacz DC/DC musi utrzymać napięcie złącza stałoprądowego przez transfer

energii z elektromagnesu. Falownik napięcia musi pobrać energię ze złącza DC żeby zasilić trójfazowe obciążenie.

5.4. INNE UKŁADY

Inne rozwiązanie układu elektrycznego łączącego nadprzewodnikowy zasobnik energii z siecią elektroenergetyczną i obciążeniem przyjęto w pracy [12]. Schemat obwodu elektrycznego zasobnika obrazuje rys. 5.8.



Rys. 5.8. Schemat obwodu elektrycznego nadprzewodnikowego zasobnika energii [12]

Ważnym elementem obwodu jest przekształtnik generujący dodatnie i ujemne impulsy do ładowania i rozładowywania cewki nadprzewodnikowej. Dwa układy kondensatorów: C1 przy urządzeniu ładującym i C2 przy obciążeniu, używane są do przekształcenia napięcia na prąd w elektromagnesie i odwrotnie. Uzwojenie elektromagnesu połączone jest z czterema przełącznikami tworzącymi konfigurację mostkową. Elektromagnes chroniony jest także przed przepięciem mogącym wystąpić podczas awarii. Odpowiednie przełączenia odpowiadają za różne stany pracy układu (tab. 5.1). Kiedy przełączniki 1 i 4 są zamknięte, a 2 i 3 otwarte, elektromagnes nadprzewodnikowy jest ładowany ze źródła stałoprądowego. Kiedy przełączniki 2 i 3 są zamknięte, a 1 i 4 otwarte, zachodzi proces rozładowywania. Kiedy przełączniki 1 i 3

są zamknięte, a 2 i 4 otwarte, elektromagnes jest w stanie „persistent” - w obwodzie zamkniętym elektromagnesu nadprzewodnikowego płynie ustalony prąd. Stan ten jest włączany, kiedy nie trzeba ani ładować ani rozładowywać elektromagnesu. Ustawienia przełączników dla różnych stanów pracy zasobnika zestawiono w tab. 5.1.

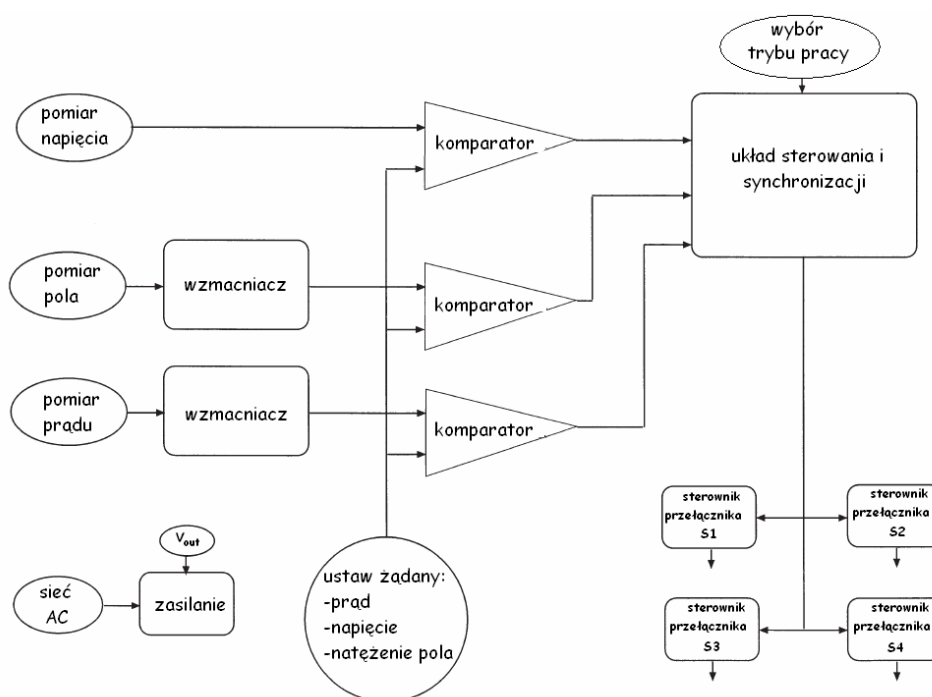
Tab. 5.1. Ustawienia przełączników obwodu zasobnika nadprzewodnikowego i odpowiadające im stany pracy układu [12]

stan pracy układu	stan przełącznika			
	S1	S2	S3	S4
ładowanie	zamknięty	otwarty	otwarty	zamknięty
prąd stały	zamknięty	otwarty	zamknięty	otwarty
rozładowywanie	otwarty	zamknięty	zamknięty	otwarty
jednoczesne ładowanie i rozładowywanie „through”	otwarty	zamknięty	otwarty	zamknięty

Aby zredukować straty energii w przekształtniku, większość jego elementów zanurzona jest w ciekłym azocie. Rezystancja przełączników spada z 7 mΩ w temperaturze pokojowej do 2 mΩ w temperaturze ciekłego azotu. Tranzystory MOSFET wykazują mniejszą rezystancję w porównaniu z innymi przełącznikami w temperaturze ciekłego azotu. W układzie z rys. 5.8 baterię kondensatorów C1 narażonych na duże prądy zanurzono w ciekłym azocie aby zredukować straty w przewodach. W tym przypadku użyto kondensatorów poliestrowych, mających niską gęstość energii, ale utrzymujących swoją pojemność w 77 K. Pozostała część kondensatorów tantalowych została umieszczona w temperaturze około 0°C. Schemat logiczny sterowania przełącznikami pokazany jest na rys. 5.9.

Nadprzewodnikowy zasobnik energii może pracować w trybie przekształtnika, w którym elektromagnes jest automatycznie przełączana pomiędzy trzema stanami pracy zależnie od uwarunkowanego napięcia obciążenia i prądu elektromagnesu. Sondy mierzące pole i prąd obrazują ilość zgromadzonej energii w zasobniku. Odczyty z tych sond porównywane są z dwoma krańcowymi wartościami w komparatorach. Jeśli prąd elektromagnesu spadnie poniżej mniejszej wartości granicznej, sterownik ustawi przełączniki w stan ładowania. Utrzymywany jest on dopóki prąd nie osiągnie żądanej nastawianej wartości. Sonda napięciowa mierzy napięcie na obciążeniu. Wartość ta porównywana jest także

z dwoma wartościami krańcowymi. Poniżej minimalnej wartości nastawiany jest stan rozładowywania i trwa aż do osiągnięcia maksymalnej wartości napięcia obciążenia. Wartości krańcowe zarówno napięcia obciążenia jak i prądu mogą być nastawiane przez użytkownika. Pomiędzy tymi dwoma stanami, kiedy nie wymagane jest ani ładowanie ani rozładowywanie, prąd krąży w nadprzewodnikowym uzwojeniu elektromagnesu. W stanie pracy ustalonej straty energii zależą od prądu elektromagnesu i od rezystancji przełączników S1 i S3.



Rys. 5.9. Schemat logiczny sterowania układu przełączającego [12]

W temperaturze 77 K bądź niższej straty te są niewielkie. Aby kompensować straty energii, elektromagnes ładowany jest impulsami napięcia o wartości 10 V. Czas trwania impulsu wynosi 1 ms, a ich częstotliwość 5 Hz.

Unikalną właściwością nadprzewodnikowego zasobnika energii pracującego w trybie przekształtnika jest możliwość jego jednoczesnego ładowania i rozładowywania [12]. W tym ulepszonym trybie, ładowanie uzwojenia wysokotemperaturowego może się pokrywać z jej rozładowywaniem. Korzyść z zastosowania takiej konfiguracji jest oczywista: niezależność operacji ładowania i rozładowywania umożliwia rozciągnięcie czasów trwania każdego stanu pracy do pełnego cyklu.

W najprostszym przypadku, jeżeli napięcie zasilacza równe jest napięciu wyjściowemu DC, to podwojona zostanie moc na wyjściu, podczas gdy wymiary elektromagnesu i koszty pracy pozostaną niezmiennie. Jednoczesne ładowanie i rozładowywanie osiąga się przy zamkniętych przełącznikach S2 i S4 i otwartych S1 i S3. W tab. 5.1 stan ten przedstawiony jest jako „through”. W tym stanie operacje ładowania i rozładowywania są niezależne.

5.5. PODSUMOWANIE

Układy zbudowane na bazie falowników prądu mają stosunkowo prostą budowę, ale przy współpracy z nadprzewodnikowymi zasobnikami energii ich moc musiałaby być bardzo duża, a ich wyniki pozostają niezadowolające. Ponadto układy takie nie izolują samego zasobnika energii od sieci elektroenergetycznej, przez co wszelkie zakłócenia pochodzące z sieci bez przeszkód oddziałują na elektromagnes zasobnika. Lepszym rozwiązaniem jest się układ złożony z szeregowego połączenia wielopoziomowego dwukwadrantowego przerywacza DC/DC (chopper) i przekształtnika opartego na falowniku napięcia (VSC - Voltage Source Converter). Przez zastosowanie złącza stałoprądowego łączącego przekształtnik DC/DC z falownikiem napięcia skutecznie odizolowano uzwojenie elektromagnesu zasobnika od wpływów zakłóceń sieci elektroenergetycznej. Złącze to stanowi bufor pomiędzy zasobnikiem i siecią elektroenergetyczną. Wielopoziomowa budowa układu i zastosowanie szybkich tranzystorów IGBT pozwala na zastosowanie szybkiej modulacji impulsów PWM. Cały układ ma przez to mniejszą moc, mniejsze straty mocy oraz mniejszy koszt niż odpowiednik zbudowany na bazie falownika prądu (CSI) [31].

5.6. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 5

- [1] Arsoy A. B., Wang Z., Liu Y., Ribeiro P. F., *Transient Modeling and Simulation of a SMES Coil and the Power Electronics Interface*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 4, December 1999, pp. 4715-4724.
- [2] Aware M. V., Sutanto D., *Improved controller for power conditioner using high-temperature superconducting magnetic energy storage (HTS-SMES)*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 1, March 2003, pp. 38-47.
- [3] Baba J., Nitta T., Shirai Y., Akita S., Hayashi Y., Kabayashi Y., *Power converter for SMES by use of ICB energy transfer circuit*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, March 2001, pp. 1856-1859.
- [4] Biskup T., Bühner C., Grzesik B., Krijgsman J., Michalak J., Pasko S., Stępień M., Zygmanski M., *Control system of power conditioning system with Superconducting Magnetic Energy Storage in different operation conditions*, Politechnika Śląska, preprint.
- [5] Carroll E. I., *Power electronics for very high power applications*, London, September 1998, ABB Semiconductors AG, preprint.
- [6] Casadei D., Grandi G., Rossi C., *A Parallel Power Conditioning System with Energy Storage Capability for Power Quality Improvement in Industrial Plants*, Dipartimento Di Ingegneria Elettrica Università degli Studi di Bologna, preprint.
- [7] Celanovic N., *Space vector modulation and control of multilevel converters*, PhD Thesis, Blacksburgh, Virginia, 2000.
- [8] <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10022000-00180032>
- [9] Celanovic N., Lee D.H., Peng D., Borojevic D., Lee F.C., *Control Design for Superconductive Magnetic Energy Storage Power Conditioning System*, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University, preprint.
- [10] Cerulli J., *Operational experience with a superconducting magnetic energy storage device at Brookhaven National Laboratory*, New York, January 2000.
- [11] Dai T., Fan Z., Li J., Tang Y., Cheng S., Pan Y., Wang J., *Design study on 50 kJ HTS SMES for simulated dynamic experiment of*

- electric power systems*, Physica C no. 412–414, 2004, pp. 1239–1243.
- [12] Fleisher T., *Technology assessment of superconducting magnetic energy storage*, The proceedings of the IEA Symposium on Use of Superconductivity in Energy Storage, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, October 1994, pp. 350-355.
- [13] Friedman A., Shaked N., Perel E., Sinvani M., Wolfus Y., Yeshurun Y., *Superconducting magnetic energy storage device operating at liquid nitrogen temperatures*, Cryogenics no. 39 (1999) pp. 53–58.
- [14] Friedman A., Shaked N., Perel E., Gartzman F., M. Sinvani, Y. Wolfus, Kottick D., Furman J., Yeshurun Y., *HT-SMES operating at liquid nitrogen temperatures for electric power quality improvement demonstrating*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, June 2003, pp. 1875-1878.
- [15] Gandy S., *A guide to the suitability of electrical energy storage systems for various applications, and an assessment of possible policy effects*, Imperial College of Science, Technology and Medicine, MSc thesis, September 2000.
- [16] Hassenzahl W. V., *Superconducting magnetic energy storage*, Proceedings of the IEEE, vol. 71, no. 9, September 1983, pp. 1089-1098.
- [17] Hirano N., *Superconducting magnetic energy storage (SMES) - Development of oxide SMES for bridging instantaneous voltage droops at Chubu Electric Power Co., Inc.*, Superconductivity Web21, April 2005, www.istec.or.jp/Web21/index-E.html.
- [18] Hirotaka Ch., Kazuo H., Toshiyuki M., Kagao O., Ryo A., *Development of power converter for SMES designed to protect from momentary voltage drop*, October 21, 2003, Conference "Magnet Technology" MT-18, Morioka, Japan, preprint.
- [19] Kolluri S., Application of *Distributed Superconducting Magnetic Energy Storage System (D-SMES) in the Energy System to Improve Voltage Stability*, www.transmission.bpa.gov EmergVoltStabControlKolluri.pdf
- [20] Li H., Baldwin T. L., Luongo C. A., Zhang D., *A multilevel power conditioning system for superconductive energy storage*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, June 2005, pp. 1943-1946.

- [21] Ichinose A., Kasahara H., Sakaki H., Akita S., Ishiyama A., Maruyama A., Koso S., *Research and development of high-Tc SMES*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, June 2005, pp. 1947-1950.
- [22] Iglesias I. J., Acero J., *Comparative and simulation of optimal converter topologies for SMES systems*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 5, no. 2, June 1995, pp. 254-257.
- [23] Iglesias I. J., Bautista A., Visiers M., *Experimental and simulated results of a SMES fed by a current source inverter*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 7, no. 2, June 1997, pp. 861-864.
- [24] Juengst K. P., Kaugerts J., *SMES compensator for fluctuating loads*, 15th Int. Conf. Magnet Technology, October 20-24, 1997, Beijing, China, Proceedings Science Beijing (1998), pp. 494-497.
- [25] Juengst K. P., *Status and future planning of SMES projects in Europe*, ISTEC Journal, vol. 12, no. 3, 1999, pp. 29-35, www.istec.or.jp/Web21/index-E.html.
- [26] Juengst K. P., Gehring R., Kudymow A., Kuperman G., Suess E., *25 MW SMES-based power modulator*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, March 2002, pp. 758-761.
- [27] Juengst K. P., Gehring R., Kudymow A., Pfisterer H. J., Suess E., *SMES compensator with a toroidal magnet system*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, March 2002, pp. 754-757.
- [28] Kalsi S. S., Aized D., Connor B., Snitchler G., Campbell J., Schwall R. E., Kellers J., *HTS SMES magnet design and results*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 7, no. 2, June 1997, pp. 971-976.
- [29] Karner J. F., Lorenzen H. W., Rosenbauer F., Schaller J., Schottler R., *A protection system for small high power SMES with power semiconductors working at cryogenic temperature*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 5, no. 2, June 1995, pp. 266-269.
- [30] Kaugerts J., Gracfenstein A., Juengst K. P., Maurer W., Sugimoto M., *Magnet and superconductor development for a high power SMES based power modulator*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 10, no. 1, March 2000, pp. 824-827.

- [31] Kreutz R., Salbert H., Krischel D., Hobl A., Radermacher Ch., Blacha N., Behrens P., Dutsch K., *Design of a 150 kJ high - T_c SMES (HSMES) for a 20 kVA uninterruptible power supply system*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, June 2003, pp. 1860-1862.
- [32] Lee D. H., *A Power Conditioning System for Superconductive Magnetic Energy Storage based on multi-level Voltage Source Converter*, Virginia Polytechnic Institute and State University, PhD Thesis, 1999, <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-071399-122308>.
- [33] Luongo C., *Research opportunities in applied superconductivity for Mechanical and Electrical Engineering students at CAPS and NHMFL*, prezentacja ME Seminar, October, 2002, www.eng.fsu.edu/departments/mechanical/labs/hilites/presentations/luongo.pdf
- [34] Luongo C. A., Baldwin T., Ribeiro P., Weber Ch., *A 100 MJ SMES demonstration at FSU-CAPS*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, June 2003, pp. 1800-1805.
- [35] Luongo C. A., *Superconducting storage systems: an overview*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 4, July 1996, pp. 2214-2223.
- [36] Mikkonen R., Kalliohaka T., Korpela A., Lehtonen J., *A 0,2 MJ cryogen free Nb₃Sn SMES in UPS application*, Superconductor Science and Technology, no. 16, 2003, pp. 946-950.
- [37] Mitani Y., Murakami Y., Tsuji K., *Experimental study on stabilization of model power transmission system by using four quadrant active and reactive power control by SMES*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-23, no. 2, March 1987, pp. 541-544.
- [38] Mito T., *Superconducting magnetic energy storage (SMES) - development of conduction-cooled LTS pulse coil for UPS-SMES as a protection from instantaneous voltage drops at National Institute for Fusion Science (NIFS)*, Superconductivity Web21, April 15, 2005, www.istec.or.jp/Web21/index-E.html
- [39] Nagaya S., *Superconducting magnetic energy storage (SMES) - toward the completion of SMES - objectives of the project of superconducting power network control technology development*, Superconductivity Web21, April 2005, www.istec.or.jp/Web21/index-E.html

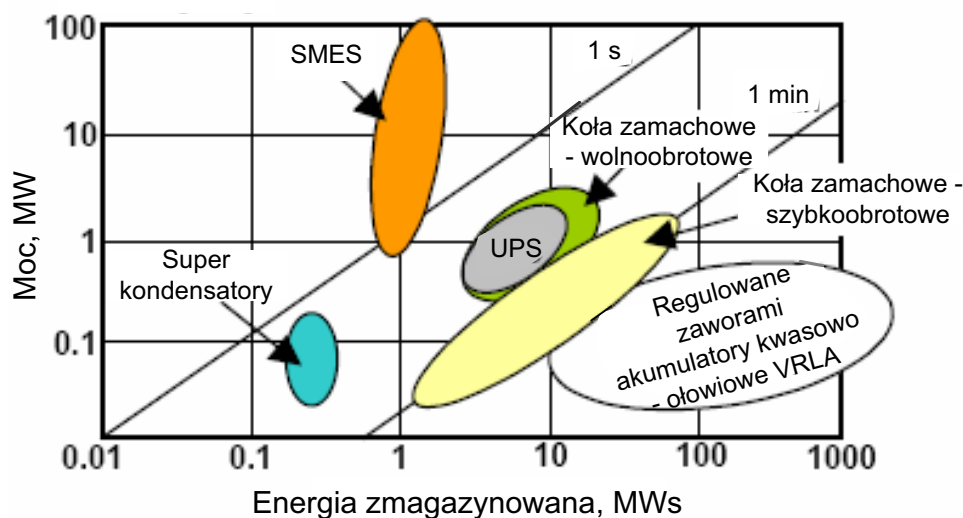
- [40] Nagaya S., Hirano N., Johhgo Y., Ioka S., Shimada M. Hasegawa T., *Development of the Bi-2212 superconductor for high voltage magnets and evaluation of the temperature and magnetic stability*, Chubu Electric Power Co., Inc., Conference CIGRE, no. 15-403, Paris 2002.
- [41] Netter D., Leveque J., Rezzoug A., *Analytical design of a superconducting magnetic energy storage for pulsed power peak*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, no. 5, September 1996, pp. 5139-5141.
- [42] Ohsaki H., Taniguchi S., Nagaya S., Akita S., Koso S., Tatsuta M., *Development of SMES for power system control: present status and perspective*, Physica C no. 412–414, 2004, pp. 1198–1205.
- [43] Rogers J. D., Barron M. H., Boenig H. J., Criscuolo A. L., Dean J. W., Schermer R. I., *Superconducting magnetic energy storage for BPA transmission line stabilization*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-19, no. 3, May 1983, pp. 1078-1080.
- [44] Rufer A., *Solutions for storage of electrical energy*, Laboratoire d'électronique industrielle, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2003.
- [45] Salbert H., Krishel D., Hohl A., Schillo M., Blacha N., Tromm A., Roesgen W., *2 MJ SMES for an uninterruptible power supply*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 10, no. 1, March 2000, pp. 777-779.
- [46] Sannino A., Svensson J., Larsson T., *Power-electronic solutions to power quality problems*, Electric power systems research, no. 66, 2003, pp. 71-82.
- [47] Sannino A., Miller M. G., Bollen M. H. J., *Overview of Voltage Sag Mitigation*, Department of Electrical Engineering University of Palermo, Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden.
- [48] Schnyder G., Sjoström A., *SMES, HTS in power systems - report no. 18*, www.lanoswww.epfl.ch/studinfo/courses/cours_supra/smes/Report_18%20SMES.pdf
- [49] Seong K. C., Kim H. J., Cho J. W., Kwon Y. K., Ryu K. S., Yu I. K., Hahn S. Y., *Current status of SMES in Korea*, Cryogenics, no. 42, 2002, pp. 351-355.

- [50] Seong K. C., Kim H. J., Kim S. W., Cho J. W., Kwon Y. K., Hahn S. Y., Jeon H. J., Yu I. K., *Fabrication and test of a 1 MJ SMES system*, September 24, 2001, preprint.
- [51] Shikimachi K., *Superconducting magnetic energy storage (SMES) - SMES field test at Kameyama Plant*, Sharp Corp., Superconductivity Web21, April 2005, www.istec.or.jp/Web21/index-E.html.
- [52] Steurer M., Luongo C. A., Ribeiro P. F., Eckroad S., *Interaction between a superconducting coil and the power electronics interface on a 100 MJ SMES system*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, June 2003, pp.1806-1809.
- [53] Superczynski M. J., *Analysis of the power conditioning system for a superconducting magnetic energy storage unit*, Virginia Polytechnic Institute and State University, MSc Thesis, 2000.
- [54] Surdacki P., *Nadprzewodnikowe zasobniki energii - postępy technologii i zastosowań*, Przegląd Elektrotechniczny, Rok LXXIX, Nr. 9, 2003, pp. 605-61.
- [55] Terazono K., Hatabe Y., Kimura H., Hayashi H., Taniguchi S., Arika M., Semba T., Asano K., Ishii T., Ikeda R., Koso S., Tsuji T., Abe H., Tatsuta Y., Osaki H., *Verification test results of the experimental model coil for power system stabilization*, Physica C 412-414, 2004, pp. 1251-1255.

6. WSPÓŁPRACA NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKÓW ENERGII Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

6.1. WPROWADZENIE

Wzrost wytwarzania energii elektrycznej z rozproszonych źródeł odnawialnych związany z wymaganiami ochrony środowiska, powodował dążenie do ograniczenia zapasów stabilności, szczególnie w postaci tzw. rezerwy wirującej. Wskutek tego niezawodna i stabilna praca współczesnych układów energetycznych w dużym stopniu zależy od urządzeń stabilizujących. Urządzenia te powinny zapewniać wystarczające tłumienie układu podczas stanów przejściowych następujących po zakłóceniach takich jak przełączenia linii, zmiany obciążeń i wyłączenia zwarć oraz wymaganą jakość energii. W celu uniknięcia załamania się systemu z powodu utraty synchronizmu lub niestabilności napięcia stosuje się środki zaradcze w postaci stabilizatorów, układów optymalnego sterowania regulatora turbiny i przesuwników fazowych. Zasobniki nadprzewodnikowe mogą być wykorzystane do realizacji powyższych zadań. Zastosowania układów SMES można podzielić na dwie grupy, układy poprawy stabilności układu elektroenergetycznego i układy poprawy jakości energii.



Rys. 6.1. Obszary zastosowań zasobników energii [6]

Zakresy mocy dla różnych rodzajów zasobników energii przewidywanych do zastosowania w systemie wytwarzania, przesyłania i rozdzielania energii przedstawiono na rysunku 6.1.

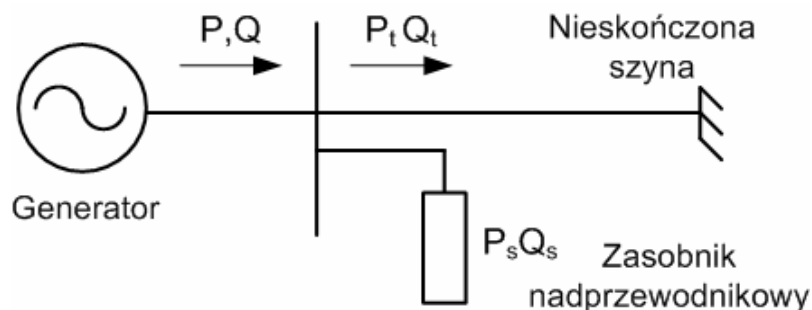
6.2. UKŁADY POPRAWY STABILNOŚCI SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

6.2.1. Redukcja drgań w układzie

Granice stabilności układu elektroenergetycznego określone są zwykle oscylacjami o niskiej częstotliwości (0,5-1 Hz), które następują po większym zakłóceniu w układzie. Po odłączeniu linii przesyłowej lub generatora, w celu zabezpieczenia przed wystąpieniem narastających oscylacji często ogranicza się przesył energii. Moc przesyłu, ograniczona przez długotrwałą stabilizację, może być zwiększona przez aktywne tłumienie tych oscylacji. Zasobnik nadprzewodnikowy może aktywnie zmniejszać oscylacje poprzez modulację zarówno mocy czynnej jak i biernej, dzięki czemu może być bardziej skuteczny od innych technologii [7].

6.2.2. Poprawa stabilności napięcia

W przypadku dynamicznych niestabilności wywołanych zanikiem generacji napięcia lub przeciążeniem linii przesyłowych, dynamiczna moc bierna jest niewystarczająca do podtrzymania napięcia w układzie elektroenergetycznym. Napięcia w sieci zanikają wtedy powoli (5-15 min.).



Rys. 6.2. Układ przesyłowy z jednostką SMES do redukcji oscylacji układu

Układ zasobnika nadprzewodnikowego może wtedy łagodzić te dynamiczne niestabilności napięcia poprzez równoczesne dostarczanie zarówno mocy czynnej jak i biernej, aż do ponownego przyłączenia do linii generatora lub zlikwidowania niestabilności napięcia, rys. 6.2. Moc bierna

Q_s może być sterowana przy użyciu zasobnika nadprzewodnikowego przyłączonego do szyn zbiorczych w celu poprawy stabilności jej napięcia.

6.3. UKŁADY POLEPSZANIA JAKOŚCI ENERGII

6.3.1. Rezerwa wirująca

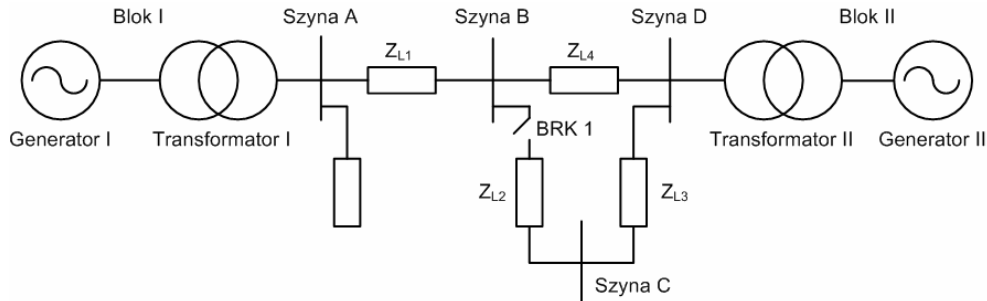
Dla zapewnienia ciągłości zasilania określona liczba urządzeń generujących utrzymywana jest w ruchu w stanie jałowym (nieobciążonym), stanowiąc tzw. wirującą rezerwę [2]. Zazwyczaj rezerwa ta powinna wynosić aż 7% obciążenia układu. Ponieważ zasobniki nadprzewodnikowe mogą przechowywać znaczną ilość energii, jest możliwe zapewnienie przez nie wystarczającej rezerwy wirującej do chwili, aż przyłączone zostaną generatory z turbiną gazową. Wykorzystanie zasobników nadprzewodnikowych zamiast wirującej rezerwy jest bardziej opłacalne, gdyż jest to praktycznie bezstratna forma przechowywania energii, podczas gdy użycie generatorów wiąże się ze znacznymi stratami energii i dużymi kosztami utrzymania w ruchu.

6.3.2. Elastyczne układy przesyłowe FACTS

Układy nadprzewodnikowych zasobników energii można skonfigurować tak, aby współpracowały one z układami elastycznego przesyłu prądu przemiennego FACTS (Flexible AC Transmission Systems), rys. 6.3 [6]. Falowniki układów FACTS i kondycjonery nadprzewodnikowe są skonfigurowane w bardzo podobny sposób. Układy FACTS pracują jednak z energią dostarczaną z sieci. Zasobniki nadprzewodnikowe mogą polepszać charakterystyki układów FACTS poprzez dostarczanie większej mocy czynnej w stosunku do mocy biernej. Statyczny kompensator synchroniczny (StatCom) może tylko pobierać lub dostarczać moc bierną i jest ograniczony do długotrwałego wspomaganie sieci elektroenergetycznej. Wprowadzenie przez układ SMES-a dodatkowej energii umożliwia kompensatorowi StatCom „wstrzyknięcie” do sieci lub odebranie równocześnie mocy czynnej i biernej, co poprawia działanie układu elektroenergetycznego. Zintegrowanie sterownika FACTS z zasobnikiem nadprzewodnikowym następuje poprzez przyłączenie elektromagnesu nadprzewodnikowego do kompensatora StatCom opartego na falowniku zasilanym ze źródła napięciowego, w celu tłumienia dynamicznych oscylacji układu elektroenergetycznego.

W zależności od lokalizacji układu zintegrowanego StatCom-SMES, równoczesne sterowanie mocą czynną i bierną może polepszyć stabilność układu i jakość energii sieci przesyłowej. Ponadto układ StatCom-SMES

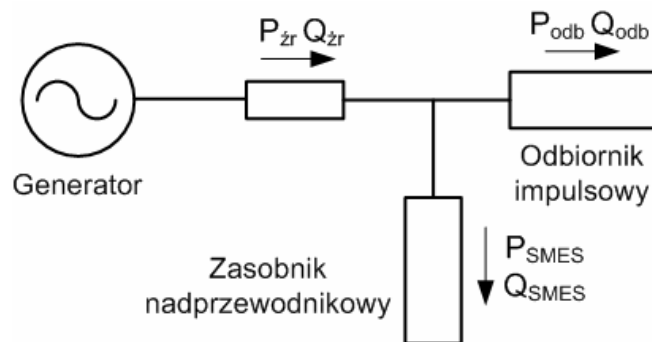
przyłączony do szyn zbiorczych blisko generatora (szyna A na rys. 6.3) wykazuje dużą skuteczność w tłumieniu przejściowych oscylacji elektro-mechanicznych spowodowanych przez zwarcia trójfazowe [5], [6].



Rys. 6.3. Współpraca zasobnika nadprzewodnikowego z układem FACTS sieci energetycznej

6.3.3. Równoważenie obciążeń impulsowych

Układy SMES-ów są obiecującymi urządzeniami do równoważenia fluktuacji mocy czynnej i biernej wywołanych obciążeniami impulsowymi, występującymi w przemysłowych instalacjach produkcyjnych, eksperymentalnych elektrowniach opartych na syntezie jądrowej i w podstacjach zasilających szybkie koleje. Na rys. 6.4 przedstawiono typowy układ kompensacji impulsowych obciążeń zlokalizowany blisko końcowego odbiorcy.

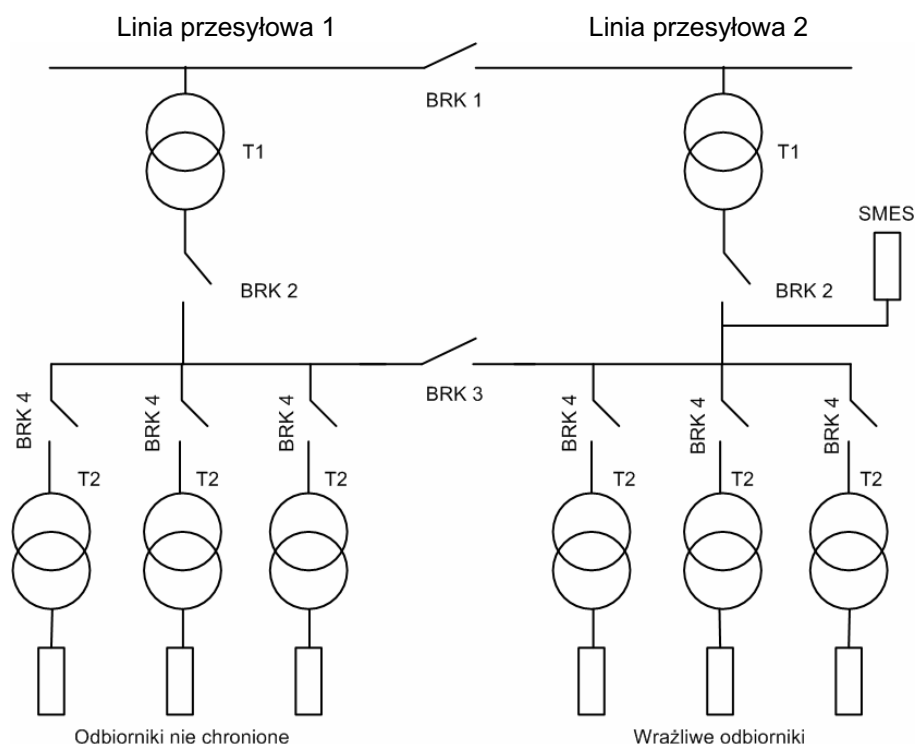


Rys. 6.4. Układ z zasobnikiem do równoważenia obciążeń impulsowych

SMES-y mogą być zastosowane do wyrównywania obciążenia sieci odbiornikami pulsującymi, obciążenia dobowego (rozładowanie w szczycie), poprawy sterowności kompensacji mocy biernej.

6.3.4. Ochrona wrażliwych odbiorników energii

Nadprzewodnikowe zasobniki energii mogą wygładzać zakłócenia w układach energetycznych, które mogłyby spowodować przerwanie działania wrażliwych odbiorników energii. Gdy wystąpią chwilowe zakłócenia linii przesyłowej, takie jak przeskok iskry lub uderzenie pioruna, może nastąpić utrata dopływu energii, jeśli linia wyłączy się samoczynnie lub obniży się jej napięcie. Zasobnik nadprzewodnikowy ma bardzo krótki czas odpowiedzi i może wstrzyknąć moc czynną w czasie krótszym od długości jednego okresu w celu ochrony wrażliwych odbiorców przed zanikiem zasilania. Układy SMES mogą zatem zapewniać ochronę określonego obszaru sieci energetycznej.



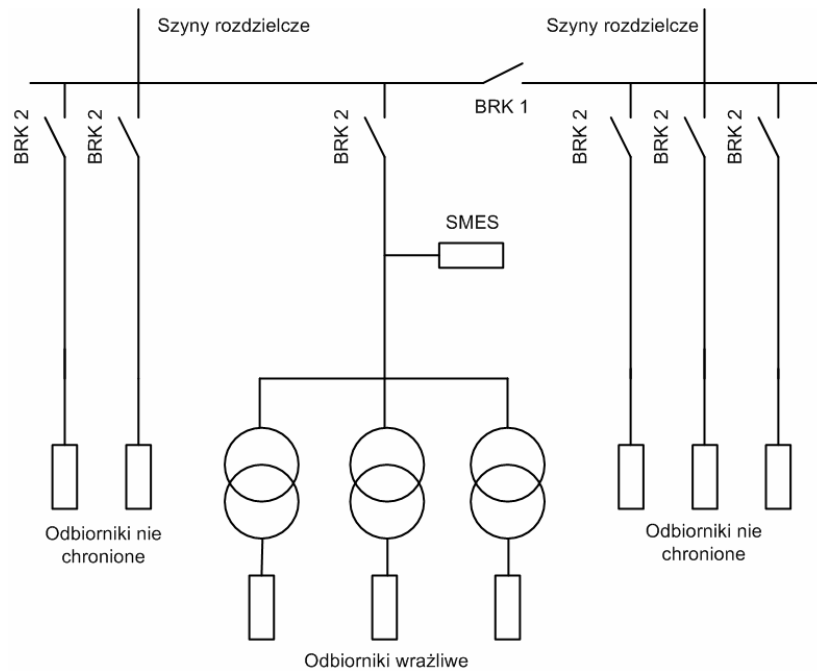
Rys. 6.5. Układ SMES chroniący wszystkie wrażliwe odbiorniki przyłączone do tych samych szyn zbiorczych

Sposób zastosowania SMES-a do polepszania jakości energii dla wrażliwych odbiorników energii przedstawia rysunek 6.5. Najważniejszą cechą tego układu jest jego zdolność do całkowitego zasilania dowolnego odbiornika przyłączonego do niego podczas krótkich zakłóceń układu

elektroenergetycznego, takich jak zapady napięcia powodowane odległymi zwarciami, chwilowe przerwy spowodowane wyładowaniem atmosferycznym lub nieciągłości zasilania podczas przenoszenia obciążenia pomiędzy dwoma źródłami energii. Przy takich zakłóceniach mikrozasobnik będzie zasilał zgromadzoną w nim energią odbiornik, który z kolei zostanie odizolowany od układu elektroenergetycznego.

Zaproponowano również zastosowanie układu SMES-a do ochrony wrażliwych odbiorców przemysłowych i militarnych przed zapadami napięcia i przerwami, jak również w celu zapewniania ciągłego kondycjonowania energii [3].

Innym zastosowaniem jest ochrona rozproszonych wrażliwych odbiorców energii dzięki użyciu zasobnika nadprzewodnikowego [3]. Wykorzystano dwustopniowe działanie napięcia szyn prądu stałego poprzez zastosowanie sterowania histerezy do regulacji rozładowania zasobnika w celu wydłużenia czasu wspomagania wrażliwego odbiornika podczas krótkotrwałych zaburzeń w sieci rozdzielczej.



Rys. 6.6. Układ SMES-a do ochrony rozproszonych wrażliwych odbiorców energii

Zastosowanie zasobnika do ochrony rozproszonych wrażliwych odbiorców energii ilustruje rys. 6.6.

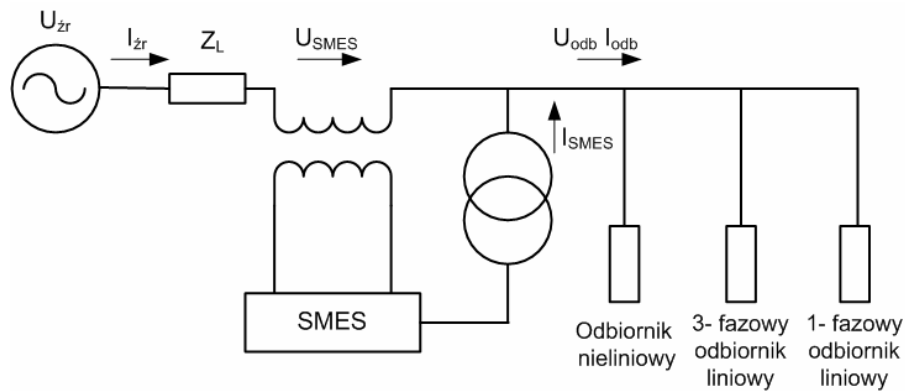
6.3.5. Rezerwa zasilania

Zasobniki nadprzewodnikowe mogą być wykorzystane jako rezerwowe źródła zasilania dla dużych odbiorców przemysłowych w przypadku utracenia głównego źródła zasilania. Mogą one mieć odpowiednio dobraną pojemność energetyczną i są konkurencyjne pod względem kosztów względem konwencjonalnych rezerwowych źródeł zasilania. Badania charakterystyk układów SMES-ów jako rezerwowych źródeł zasilania doprowadziły do opracowania algorytmu sterowania takich źródeł [8].

6.3.6. Równoważenie asymetrii układu elektroenergetycznego

Asymetria napięć często występuje podczas pracy układu elektroenergetycznego. Jej przyczyną mogą być takie nieuniknione stany, jak niesymetryczne zwarcia, obciążenie jednofazowe, nierówne pojemności pomiędzy linia i ziemią, asymetryczne odbiorniki. Niesymetryczne napięcia powodują zwiększanie strat energetycznych transformatorów i linii przesyłowych, zmniejszanie mocy wyjściowej transformatorów, zmniejszanie sprawności silników, wpływają na pracę wrażliwych odbiorników energii oraz zagrożenie bezpieczeństwa urządzeń. Ponadto obciążenia nieliniowe oraz jednofazowe wywołują składowe harmoniczne i asymetrie prądowe, zwiększające straty w sieciach rozdzielczych i niepoprawne działanie innych urządzeń. Do zrównoważenia tych niesymetrycznych prądów i napięć mogą być wykorzystane zasobniki nadprzewodnikowe [9].

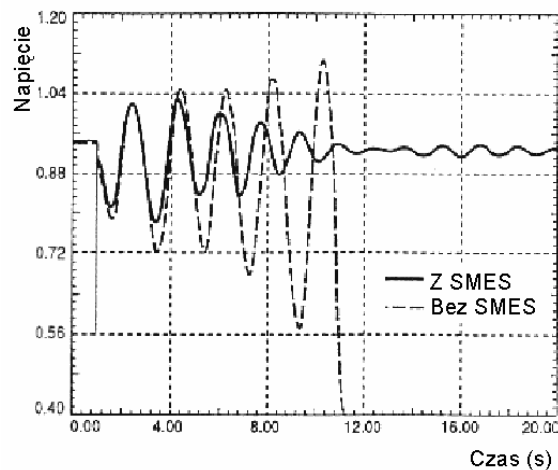
W typowej konfiguracji układu równoważenia asymetrii (rys. 6.7), prąd zawierający dodatkowe harmoniczne wytwarzany przez nieliniowy odbiornik oraz niezrównoważony prąd kolejności przeciwnej układu trójfazowego o obciążeniu jednofazowym, są kompensowane przez prąd pochodzący z układu zasobnika nadprzewodnikowego. Podobnie odkształcone napięcie jak i niezrównoważone napięcie kolejności przeciwnej zawarte w napięciu źródłowym kompensowane są przez napięcie jednostki SMES-a.



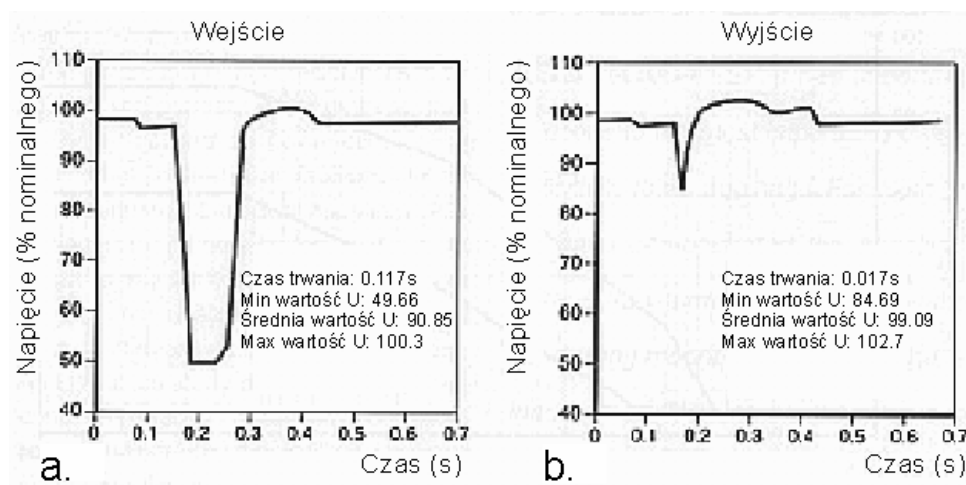
Rys. 6.7. Układ SMES-a równoważący asymetrię i harmoniczne prądu i napięcia

6.4. WYNIKI BADAŃ ZASTOSOWANYCH NADPRZEWODNIKOWYCH ZASOBNIKÓW ENERGII

Głównym obszarem zastosowań nadprzewodnikowych zasobników energii jest obecnie zabezpieczenie przed nieplanowanymi przerwami w dostawie energii (rys. 6.8), zapewnienie jakości dostarczanej energii poprzez łagodzenie efektów chwilowych zaników energii i obniżeń napięcia (rys. 6.9), a także do wyrównywania obciążeń mocy odbiorników energii pracujących w sposób impulsowy lub przerywany, np. kuźni, tartaków czy elektrycznych pieców łukowych.



Rys. 6.8. Zabezpieczenie przed nieplanowanymi przerwami w dostawie energii elektrycznej [1]



Rys. 6.9. Poprawa jakości i stabilności napięcia: a) przebieg napięcia bez zasobnika, b) z zasobnikiem [10]

Zasobniki mogą pracować w układach awaryjnego zasilania *UPS* (*Uninterruptible Power Supply*), kompensacji mocy, filtrów aktywnych, modulacji mocy, sterowania i stabilizacji napięcia w sieciach energetycznych [2], [8].

Typowe zakresy wartości energii zasobników oraz odpowiadające im zakresy stosowanych czasów rozładowań podano w tab. 1.

Tab. 6.1. Zakresy wartości energii zasobników [2], [8]

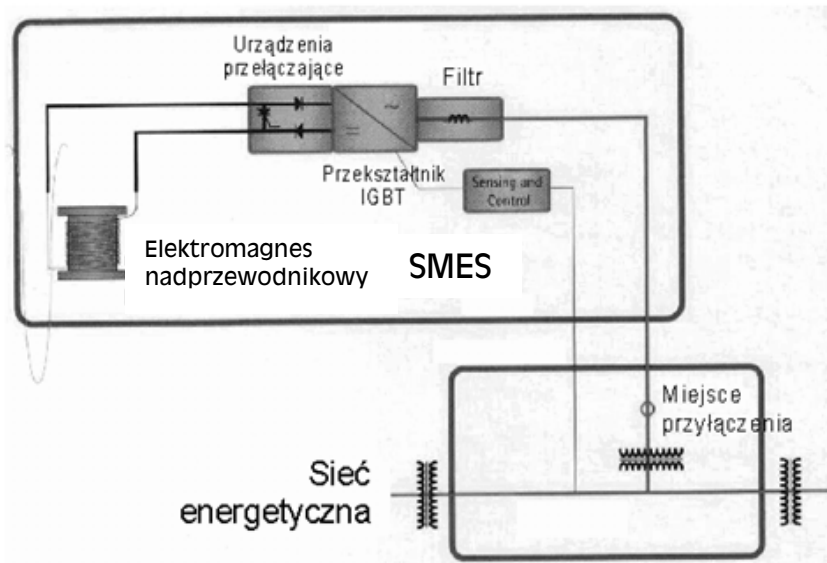
zastosowanie	zakres energii zgromadzonej	czas rozładowania
stabilizacja dostawy energii w systemach energetycznych	50 MJ – 180 GJ	minuty, godziny
sterowanie jakością dostarczonej energii	0.1 – 10 MJ	sekundy
wyrównywanie obciążeń odbiorników	0.1 – 10 MJ	okresy

Rosnące wykorzystanie automatycznego sterowania procesami produkcyjnymi prowadzi do wzrastającej liczby odbiorców, którzy wymagają wysokiej jakości pobieranej energii. Obniżenia napięcia lub przerwy w dostawie energii trwające do 3s stanowią 80-90% wszystkich awarii energetycznych. Mogą one być wyeliminowane poprzez użycie układów

awaryjnego zasilania opartych na technologii zasobników nadprzewodnikowych. Efekty ich zastosowania prowadzące do polepszenia jakości napięcia zasilającego przedstawiono na rys. 6.9.

Postępująca deregulacja rynku energii, przy której następuje rozdzielenie wytwarzania energii od jej przesyłania i dystrybucji, również powinna zwiększyć atrakcyjność nadprzewodnikowych zasobników energii. Przy istniejących konfiguracjach systemów elektroenergetycznych, uwarunkowanych historycznymi przesłankami, zastosowanie nowej technologii może zwiększyć granice stabilności linii przesyłowych, pozwalając na zwiększenie poziomów przesyłanej mocy istniejącymi liniami napowietrznymi bez konieczności ich rozbudowy, której nie sprzyjają czynniki ekologiczne. Do aktywnego sterowania przepływem mocy w systemach elektroenergetycznych mogą być użyte nadprzewodnikowe układy elastycznej transmisji prądu przemiennego *FACTS (Flexible AC Transmission System)* [8], [9].

Zasobnik nadprzewodnikowy może być tu użyty zarówno jako źródło jak i odbiór mocy czynnej przy sterowaniu przesyłem i jego stabilnym działaniu. Technologię wykorzystującą układy *FACTS* nazwano nadprzewodnikowym systemem zarządzania energią *SEMS-a (Superconducting Energy Management System)*.



Rys. 6.10. Układ rozproszonego zasobnika energii przyłączony do sieci elektroenergetycznej [10]

Zastosowanie tego systemu z tzw. zasobnikami rozproszonymi *D-SMES (Distributed SMES)*, rys. 6.10, pozwoli zwiększyć możliwości

przesyłu mocy, tym samym zwiększając opłacalność przesyłu energii pomiędzy obszarami o niskim i wysokim koszcie wytwarzania energii.

Zestawienie i omówienie prowadzonych w ostatnich latach projektów, realizacji i przemysłowych zastosowań zasobników energii z elektromagnesami z nadprzewodników nisko- i wysokotemperaturowych podano w tab.6.2.

Tab. 6.2. Prowadzone i zrealizowane projekty nadprzewodnikowych zasobników energii

L.p	Kraj	Instytucja	Typ nadp.	Parametry
1.	Finlandia	Tampere University	HTS LTS	160 A/200 V/5 kJ 275 A/200 V/ 0.2 MJ
2.	Niemcy	EUS GmbH	HTS	100 A/200 V/8 kJ (model sieci 10 kVA)
3.	Niemcy	FZ Karlsruhe	LTS	2500 A/6 kV/0.22 MJ (modulator 25 MW i 1 MW)
4.	Niemcy	FZ Karlsruhe	LTS	300 A/700 V/0.25 MJ (kompensator mocy)
5.	Niemcy	TU Monachium	LTS	1380 A/3 kV/1 MJ
6.	Niemcy	ACCEL	HTS LTS	80 A/400 V/0.15 MJ 1 kA/400 V/2 MJ
7.	Włochy	CESI, Ansaldo Recherche, Europa Metalli	LTS	1 MVA/4 MJ
8.	Hiszpania	ASINEL	LTS	1 kA/500 V/1 MJ
9.	Japonia	Kansai Electric	LTS	350 A/400 V/1.2 MJ
10.	Japonia	Kyushu Electric	LTS	1 MW/3.6 MJ
11.	Japonia	MITI & ISTEK	LTS	20 kA/2 kV/480 MJ (modelowa elektrownia)
12.	Korea + Rosja	Dankook Univ. Seoul, Instytut Kurczatowa, Moskwa	LTS	1550 A/2 x 0.5 MJ (transfer energii pomiędzy dwoma zasobnikami)
13.	Korea	Electrotechn. Res. Inst	LTS	2 kA/380 V/0.7 MJ
14.	Rosja	Efremov Institute	LTS	3-10 kA/0.2-1 MJ
15.	Rosja	Troitsk Institute	LTS	do 5 MJ
16.	USA	BWX Technologies	LTS	10.8 kA/3375 V/1.8 GJ (sieć na Alasce)
17.	USA	Intermagnetics GC.	LTS	600 kW/6 MJ
18.	USA	Superconductivity Inc.	LTS	0.5-10 MVA/1-10 MJ
19	Polska	Politechnika Lubelska Centrum Doskonałości ASPPECT	HTS	7.3 ÷ 25 kJ

Obejmuje ono trzy grupy projektów: układy mikrozasobników o energiach rzędu MJ wchodzących częściowo w fazę komercjalizacji, układy o energiach rzędu GJ (lub MWh), będące jeszcze w fazie studiów projektowych i konstrukcyjnych, a także zasobniki wysokotemperaturowe o niewielkich energiach w zakresie kilodżuli, których technologia wymaga jeszcze intensywnych badań.

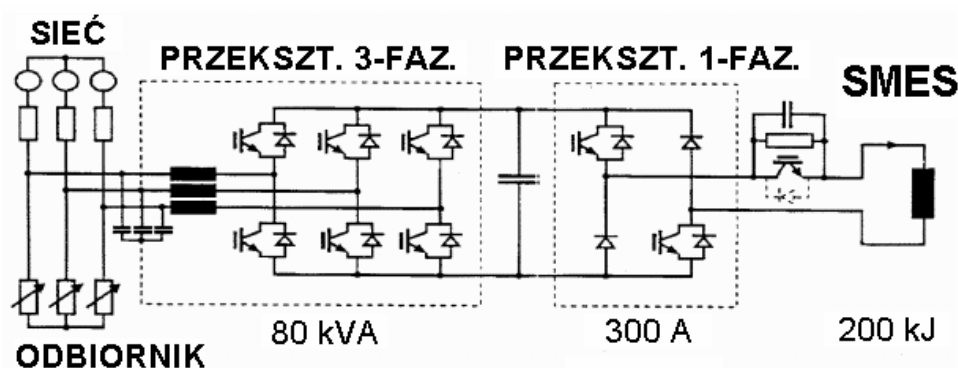
Współcześnie opracowywane technologie zasobników nadprzewodnikowych obejmują trzy grupy projektów: układy mikrozasobników o energiach rzędu MJ, wchodzących częściowo w fazę komercjalizacji, układy o energiach rzędu GJ (lub MWh), będące jeszcze w fazie studiów projektowych i konstrukcyjnych, a także zasobniki wysokotemperaturowe o niewielkich energiach w zakresie kilodżuli, których technologia wymaga jeszcze intensywnych badań. W grupie pierwszej znajdują się nadprzewodnikowe mikrozasobniki o energiach w zakresie 0.2-10 MJ i o mocach wyjściowych od 80 kVA do 10 MVA, które stanowią zdecydowaną większość współczesnych projektów. Wiodące w technologii mikrozasobników są obecnie amerykańskie firmy ASC - American Superconductor (która wchłonęła firmę Superconductivity Inc.) oraz Intermagnetics General Corp. (IGC), które jak dotąd, są jedynymi producentami mikrozasobników nadprzewodnikowych na skalę komercyjną.

Mikrozasobniki mają szczególne zastosowanie jako układy podtrzymania napięcia UPS, dla ochrony wrażliwych na zakłócenia odbiorników energii, takich jak fabryki mikroprocesorów, włókien światłowodowych, papiernie. Oprócz wykonania zasobników badawczych i demonstracyjnych, firma Superconductivity Inc. wykonała na świecie 8 komercyjnych instalacji działających w przemyśle. Firma IGC wykonała zasobnik gromadzący energię 6 MJ o mocy 600 kV. Układ pracuje w zamkniętym cyklu chłodzenia wykorzystując jednostkę skraplającą i wysokotemperaturowe przepusty prądowe o prądzie znamionowym 1000 A.

Projekt FZ Karlsruhe (poz. 3, tab. 6.2) dotyczy całkowicie nowego rozwiązania, jakim jest modulator generujący z częstotliwością 10 Hz impulsy o napięciu 130 kV i mocy 10 GW trwające zaledwie 1,7 ms w sposób nie zakłócający pracy sieci elektroenergetycznej. Układ ten przeznaczony jest do zasilania akceleratora liniowego o długości 30 km w centrum badawczym DESY – Hamburg. Projekt Dankook Univ. Seoul, I Instytutu Kurczatowa w Moskwie (poz. 12, tab 6.2) dotyczy badania możliwości szybkiego przenoszenia energii pomiędzy dwoma zasobnikami. Prowadzony jest również projekt BRITE-EURAM, koordynowany przez Electricite de France, mający na celu rozwój podstawowych technologii niezbędnych dla wytwarzania wysokotemperaturowych zasobników energii przy indukcji 6 T i energii w zakresie megadżuli. Ponadto istnieje, głównie

w USA, szereg zrealizowanych już konstrukcji zasobników, których nie zamieszczono w zestawieniu (tab. 6.2).

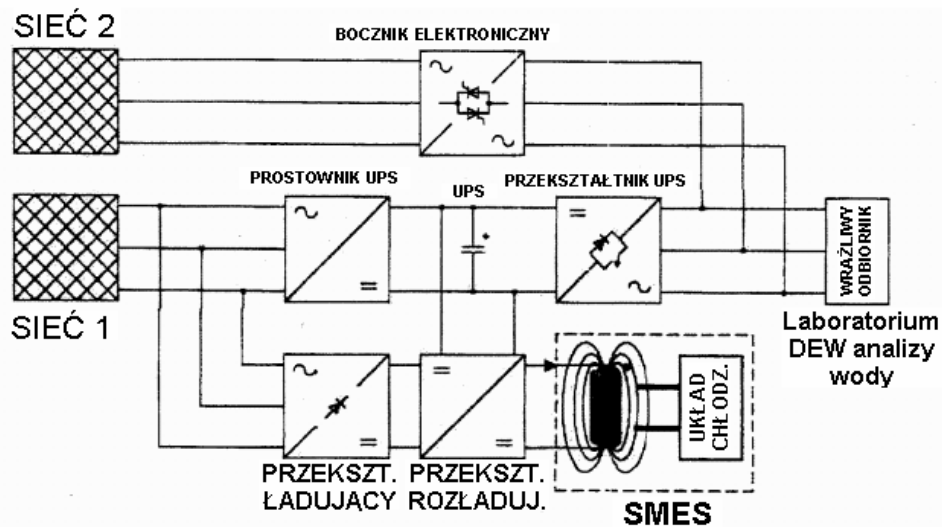
Oprócz ochrony wrażliwych odbiorników przy użyciu nadprzewodnikowych układów UPS, istotna jest również ochrona sieci energetycznej przed zaburzeniami wywołanymi szybko i regularnie zmieniającymi się obciążeniami odbiorników energii. W centrum badawczym Karlsruhe przygotowano jednostkę demonstracyjną szybkiego kompensatora mocy [10] (schemat układu przedstawiono na rys. 6.11), bazującą na zasobniku wykonanym z nadprzewodnika Nb-Ti firmy Furukawa, gromadzącym energię 200 kJ o mocy 80 kW.



Rys. 6.11. Szybki kompensator mocy [11]

Zastosowano ją do prób przemysłowych w tartaku w Schwarzwaldzie [11]. Zasobnik ma charakter modułarny. Początkowo złożono z sześciu cewek układ solenoidalny, charakteryzujący się dużym polem rozproszenia. Dalsze testy są prowadzone dla układu toroidalnego, złożonego z 10 cewek, który jest bardziej przyjazny dla środowiska ze względu na praktyczny brak pola rozproszenia, jednak cechuje się znaczną złożonością konstrukcji i układu chłodzenia a więc i większymi kosztami. Dzięki zastosowaniu tego pierwszego w Europie kompensatora nadprzewodnikowego jako filtra aktywnego, zredukowano w sieci efekt migotania o częstotliwości 10 Hz powodowany przez działanie tartaku, który przedtem w sposób niedopuszczalny zakłócał działanie oświetlenia i innych odbiorników energii.

Przykładem wykorzystania zasobnika nadprzewodnikowego do zapewnienia wysokiej niezawodności dostawy energii jest układ zasilający laboratorium instytutu hydrologicznego DEW (Dortmunder Energie und Wasser) wykonującego nieprzerwane testy jakości wody, rys. 6.12, [12]. Istniejące dwa niezależne źródła zasilania nie mogą pracować równolegle, zaś czas potrzebny na przełączenie wynosi 3 s.



Rys. 6.12. Nadprzewodnikowy zasobnik energii firmy ACCEL w układzie zasilania instytutu DEW w Dortmundzie [12]

Występujące w środowisku wiejskim wyładowania atmosferyczne, fluktuacje obciążeń, migotania i odkształcenia harmonicznych w sieci zasilającej powodują problemy z urządzeniami pomiarowymi o wysokiej czułości oraz utratę cennych danych pomiarowych. Zastosowanie układu z zasobnikiem nadprzewodnikowym, zaprojektowanym przez firmy ACCEL Instr. GmbH oraz EUS GmbH (rozdział 2, rys. 2.1) o pojemności energetycznej 2,1 MJ i maksymalnej mocy 88 kW wykonanym z nadprzewodnika NbTi pracującego w ciekłym helu, pozwoliło uniknąć licznych krótkotrwałych zakłóceń zasilania wrażliwego układu pomiarowego.

6.5. LITERATURA DO ROZDZIAŁU 6

- [1] Surdacki P., Nadprzewodnikowe zasobniki energii - postępy technologii i zastosowań, *Przegląd Elektrotechniczny*, Rok LXXIX, Nr 9, 2003, str. 605-611.
- [2] Xue X.D., Cheng K.W.E., Sutanto D., A study of the status and future of superconducting magnetic energy storage in power systems, *Supercond. Sci. and Technol.* 19, 2006, pp. R31-R29.
- [3] Aware M.V., Sutanto D., SMES for protection of distributed critical loads, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19. July 2004, pp. 1267-1275.
- [4] Nomura S., Tsutsui H., Tsuji-lio S., Shimada R., Flexible power interconnection with SMES, *IEEE Trans. on Applied Superconduct.*, vol. 16, no. 2, June 2006 pp. 616-619.
- [5] Ribeiro, P.F., Johnson, B.K., Crow, M.L., Arsoy, A.; Liu, Y., Energy storage systems for advanced power applications, *Proc. of the IEEE*, vol. 89, no. 12, Dec 2001, pp. 1744-1756.
- [6] Arsoy, A.B., Liu, Y., Ribeiro, P.F., Wang, F., StatCom-SMES, *IEEE Industry Applic. Mag.*, vol. 9, no. 2, 2003, pp. 21- 28.
- [7] Ise T., Furukawa K., Kobayashi Y., Kumagai S., Sato H., Shintomi T., Magnet power supply with power fluctuation compensating function using SMES for high intensity synchrotron, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 13, No. 2, June 2003, pp. 1814-1817.
- [8] Chu Xu, Jiang X., Lai Y., Wu X., Liu W., SMES Control Algorithms for Improving Customer Power Quality; *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1 , March 2001, pp. 1769-1772.
- [9] Ise T., Ishii J., Kumagai S., Compensation of harmonics and negative sequence components in line current and voltage by a SuperSMES, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, June 1999, pp. 334-337.
- [10] Surdacki P., Zastosowania nadprzewodnikowych zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych, VI Konferencja Naukowa „Postępy w Elektrotechnologii”, Jamrozowa Polana, 20-22.09.2006, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, str. 285-291.

SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE

CONTENTS

PRIMARY SYMBOLS AND ACRONYMS	5
INTRODUCTION	7
1. INTRODUCTION TO SUPERCONDUCTING DEVICES	8
1.1. FUNDAMENTALS OF SUPERCONDUCTIVITY.....	8
1.2. ELECTRICAL SUPERCONDUCTING DEVICES.....	12
1.3. WINDING WIRES AND TAPES.....	13
1.3.1. LTS wires – Nb-Ti, Nb ₃ Sn.....	19
1.3.2. HTS wires – Bi-2212, Bi-2223, Y-123.....	24
1.4. COOLING OF SUPERCONDUCTING DEVICES.....	30
1.4.1. Cooling in bath.....	30
1.4.2. Forced cooling.....	32
1.4.3. Contact cooling.....	34
1.4.4. Cooling in bath with contact-aided.....	35
1.5. CURRENT CRYOLEADS.....	37
1.6. SUPERCONDUCTING MAGNETS	45
1.6.1. Superconducting winding construction	45
1.7. REFERENCES TO CHAPTER 1.....	47
2. BASIC INFORMATION ABOUT SUPERCONDUCTING ENERGY STORAGE	49
2.1. INTRODUCTION.....	49
2.2. MAIN ELEMENTS OF SUPERCONDUCTING ENERGY STORAGE.....	55
2.2.1. Superconducting magnet.....	56
2.2.2. SMES cryogenic system	56
2.2.3. SMES current leads.....	57
2.2.4. SMES converter system	57
Parallel system.....	57
Series system.....	59
Hybrid system with emergency battery.....	61
2.3. REFERENCES TO CHAPTER 2.....	63
3. DESIGN AND CONSTRUCTION OF MAGNET FOR SUPERCONDUCTING ENERGY STORAGE	65
3.1. ASSUMPTIONS FOR DESIGN OF ENERGY STORAGE SUPERCONDUCTING MAGNET.....	65
3.1.1. HTS magnet's numerical model	65
3.1.2. HTS magnet's winding configuration for SMES.....	66
3.2. DESIGN OF ENERGY STORAGE SUPERCONDUCTING MAGNET.....	74
3.3. CONSTRUCTION OF HTS MAGNET FOR SMES.....	76
3.3.1. Superconducting coil components.....	76
3.3.2. Coils insulation	77
3.3.3. Superconducting coils winding	82
3.3.4. Main elements of SMES magnet.....	83

3.4. REFERENCES TO CHAPTER 3.....	85
4. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SMES MAGNET.....	86
4.1. TEST STAND.....	86
Vacuum system.....	87
Cooling system.....	88
SMES magnet	89
Measurements systems.....	90
4.2. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SINGLE COILS OF SMES MAGNET.....	92
4.2.1. Coil resistance measurement at room temperature (290 K).....	92
4.2.2. Single coils V-A characteristic measurement of SMES magnet at temperature 77 K.....	94
4.3. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WHOLE SMES MAGNET.....	99
4.4. SMES ENERGY.....	101
5. CONVERTER SYSTEMS FOR SUPERCONDUCTING ENERGY STORAGE.....	103
5.1. INTRODUCTION.....	103
5.2. CURRENT INVERTER SYSTEMS.....	103
5.3. ENERGY STORAGE SYSTEM WITH DC/DC BREAKER AND VOLTAGE INVERTER.....	106
5.3.1. DC/DC breaker.....	108
5.3.2. Voltage inverter	109
5.4. OTHER SYSTEMS.....	111
5.5. CONCLUSION.....	114
5.6. REFERENCES TO CHAPTER 5.....	115
6. COOPERATION OF SUPERCONDUCTING ENERGY STORAGE SYSTEMS WITH ELECTRICAL GRID.....	121
6.1. INTRODUCTION.....	121
6.2. STABILITY IMPROVEMENT SYSTEMS OF ELECTRICAL GRID.....	122
6.2.1. Oscillation reduction.....	122
6.2.2. Voltage stability improvement.....	122
6.3. ENERGY QUALITY IMPROVEMENT SYSTEMS.....	123
6.3.1. Rotating reserve.....	123
6.3.2. Flexible transmission systems FACTS.....	123
6.3.3. Impulsion load balancing.....	124
6.3.4. Sensitive energy receiver protection.....	125
6.3.5. Power supply reserve	127
6.3.6. Asymmetry balancing of electric power systems.....	127
6.4. INVESTIGATION RESULTS OF APPLIED SUPERCONDUCTING ENERGY STORAGE SYSTEMS	128
6.5. REFERENCES TO CHAPTER 6.....	135
CONTENTS.....	136
ABSTARCT.....	138

ABSTRACT

Among the most applicable and technologically advanced high current superconducting devices there are Superconducting Fault Current Limiters (SFCL) and Superconducting Magnetic Energy Storages (SMES). Despite good perspective of application both type of superconducting devices as a consequence of their design and results of experimental examinations, only Superconducting Magnetic Energy Storage systems have presently reached stage of limited commercial application in electromagnetic network. Commercial fabrication of SMES systems take place only in the United States, but in many laboratories of Western Europe, Japan, Russia, Korea and China there are intensive experimental and project designing works resulted in many kinds of experimental devices. Not very advanced level of superconducting technologies in other countries, also in Poland, is a consequence of underestimating their practical applications, lack of financial research support, but also small knowledge dissemination about this unique but very promising devices.

Presented monograph bring closer problems of Superconducting Magnetic Energy Storages that includes construction, operation conception and criterion of superconducting HTS magnet for SMES system as well as designing and exploitations problems of whole SMES. The monograph describes also selected SMES systems and their applications.